

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas  
Facultad Matemática, Física y Computación  
Licenciatura en Ciencia de la Computación**



**Trabajo de Diploma**

**Implementación de nuevos algoritmos para la  
operación localización-asignación del módulo  
de análisis de redes de gvSIG**

**Autor:** Lakshan Jayatilake

**Tutor:** Dr. Carlos Pérez Risquet

**Licenciatura en Ciencia de la Computación**

*Santa Clara  
2014*

## *Agradecimientos*

*A Dios por haberme permitido lograr esta parte tan importante en mi vida.*

*A mis padres por ser mi fortaleza en la vida y apoyarme siempre en todo.*

*A mi hermanas por sus apoyos y por sus comprensiones en todo lo largo de este camino.*

*A mi tutor Carlos Pérez por haber confiado en mí, apoyándome en la culminación de la tesis, muchas gracias por sus consejos y por ser mi ejemplo como maestro.*

*Al profesor Romel Vázquez por su valiosa ayuda y preocupación durante el desarrollo del trabajo.*

*A mis compatriotas de Santa Clara por compartir tantos momentos buenos y por sus apoyos.*

*A Mayu y Suníndu por sus buenos consejos y por sus ayudas.*

*A los profesores que me han aportado los más disímiles valores durante todos mis años de estudios.*

*A mis amigos Yuney, Humberto, Roman, Bac por ayudarme siempre en lo que necesitaba.*

*A la revolución cubana por brindarme la oportunidad de estudiar en Cuba.*



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Ciencias de la Computación, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la autorización de la Universidad.

---

Firma del autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del tutor

---

Firma del jefe del Laboratorio

*“El verdadero buscador no se identifica ni con el nombre ni con la forma, no se lamenta por lo que no tiene ni por lo que pudo haber sido.”*

“Dhammapada 25:8”

- Lord Buddha

*“God does not care about our mathematical difficulties. He integrates empirically.”*

-Albert Einstein

*“Las ideas no necesitan ni de las armas, en la medida en que sean capaces de conquistar a las grandes masas.”*

-Fidel Castro Ruz

## RESUMEN

La integración de las operaciones para el análisis de redes de transporte en Sistemas de Información Geográfica (SIG) es una alternativa novedosa para la gestión y planificación de servicios en el ámbito urbano. Dotar a los Sistemas de Información Geográfica con tales herramientas contribuye a una mejor comprensión en el área de los Sistemas de Ayuda de Decisión Espacial.

El módulo de redes de gvSIG contiene varias operaciones para el análisis de redes de transporte, pero no cuenta con las funciones maximizar cobertura, maximizar asistencia y maximizar mercado compartido de la herramienta Localización-Asignación. Estas operaciones son muy importantes si se quiere optimizar la cantidad de servicios de un mismo tipo necesarios dentro de una ciudad, o simplemente escoger los que están mejor ubicados respecto a la demanda. En el presente trabajo se implementaron los algoritmos mencionados y se agregaron a este módulo, lo que permite efectuar un nuevo tipo de análisis con este SIG. Se presentaron las principales características de la nueva herramienta que se añadió, así como una secuencia de pasos para su integración al módulo correspondiente en gvSIG.

Se trabajó con el callejero de Sevilla, escogiendo como servicios a los colegios públicos y privados, y como demandas a los centroides censales de la ciudad, para realizar una comparación de los resultados de la nueva operación con los de ArcGIS, analogía que hizo válido el fruto de esta investigación, pues en ambos casos se llegó a la misma solución.

## ABSTRACT

The integration of the operations for the analysis of transportation networks in Geographic Information System (GIS) is a new alternative for the services management and planning in the urban field. Providing GIS with such tools contributes to a better comprehension in the field of Spatial Decision Help Systems.

The gvSIG networks module contains several operations for the analysis of the transportation networks, but it does not count maximize coverage, maximize attendance, maximize market share of the Location-Allocation tool, very important if you want to optimize the quantity of services of the same type we need inside a city or to select the better located ones respecting the demand. In the present work, the mentioned algorithms was implemented and added to this module. This allows us to develop a new kind of analysis for these GIS. The main characteristics of the new added tool were presented, as well as a steps sequence for its integration to the corresponding module of gvSIG.

We worked with the street map of Sevilla by selecting public and private schools as services and the city census centers as demands. This was done for making a comparison between the results of the new operation and the ArcGIS results. Such analogy validated the fruit of the research, since we arrived to the same conclusion in both cases.

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. OPERACIONES SOBRE REDES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 6	
1.1 Teoría de redes .....	6
1.1.1 Redes de Transporte.....	7
1.1.2 Redes de Servicio.....	8
1.2 Operaciones sobre redes de transporte.....	8
1.2.1 Mejor Ruta.....	9
1.2.2 Facilidad más cercana .....	10
1.2.3 Área de Servicio.....	11
1.2.4 Matriz de costo Origen-Destino .....	12
1.2.5 Enrutamiento de vehículos.....	13
1.2.6 Localización-Asignación .....	15
1.3 Sistemas de Información Geográfica.....	17
1.3.1 ArcGIS .....	19
1.3.2 GvSIG .....	22
1.4 Metaheurísticas .....	24
1.4.1 Recocido Simulado.....	25
1.4.2 Algoritmos Genéticos .....	26
1.4.3 Búsquedas Tabú.....	30
1.4.4 Algoritmos con Hormigas (Ant System) .....	31
1.4.5 GRASP .....	33
Conclusiones parciales .....	35
CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA EXTENSIÓN .....	36
2.1 Selección del tipo de algoritmo a utilizar en la extensión .....	36

2.1.1 Descripción de la biblioteca utilizada para resolver el algoritmo seleccionado .....	37
2.2 Diseño de la extensión .....	38
2.2.1 Diagrama de casos de uso .....	39
2.2.2 Diagrama de Clases .....	40
2.3 Implementación .....	45
2.3.1 Selección de las tecnologías .....	45
2.3.2 Consideraciones sobre la operación Localización-Asignación .....	47
2.3.2.1 Implementación del algoritmo genético .....	47
2.3.2.2 Implementación para resolver maximizar cobertura .....	48
2.3.2.3 Implementación para resolver maximizar asistencia .....	48
2.3.2.4 Implementación para resolver maximizar mercado compartido .....	49
2.3.2.5 Implementación para visualizar la solución del problema .....	51
2.3.3 Secuencia de pasos utilizados para la adición de la operación Localización-Asignación al módulo de análisis de redes de gvSIG .....	51
Conclusiones parciales .....	53
CAPÍTULO 3. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	54
3.1 Manual de usuario .....	54
3.2 Validación de los resultados .....	60
Conclusiones Parciales .....	70
CONCLUSIONES GENERALES .....	71
RECOMENDACIONES .....	72
BIBLIOGRAFÍA .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mejor ruta .....	10
Figura 2. Facilidad más cercana .....	11
Figura 3. Área de Servicio .....	12
Figura 4. Matriz de costo Origen-Destino .....	13
Figura 5. Enrutamiento del vehículo .....	14
Figura 6. Localización-Asignación .....	17
Figura 7. Visualización de datos con ArcView .....	20
Figura 8. Visualización con Arc-Editor .....	22
Figura 9. Interfaz Visual de gvSIG .....	23
Figura 10. Diagrama de casos de uso .....	39
Figura 11. Diagrama de las clases dentro de <i>org.gvsig.graph.gui</i> .....	41
Figura 12. Dependencias entre las clases nuevas en <i>org.gvsig.graph.gui</i> .....	41
Figura 13. Asociaciones de la clase <i>Location_AllocationControlPanel</i> .....	42
Figura 14. Relaciones de la clase <i>Location_AllocationTask</i> .....	43
Figura 15. Asociaciones de la clase <i>Location_AllocationExtension</i> .....	43
Figura 16. Relación de la nueva extensión con otras clases .....	44
Figura 17. Diagrama de clases del paquete JGAP .....	45
Figura 18. Creación de una nueva vista .....	54
Figura 19. Adición de capas.....	55
Figura 20. Agregar la red y seleccionar la operación sobre redes .....	56
Figura 21. Panel de opciones de la operación localización-asignación .....	57
Figura 22. Representación visual de los resultados de la operación Localización-Asignación para el tipo de problema maximizar impedancia con dos servicios exactamente .....	59
Figura 23. Tabla de los resultados.....	59
Figura 24. Solución de gvSIG para maximizar cobertura con 2 servicios y 1000 de impedancia.....	60

Figura 25. Solución de ArcGIS para maximizar cobertura con 2 servicios y 1000 de impedancia.....61

Figura 26. Solución de ArcGIS para maximizar cobertura con 10 servicios y 1000 de impedancia.....62

Figura 27. Solución de gvSIG para maximizar cobertura con 10 servicios y 1000 de impedancia.....63

Figura 28. Solución de gvSIG para maximizar asistencia con 3 servicios y 1000 de impedancia.....64

Figura 29. Solución de ArcGIS para maximizar asistencia con 3 servicios y 1000 de impedancia.....64

Figura 30. Solución de ArcGIS para maximizar asistencia con 13 servicios y 1000 de impedancia.....65

Figura 31. Solución de gvSIG para maximizar asistencia con 13 servicios y 1000 de impedancia.....66

Figura 32. Solución de gvSIG para maximizar mercado compartido con 1 servicio, 2 competidores y 1000 de impedancia.....67

Figura 33. Solución de ArcGIS para maximizar mercado compartido con 1 servicio, 2 competidores y 1000 de impedancia.....67

Figura 34. Solución de ArcGIS para maximizar mercado compartido con 2 servicios, 4 competidores y 1000 de impedancia.....68

Figura 35. Solución de gvSIG para maximizar mercado compartido con 2 servicios, 4 competidores y 1000 de impedancia.....69

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de procedimientos de análisis geográfico orientados hacia la gestión y planificación de servicios se presenta actualmente como uno de los campos de mayor desarrollo, a partir de tenerse en consideración el actual avance de los Sistemas de Información Geográficos (SIG), en relación con los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) para la localización de equipamientos. Los modelos de mayor especificidad en el campo de aplicación han quedado establecidos desde un punto de vista conceptual y práctico a partir de la década de 1970 (Revelle and Swain, 1970, Austin, 1974, McAllister, 1976); y en la década de 1990 comenzaron lentamente a difundirse, en consonancia con las nuevas orientaciones en el desarrollo de software para el apoyo a la toma de decisiones (Densham, 1991).

Esta generalización técnica ha evolucionado a la par de los aspectos socio-económicos, tanto en el aumento de la diversificación de servicios básicos a la población como en cuanto a la aparición de un modelo postfordista, en el que tienen un papel importante las pequeñas y medianas empresas proveedoras de servicios a la industria y a otras empresas de mayor importancia.

Por lo tanto, la ubicación espacial de los servicios resulta fundamental en diferentes niveles, aunque en el ámbito público surge con mayor claridad, pues permite ayudar a trazar algunas líneas mediante las cuales se pueda aproximar a lograr una mayor equidad en las relaciones socio-espaciales de la oferta y la demanda.

Se pretende realizar un análisis exploratorio de datos espaciales y la localización espacial a fin de apoyar, desde la Geografía, el proceso de toma de decisiones cuando se deben instalar, reubicar o ampliar un número determinado de instalaciones de servicios públicos urbanos.

Los estudios geográficos cuentan con una amplia tradición en la generación de teorías y modelos generales para el análisis de las actividades humanas.

En cuanto a las actividades terciarias es posible considerar como inicio la teoría de los lugares centrales propuesta por Walter Christaller en 1933 como modelo de localización espacial óptima de núcleos urbanos a nivel regional.

Sobre la base de este modelo, en el cual la distancia y los costos de traslado se presentan como los principales factores que llevan a diferentes configuraciones territoriales, fue apareciendo con claridad una línea de trabajo centrada en la actividad terciaria, en cuanto a la evolución urbana como centros de servicios en

escalas regionales y a partir de centros interurbanos en las grandes ciudades, con lo cual a partir de allí surge la consideración de una geografía del marketing, término presentado por (Berry et al., 1971) y ampliamente analizado en sus capacidades actuales por una serie de autores (Moreno Jiménez, 1995), (Moreno Jiménez, 2004), (Bosque Sendra and Moreno Jiménez, 2004a), (Bosque Sendra and Moreno Jiménez, 2004b), (Salado García, 2004). De esta manera, la teoría de la localización comienza a contemplar el problema de la localización de instalaciones de servicios y se produce un doble objetivo en los estudios: por un lado, encontrar la localización óptima, y por el otro, determinar la asignación de demanda a dichos centros. Teniendo en cuenta esta doble necesidad de resolución, se desarrollan los modelos de localización-asignación. Los modelos de localización-asignación son modelos que intentan establecer la localización óptima de una instalación o servicio, en base a los elementos que influyen en su utilización y considerando también su distribución espacial. La eficiencia espacial se estima mediante la suma de distancias entre la oferta y la demanda.

En los últimos años, la aplicación de modelos de localización-asignación, si bien son operacionalizados sobre la base del entorno de los Sistemas de Información Geográfica, han sido enmarcados en los sistemas específicos que se han denominados Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial.

De acuerdo a (Bosque Sendra, 2000) los SADE tienen como objetivo brindar el entorno de hardware y software necesario para facilitar al usuario la toma de decisiones sobre cuestiones espaciales. En este sentido, debe facilitar la exploración del problema, la generación de variadas soluciones y la evaluación de las diferentes alternativas.

En (Densham, 1991) se presentan dos niveles bien diferenciados en cuanto a la aplicación de un SADE, el del usuario que toma decisiones a través de generar, evaluar y elegir alternativas de solución, y la interface del sistema, que logra una interacción multidireccional entre la base de datos y sus posibilidades de reportes numéricos y gráficos.

## Planteamiento del Problema

Existen hoy día numerosos problemas difíciles de estudiar y resolver en el proceso de toma de decisiones en la planificación urbana y regional. En consecuencia, es importante utilizar y desarrollar las herramientas más adecuadas para tratar estos problemas. Por esta razón se han realizado esfuerzos en aprovechar las ventajas de integrar los modelos de localización y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Uno de los SIG más populares es gvSIG, por su condición de ser un software libre. Este presenta varias operaciones para el análisis de redes, pero es necesario realizar nuevos análisis para resolver diversos problemas de redes de transporte, por lo que se pretende añadir nuevos algoritmos para la operación localización-asignación del módulo de análisis de redes de gvSIG.

## Objetivo General

- Extender el módulo de redes de gvSIG mediante la incorporación de nuevos algoritmos para la operación localización-asignación para el análisis de redes de transporte.

## Objetivos Específicos

- Identificar los principales referentes teóricos y los modelos matemáticos que sustentan la operación de localización-asignación para el análisis de redes.
- Implementar nuevos algoritmos para la operación localización-asignación del módulo de análisis de redes de gvSIG.
- Crear una secuencia de pasos para la incorporación de los nuevos algoritmos a la operación localización-asignación del módulo de análisis de redes de gvSIG.
- Validar la efectividad del uso de los nuevos algoritmos para el análisis de redes.

## Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son los referentes teóricos y los modelos matemáticos que sustentan la operación de localización-asignación del módulo de análisis de redes de gvSIG?
- ¿Cuáles son las principales variantes no implementadas de la operación localización-asignación en gvSIG?
- ¿Qué tipos de algoritmos se deben emplear para la implementación de la operación localización-asignación?

- ¿Cuál sería la secuencia de pasos necesaria para la incorporación de nuevos algoritmos para la operación de localización-asignación del módulo de análisis de redes de gvSIG?
- ¿Cuál es la efectividad de los nuevos algoritmos para el análisis de redes?

### **Antecedentes**

Como antecedente de la operación localización-asignación en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tenemos la implementación de maximizar cobertura, maximizar asistencia, maximizar mercado compartido para la operación en ArcGIS, pero este es un software propietario y es difícil el acceso al mismo. GvSIG es otro SIG popular, que presenta otras operaciones para el análisis de redes, pero no contiene los algoritmos antes mencionados.

### **Justificación de la Investigación**

Las actuales tecnologías digitales y particularmente la asociación entre los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos de análisis de redes de transporte han logrado generar importantes posibilidades en cuanto al estudio y toma de decisiones en problemas de planificación urbana y regional. Es importante seguir desarrollando herramientas que contribuyan al análisis y resolución de estos problemas de planificación. Por esta razón y para aprovechar las ventajas de la integración entre los modelos de análisis de redes de transporte y los SIG, se pretende agregarle nuevos algoritmos al módulo de análisis de redes de gvSIG la operación localización-asignación. Esta tecnología será de gran utilidad a los usuarios que demanden este SIG.

### **Viabilidad de la Investigación**

El estado actual de los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial y el desarrollo de los SIG ofrece una amplia gama de ideas a desarrollar en este trabajo. Para el desarrollo de esta investigación se cuenta con los recursos necesarios para acometer las tareas propuestas, que incluyen los códigos fuentes de gvSIG, la información cartográfica y la capacidad de procesamiento de datos y de gráficos. Por otro lado, se cuenta con el apoyo de los profesores y estudiantes pertenecientes al grupo de investigación Computación Gráfica del Centro de Estudios de Informática.

### **Hipótesis**

Después de haber elaborado el marco teórico se formuló la Hipótesis general de investigación siguiente:

La integración de las operaciones para el análisis de redes con SIG en una misma aplicación permite resolver una enorme cantidad de problemas complejos que se presentan en la actualidad, y puede ayudar a la toma de decisiones espaciales. En específico, la operación localización-asignación permite realizar estudios y resolver situaciones en temas como la urbanización, servicios sociales, entre otros; y si lo integramos a un Sistema de Información Geográfica podemos solucionar estos problemas y presentar los resultados de forma visual que es más asequible para usuarios no expertos.

## CAPÍTULO 1. OPERACIONES SOBRE REDES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

En el presente capítulo se tratan los principales conceptos y tipos de redes. Se abordan las principales características de los SIG, así como una descripción de los más utilizados en el mundo del software libre para el análisis de redes. Además se brindan elementos que evidencian la integración de operaciones para el análisis de redes de transporte con los SIG. También se tratan los principales conceptos y características de los algoritmos metas heurísticas más utilizadas y reconocidas en la optimización combinatoria.

### 1.1 Teoría de redes

Una red se configura como un sistema de nodos entre los que se establecen relaciones a través de arcos. Por esa red puede viajar energía o materia. Definiciones más concretas del concepto son las siguientes:

Una red es un sistema interconectado de elementos lineales, que forma una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo: personas, mercancías, energía o información (Bosque Sendra and Moreno Jiménez, 1990)

Una red está formada por una serie de arcos interconectados, a través de los cuales es posible el movimiento de recursos, de acuerdo con ciertas restricciones (Puebla, 2003)

Como queda reflejado en las definiciones anteriores, los principales componentes de una red son los elementos lineales, los arcos, pero la sola existencia de los arcos no justifica la existencia de una red. Es necesario que exista un flujo de materia o energía entre esos arcos, y este flujo procede de determinados elementos puntuales conocidos como nodos.

Una red la componen elementos lineales y puntuales:

- A los elementos lineales (arcos) se pueden asociar parámetros de fricción (longitud, tiempo en ser recorrido...) o propiedades (sentido de la marcha, o condiciones a la conectividad).
- A los elementos puntuales (nodos) se les puede asignar una fricción (tiempo de espera en los semáforos), o unas propiedades (información temática como, por ejemplo, número de habitantes de un núcleo de población).

- A ellos habría que añadir los elementos poligonales, consecuencia de la atracción que ejercen los nodos, a través de los arcos, sobre el territorio, y que son conocidos como áreas de influencia.

Cualquier sistema de elementos interconectados mediante líneas, como las carreteras, las vías de tren, los ríos o las redes eléctricas, puede ser concebido como una red (Gutierrez Puebla, 1998)

Mediante redes se realiza el movimiento de personas, el transporte de bienes y servicios, las comunicaciones y los flujos de energía o recursos.

Una red tiende a ser utilizada de la forma más eficiente posible (por ejemplo, se suele seguir la ruta más corta para llegar a casa), aunque a veces interesa seguir la ruta más adecuada (por ejemplo, la más rápida, la más interesante, o aquella en la que ponen menos multas).

Las operaciones analíticas son relativamente sencillas, aunque pueden volverse algo más complejas, si se desea una efectiva modelización de la circulación a través de la red, debido a la cantidad de detalles a tener en cuenta. En el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las redes son empleadas para modelar dos tipos de fenómenos, los Transportes y los Servicios.

### **1.1.1 Redes de Transporte**

Las redes de transporte son redes no direccionadas, lo que significa que aunque una línea tenga una dirección establecida, quien la utilice es libre de decidir la dirección a seguir, su velocidad y el destino: es el caso de los peatones, o del tráfico rodado. El agente en la red, por ejemplo, un camionero que viaja por carreteras, suele tener libertad para decidir la dirección de la travesía así como el destino. En este tipo de red existen restricciones al flujo, del tipo “calles con dirección única”, “prohibido girar a la izquierda” (que afectarían a los vehículos), o bien “prohibido circular por la acera en autovías” (que afectaría a los peatones).

Cuestiones típicas que resuelve el análisis de redes de transporte son:

- Diseñar la ruta más adecuada para ir de una localidad a otra.
- Seleccionar los hospitales más cercanos a un accidente.
- Calcular la matriz de tiempo entre todos los núcleos urbanos de una provincia.
- Generar el área de influencia de un colegio.
- Elegir el servicio mejor ubicado respecto a la demanda.

### 1.1.2 Redes de Servicio

Las redes de servicios (o geométricas) son direccionadas, lo que implica que el agente o recurso que las utiliza (agua, electricidad...) fluye a través de la red dependiendo de ciertas reglas establecidas, y que su ruta está pre-determinada. El agente en la red, por ejemplo el petróleo que circula por una conducción, no puede elegir la dirección en la que circular; en su lugar, existen fuerzas externas que determinan la ruta: gravedad, electromagnetismo, presión del agua y así sucesivamente. Un ingeniero puede controlar el caudal del agente controlando cómo actúan las fuerzas externas sobre el agente. Las reglas pueden ser modificadas, pero no por el agente mismo sino por quien controla la red, que mediante la apertura y cierre de válvulas (en el caso del agua, por ejemplo), puede modificar la dirección del flujo en la red.

En los modelos vectoriales, una red de servicios se representa mediante grafos geométricos cuyos nodos y arcos se muestran mediante puntos y líneas, respectivamente. Tanto los puntos como las líneas indican la localización de los nodos y arcos en el espacio. Los grafos geométricos, aun cuando capturan la localización y topología de las entidades en el espacio, tienen muchas limitaciones para representar otras propiedades; pues no capturan, por ejemplo, propiedades geométricas, tales como la forma, dirección y orientación que tienen las entidades de la red en el mundo real.

Por otro lado, los modelos de rejillas, entre los cuales el modelo raster es el más conocido, representan los nodos y enlaces de una red de servicios mediante conglomerados y secuencias lineales de celdas, respectivamente. Una celda es un conjunto de píxeles que tienen forma poligonal, normalmente rectangular. Este tipo de modelos captura implícitamente la forma y topología de la red, pero la calidad de la representación está restringida por el tamaño de la celda. Otra deficiencia de los modelos teselares es que la distinción entre los nodos y arcos de la red se pierde, lo cual dificulta la caracterización de los objetos que las celdas representan.

## 1.2 Operaciones sobre redes de transporte

Las operaciones sobre redes de transporte mediante la utilización de los SIG están destinadas a establecer patrones de movilidad caracterizados por un bajo número de desplazamientos, especialmente los de largo radio, y un uso mayoritario de medios no motorizados. Además de lograr un sistema de transporte público eficaz y espacialmente equitativo, que favorezca tanto o más la accesibilidad que la movilidad

de la población y que garantice la conexión entre los desplazamientos a escala intra e interurbana. También pretende crear un modelo urbano caracterizado por la densidad y mezcla de usos, que minimice la necesidad de desplazamientos de largo radio, y por el bajo impacto ambiental y social de las infraestructuras de transporte y servicios.

### 1.2.1 Mejor Ruta

Lo normal es intentar tomar siempre la mejor ruta, tanto si se desea encontrar una simple entre dos ubicaciones como una ruta que visite varias ubicaciones. Pero la "mejor ruta" puede significar cosas distintas en situaciones diferentes.

Las localizaciones pueden ser indicadas de la siguiente forma:

- Indicando interactivamente los diferentes puntos en la pantalla.
- Introduciendo su dirección (requiere geocodificación).
- Eligiendo puntos pertenecientes a una clase de entidad existente.

La mejor ruta entre más de dos puntos puede ser determinada siguiendo un orden fijo de paradas, especificando la primera y última parada, o bien dejando que el programa elija la secuencia de visita más adecuada (de menor coste).

La mejor ruta puede tener diferentes significados en distintas situaciones: puede ser la más rápida, la más corta, la más segura o la que posee mejores vistas, dependiendo de la impedancia utilizada. Por ejemplo, si la impedancia es el tiempo, la mejor ruta será aquella que se recorra en menos tiempo: cualquier atributo de coste puede ser utilizado como impedancia a la hora de determinar la mejor ruta.

Junto a la mejor ruta (Figura 1), el programa facilita las direcciones por las que atraviesa, y a cada giro o cambio de arco permite visualizar un mapa. El tipo de atributo acumulado no influye en la solución final, sino más bien es un elemento caracterizador de la ruta.

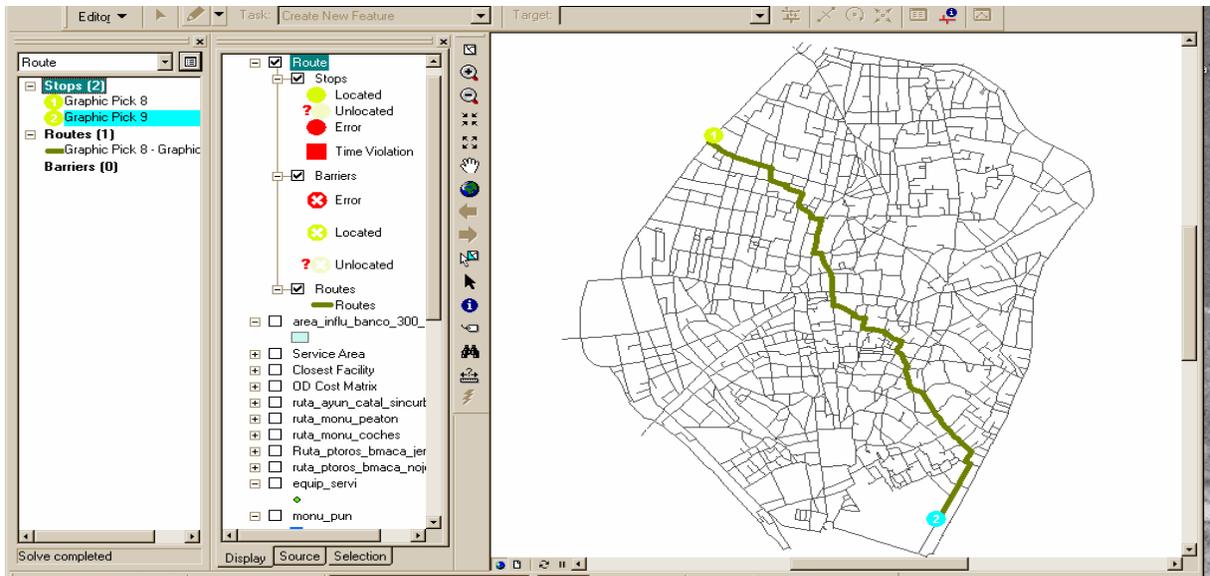


Figura 1. Mejor ruta

## 1.2.2 Facilidad más cercana

Encontrar el hospital más cercano a un accidente, los cuatro coches de policía más cercanos a un crimen, o las tiendas que están a menos de media hora de un consumidor, son todos ejemplos de localización de servicios o instalaciones, y se engloban dentro del tipo de análisis denominado facilidad más cercana (Figura 2).

Se denomina “Facilidades” a los hospitales, coches de policía, o a las tiendas, mientras que el accidente, la ubicación del consumidor o el crimen, son considerados “Incidentes”.

Este tipo de análisis trata de encontrar los elementos más cercanos a un punto dado, o en un radio determinado, teniendo en cuenta que:

- El punto donde se inicia la búsqueda es conocido como “Incidentes”, y puede haber más de uno.
- Lo que se busca se denomina “Facilidades”.
- Puede especificarse el número de “Facilidades” a encontrar, y utilizar diferentes “Incidentes”.
- También puede especificarse un coste máximo (en tiempo o distancia), más allá del cual no se prosigue el análisis.
- El programa muestra el coste de alcanzar cada objetivo, la ruta seguida hasta encontrarlo, y la lista de direcciones seguidas.

- Esta ruta puede ser recorrida desde o hacia el elemento en cuestión.

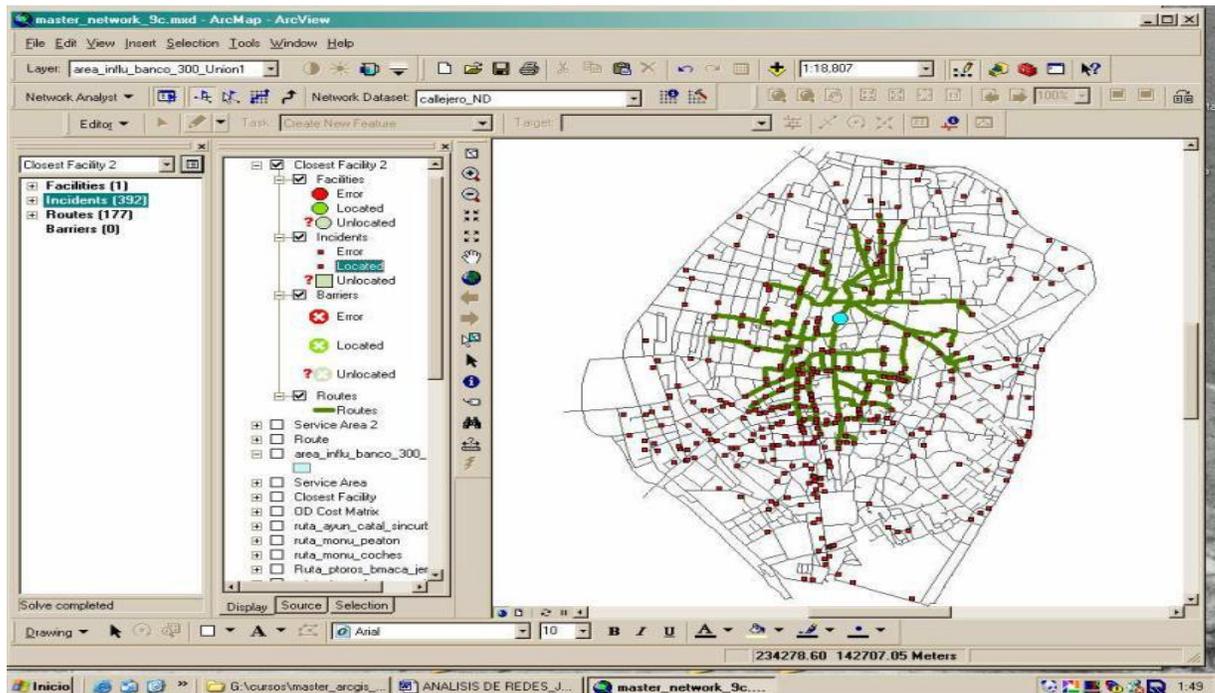


Figura 2. Facilidad más cercana

### 1.2.3 Área de Servicio

Área de servicio (Figura 3 **Error! Reference source not found.**) permite encontrar el área de servicio alrededor de una o varias localizaciones sobre la red. Estas localizaciones se denominan (quizás no muy adecuadamente) “Facilidades”.

La “Red de Área de Servicio” es un polígono (o región) que engloba todas las calles accesibles en función de una impedancia dada (por ejemplo, todas las que se encuentra a menos de 1 hora de un punto), en torno a una o varias “Facilidades”.

El programa da la posibilidad de generar múltiples áreas de servicio concéntricas, lo que permite comprobar como la accesibilidad cambia con un aumento en la impedancia; por ejemplo, conocer cuántos hospitales se encuentran a 5, 10 y 15 minutos de una escuela. También permite que la impedancia sea diferente para las distintas “Facilidades” empleadas (a 5 minutos de la Farmacia A, a 22 minutos de la Farmacia B...).

Una vez generado el polígono que representa el área de influencia puede comprobarse, por ejemplo, cuantos elementos de interés se encuentran en su interior empleando análisis de inclusión o intersección.

También en este caso es posible decidir el sentido del análisis desde el punto de búsqueda o hacia él.

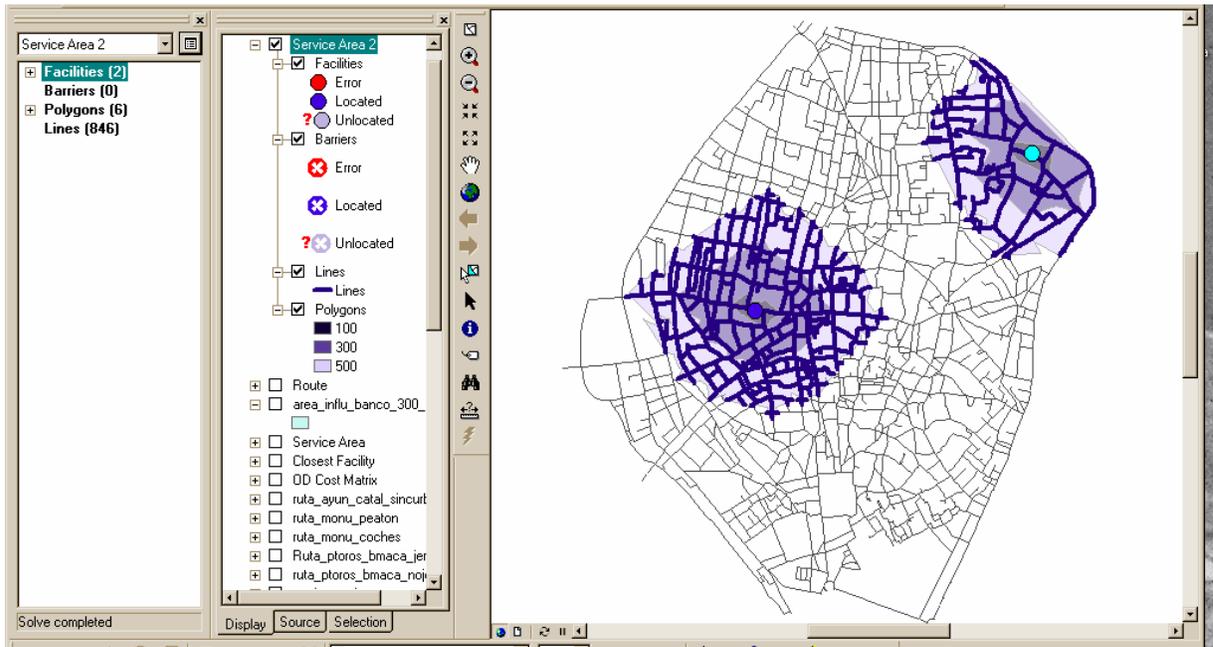
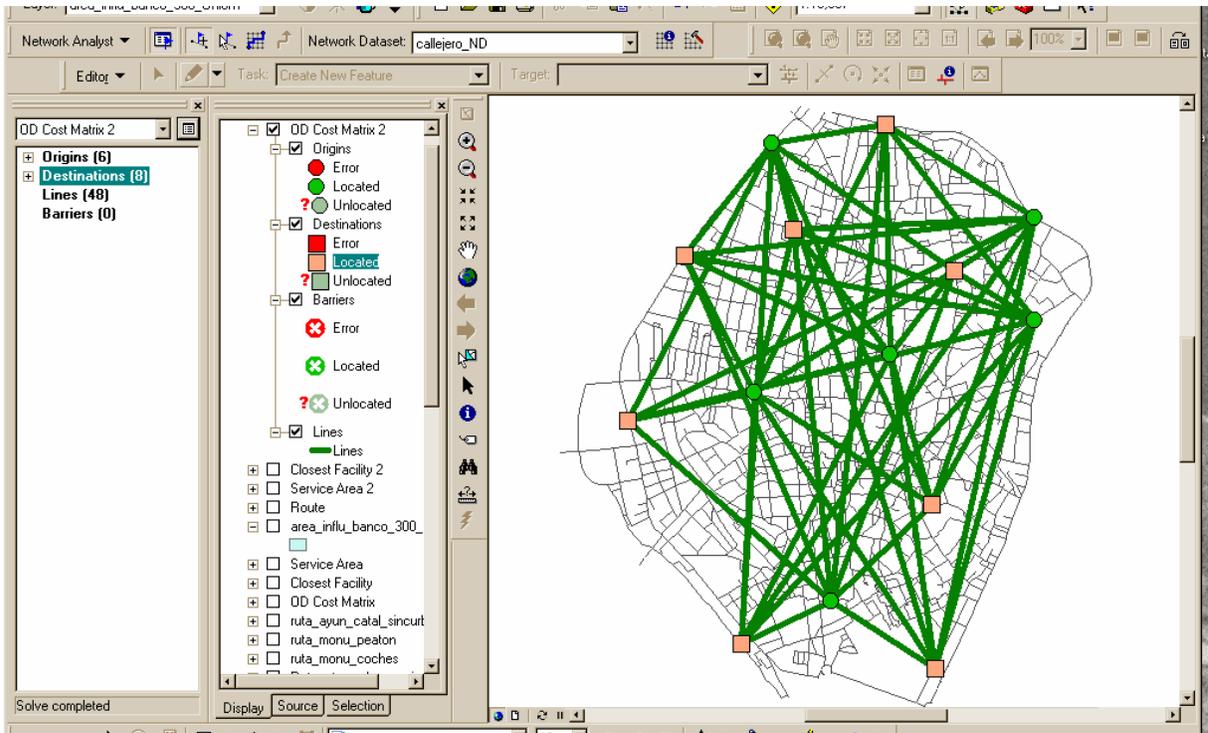


Figura 3. Área de Servicio

#### 1.2.4 Matriz de costo Origen-Destino

Las matrices Origen-Destino (Figura 4) son tablas que almacenan la impedancia total para ir de cada origen a cada destino. Además, cabe la posibilidad de ordenar los destinos que cada origen alcanza, en función de tiempo que tarde en llegarse a estos.

El recorrido seguido entre cada origen y destino es representado como líneas rectas en el mapa (en lugar de rutas). Mediante la utilización de diferentes colores o anchuras puede indicarse las líneas que corresponden a determinado destino u origen, o bien cuales de ellas se alcanzan en un tiempo determinado.



**Figura 4.** Matriz de costo Origen-Destino

### 1.2.5 Enrutamiento de vehículos

Enrutamiento de vehículos (Figura 5) afronta los problemas asociados a la utilización de varios vehículos al mismo tiempo para llegar desde el punto de partida a distintos destinos, y volver a un punto de llegada. El resultado final es una ruta asociada a cada uno de los vehículos empleados.

El número de parámetros de estos problemas es bastante más complejo que en los otros tipos de análisis; por cada vehículo debe indicarse una ruta y, por cada ruta:

- Capacidad de carga que soporta el vehículo (número o cantidad).
- Tiempo máximo de conducción (y/o) asociado a las 24 horas del día.
- Número máximo de lugares a visitar.
- Zona donde se desarrolla la ruta.
- Costo de la operación.
- Lugar de origen y destino.

Por cada lugar a visitar también debe indicarse el número o cantidad del material a recoger o depositar.

Dado que en un solo viaje puede que no se recojan o depositen todas las mercancías, por cada ruta puede indicarse donde se abastece cada vehículo, o donde deposita el material.

En general, la herramienta puede ser utilizada para generar recorridos que solucionen problemas asociados tanto a la recogida como al depósito, o bien a los relacionados con entidades emparejadas (domicilio donde un paciente espera que una ambulancia lo lleve a un hospital determinado).

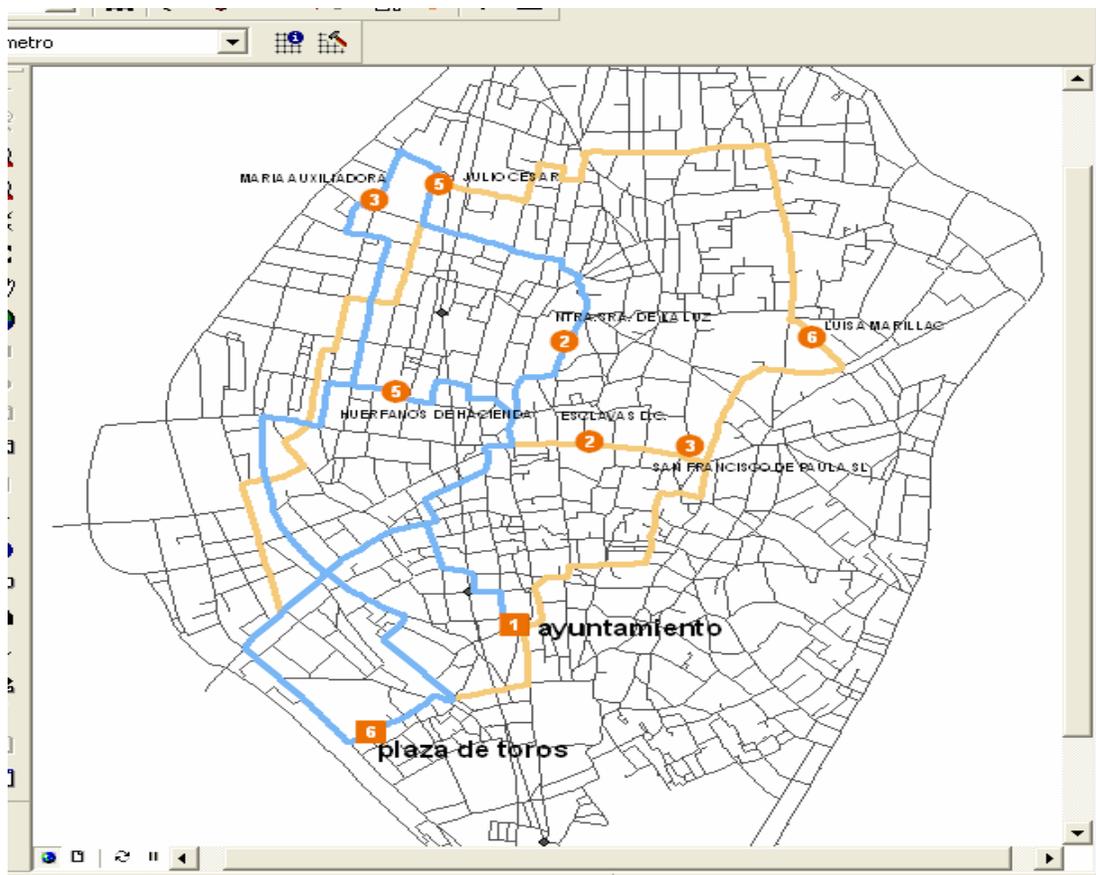


Figura 5. Enrutamiento del vehículo

### 1.2.6 Localización-Asignación

Los modelos de localización-asignación (Figura 6) son un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de donde situar centros de servicios (en sentido amplio) de manera que se optimicen ciertos valores considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dichos servicios (Bosque Sendra and Moreno Jiménez, 1990). Esto implica, por lo tanto, definir primero las magnitudes que son relevantes para el empleo de las instalaciones por la población y después formular una expresión matemática de dichas magnitudes, de tal manera que el modelo obtenga un óptimo de su valor, mínimo o máximo, dependiendo del tipo de servicio a localizar.

La mayoría de los modelos han sido diseñados para determinar las localizaciones óptimas de una o varias instalaciones deseables (usualmente idénticas), de tal manera que se obtenga su mejor distribución espacial a partir de minimizar los costos o tiempos totales de transporte (Bosque Sendra and Moreno Jiménez, 1990). Más recientemente se han abierto líneas de investigación dedicadas a determinar la óptima ubicación para aquellas instalaciones que, a pesar de su carácter imprescindible, son consideradas no-deseables ya que representan riesgos a la salud o, más en general, inciden en el deterioro de la calidad de vida de la población localizada en sus proximidades (Stevens, 1985).

La localización-asignación posibilita la realización de análisis relacionados con una doble vertiente: la localización óptima de servicios y la asignación de los puntos de demanda a esos servicios. Para esto se ofrecen tres tipos de soluciones relativamente sencillas: maximizar cobertura, maximizar asistencia y maximizar mercado compartido.

- **Maximizar cobertura:** elige los servicios que satisface la máxima demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios. Maximizar cobertura se utiliza con frecuencia para ubicar estaciones de bomberos y comisarías de policía, porque a menudo se exige a los servicios de emergencia que lleguen a todos los puntos de demanda dentro de una distancia de respuesta especificado.
- **Maximizar asistencia:** elige los servicios que satisface el máximo peso de demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios. El peso de la demanda se reduce con la distancia. Algunos negocios que podrían beneficiarse de este tipo de problema son las cafeterías, gimnasios, clínicas médicas y dentales, boleras y tiendas de electrónica. Las paradas del transporte público suelen elegirse con la ayuda de Maximizar

asistencia. Maximizar asistencia supone que cuando más lejos tengan que desplazarse las personas para llegar hasta el servicio, menos probable será que la utilicen.

- **Maximizar mercado compartido:** El objetivo es captar la máxima cuota del mercado posible con un número dado de los servicios que se especifique. La cuota de mercado total es la suma de todo el peso de demanda para los puntos de demanda válidos. Las grandes tiendas de descuento suelen utilizar Maximizar mercado compartido para buscar un conjunto finito de nuevas tiendas.

En esencia, y siempre a través de una red de transporte cuya impedancia puede estar basada principalmente en la distancia o el tiempo, permite a través de una serie de algoritmos, afrontar cuestiones muy variadas que relacionan la ubicación de una serie de servicios, con la localización de una serie de puntos de demanda, usualmente ponderados por la población.

Los objetivos concretos son:

- Minimizar impedancia.
- Maximizar cobertura.
- Minimizar servicios.
- Maximizar asistencia.
- Maximizar mercado compartido.
- Ubicar un servicio (entre competidores).

El problema que todas estas herramientas resuelven se basa en lo siguiente: “dadas  $N$  instalaciones candidatas y  $M$  puntos de demanda con un peso, elegir un subconjunto de instalaciones  $P$ , tal que se minimice la suma de las distancias desde cada  $M$  hasta el  $P$  más cercano”. Se trata de un problema combinatorio del tipo  $N$  elige  $P$ , y las combinaciones posibles crecen exponencialmente a medida que aumentan  $N$  y  $P$ . Por ejemplo, si  $N$  es igual a 100 y  $P$  igual a 10, las combinaciones son más de 17 billones. Por esta razón, para resolver este tipo de cuestiones se emplean heurísticas, que son métodos cuyo resultado no es fiable al 100%, pues no se calculan todas las posibilidades, pero sí que son los resultados más probables dado un tiempo de cálculo aceptable.

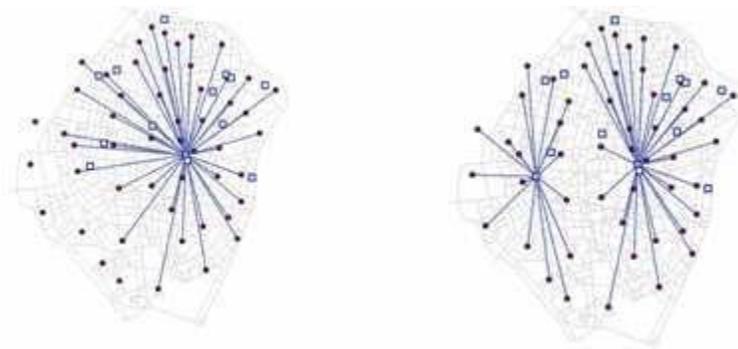
Hay que destacar que la impedancia se puede denominar de tres maneras distintas:

- Linear: directa.

- Power: los valores de distancia son elevados al valor del parámetro, de modo disminuye la importancia de los puntos de demanda más próximos.
- Exponential: los valores de distancia pasan a ser el valor de E elevado al valor de un parámetro, multiplicado por la impedancia. La consecuencia es que aumenta la importancia de los puntos de demanda más próximos.

Los elementos del análisis son dos:

- Facilidades: Servicios, que en determinados casos pueden ser ponderados.
- Puntos de Demanda: que usualmente poseen un valor (por ejemplo, número de habitantes).



**Figura 6.** Localización-Asignación

### 1.3 Sistemas de Información Geográfica

El término SIG procede del acrónimo de Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, Geographic Information System). Técnicamente se puede definir como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal). Es un sistema computarizado diseñado para permitir a los usuarios coleccionar, manejar y analizar grandes volúmenes de datos de atributo asociados y espacialmente referidos. El Sistema de Información Geográfica (SIG) se utiliza para resolver investigaciones complejas, para los problemas de manejo, y para la planeación (Gutierrez Puebla and Gould, 1997). Es una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la

necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Existen otras muchas definiciones de SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un SIG como un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional (Buzai and Baxendale, 2006).

Al leer algunas definiciones de los Sistemas de Información Geográfica se puede pensar que es algo muy complejo, en realidad resulta sencillo de comprender si se percibe como un programa de cómputo, un software con funciones específicas. En este sentido es igual que una hoja de cálculo o un procesador de textos, solo que para el caso de los SIG se tienen programas como Arcinfo, ArcView, Geomedia o Geographics, por citar solo a algunos.

Un SIG también se puede definir como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

La característica más valiosa de los Sistemas de Información Geográfica es su capacidad de análisis de datos espaciales. Esta capacidad ha convertido a los SIG en la única herramienta capaz de generar la información necesaria para apoyar con garantías la toma de decisiones relativas al territorio. Para el análisis de redes en SIG se trabaja con redes de líneas unidas entre sí, como pueden ser redes de carreteras, caminos o senderos, redes de distribución de agua o energía eléctrica, etc. Teniendo en cuenta otros factores como la topografía, se pueden realizar cálculos muy diversos que pueden tener en sí mismos, o como complemento a otros análisis (Eastman, 2007)

Algunos ejemplos son los siguientes:

- Análisis de las vías de comunicación de una población y su término municipal para evaluar el impacto económico que tendría su mejora sobre las actividades económicas que se desarrollan en la misma.
- Determinación del trazado de una nueva carretera o camino que minimice el tiempo necesario para realizar un trayecto, teniendo en cuenta consideraciones medioambientales y económicas.
- Localización de “cuellos de botella” en las redes de distribución de agua y energía eléctrica.
- Determinación de las rutas óptimas a seguir por los servicios públicos (transporte urbano e interurbano, sanitarios, bomberos, recogida de basuras, etc.) teniendo en cuenta las características de las vías de comunicación y la topografía.
- Determinación de zonas donde puedan existir molestias generadas por el ruido generado por el tráfico, o por algún otro tipo de actividad.

### 1.3.1 ArcGIS

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un compilador de información geográfica alfanumérica (Bases de Datos) y gráfica (Mapas). Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica. ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. ArcGIS Desktop se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades (y coste): ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

#### ArcView

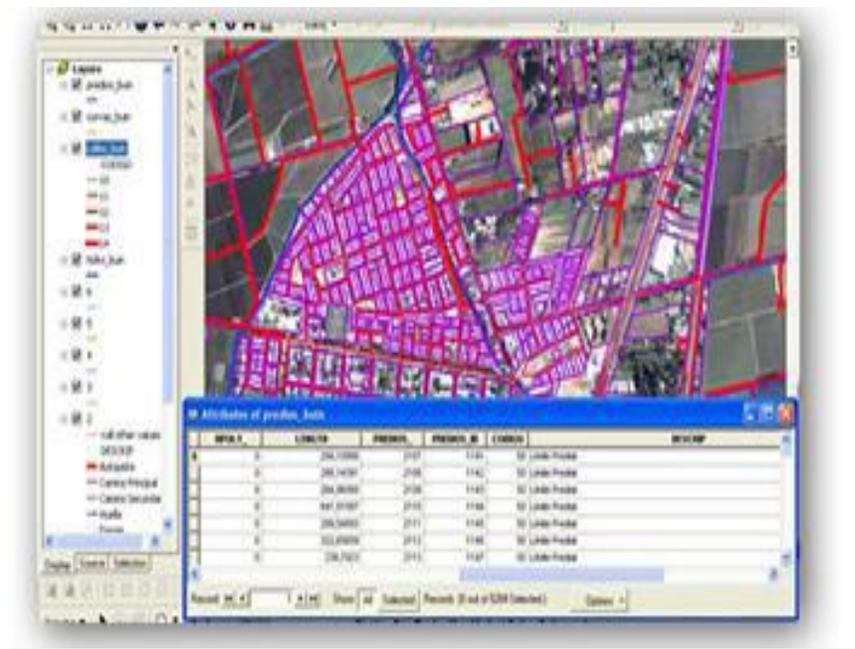
Es un software SIG para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, estos corresponden a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales; regiones y cualquier tipo de ubicaciones en terrenos determinados. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información planos y mapas, permitiéndonos explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y

tendencias que presenta nuestra información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos.

### Maniobrabilidad

ArcView (Figura 7) es el software desktop más usado de los GIS del mundo, porque entrega de una forma fácil el trabajo en datos geográficos. Tiene una interfaz gráfica amigable, en la cual se puede desplegar de manera rápida la información geográfica. El aprendizaje del software es rápido, teniendo algunos conocimientos de Sistemas de Información Geográfica previos.

Con ArcView se puede construir los mapas dinámicos e inteligentes que permiten a visualizar patrones, tendencias y singularidades en sus datos. ArcView incluye formas fáciles de levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permiten elaborar mapas de calidad rápidos y como el usuario desee. Los mapas terminados se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos o usos. ArcView también permite visualizar sus datos como cartas, informes, con volumen, con gráficos e imágenes; teniendo la posibilidad de editarlos expeditamente.



**Figura 7.** Visualización de datos con ArcView

## Análisis Espacial

ArcView permite que usted consulte sus datos, realice predicciones y examine relaciones entre estos. ArcView incluye las herramientas y los procedimientos que permiten analizar datos espaciales y que estos análisis puedan visualizarse fácilmente. ArcView tiene la gran capacidad de realizar geoprocursos lo que permite desarrollar ajustes dinámicos de la información, adaptándola a los requerimientos de análisis del usuario, con esto se tiene la capacidad de construir procesos analíticos y flujos de trabajo.

## Gestión de Datos

ArcView integra fácilmente todos los tipos de datos para la visualización y el análisis. El software contiene herramientas para una óptima gestión de datos geográficos, tabular, los metadatos, la creación y la organización de un proyecto SIG. Puede trabajar una variedad amplia de datos, tales como: demográficos, catastro, instalaciones, dibujos CAD, imágenes y multimedia. Puede importar directamente más de 70 formatos.

## ArcGis ArcEditor

Para la edición y gestión avanzada de información. ArcEditor (Figura 8) es parte de la familia ArcGIS, con esta modalidad se puede editar, manipular y gestionar datos de naturaleza geográfica. Tiene toda la funcionalidad de Arcview agregando más herramientas que puedan crear, editar y asegurar el proceso de explotación de datos con una calidad a toda prueba.

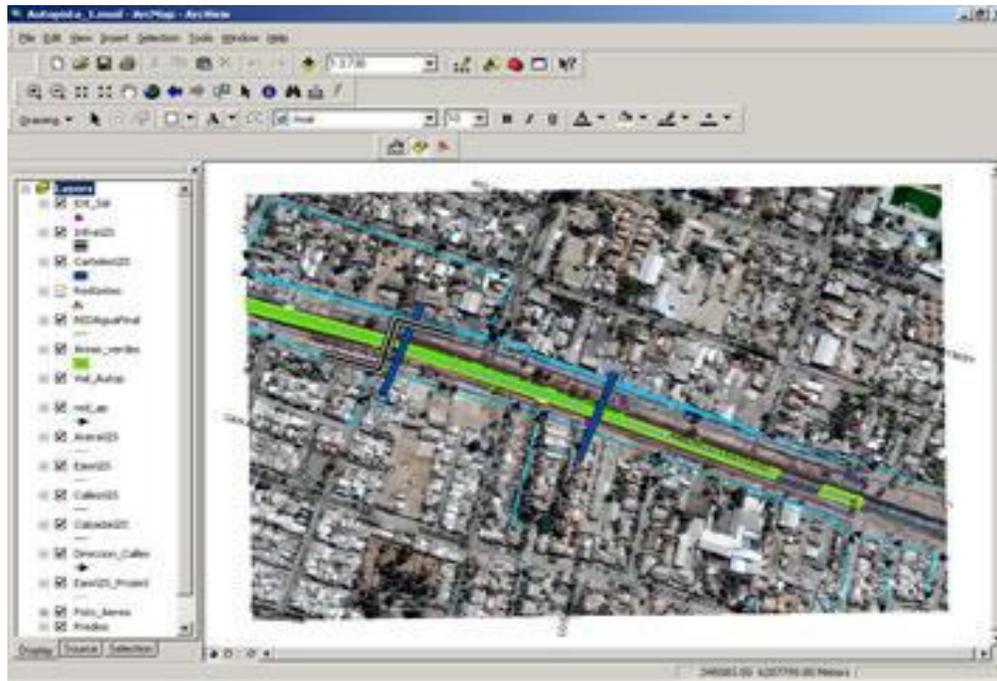
ArcEditor está hecho para soportar la edición desde múltiples editores como de un sólo editor de datos geográficos. Tiene amplio y variado conjunto de herramientas para trabajar la gráfica y la data alfanumérica.

Dentro de sus funcionalidades se encuentra:

- Automatizar el control de calidad.
- Diseñar mejor bases de datos geográficas.
- Modelar flujos de trabajo multiusuario.
- Generar y editar entidades gráficas geográficas mediante edición visual.
- Crear y editar elementos de topología.
- Diseñar planes de edición, validación y guardar la información tratada.
- Administrar y explorar redes geométricas.
- Mejorar el rendimiento de la edición.

- Desconectar de la base de datos y realizar edición en trabajos de campo.

ArcEditor se utiliza para trabajar con información compleja. El amplio número de herramientas y los diferentes procesos de trabajo con que cuenta permiten generar y mantener la información geográfica de manera sencilla y eficiente.



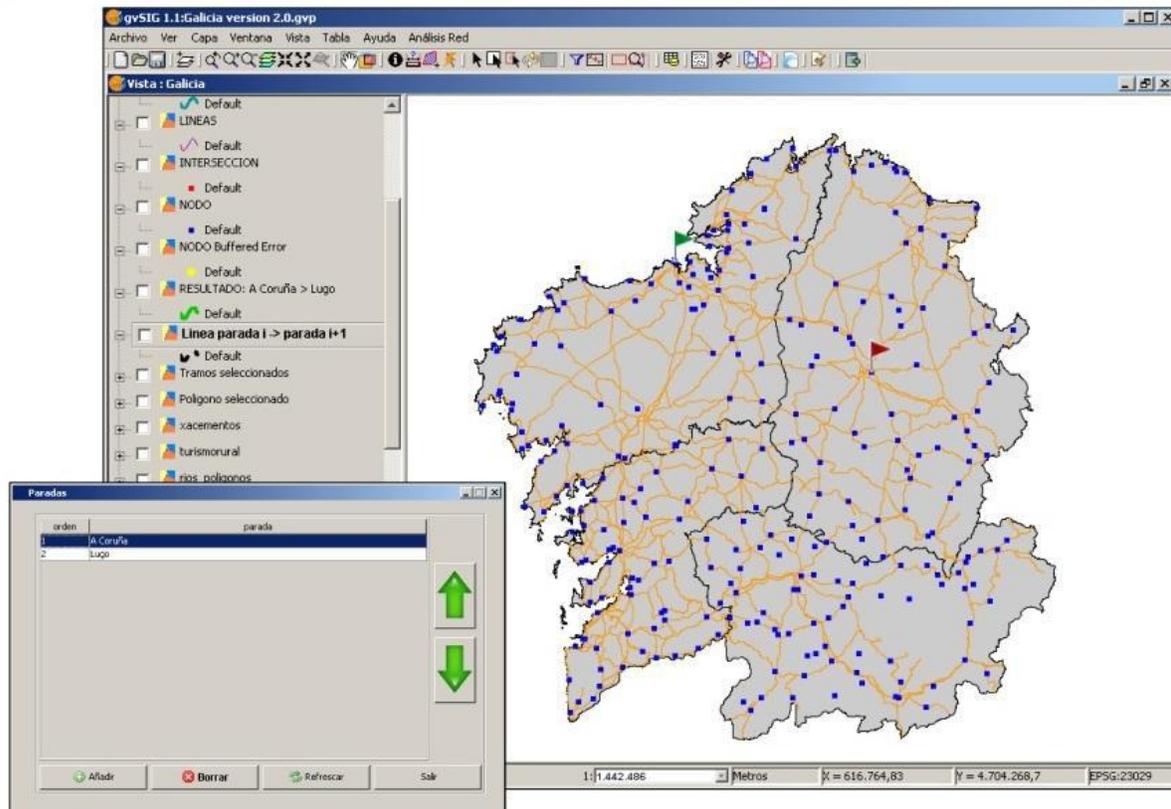
**Figura 8.** Visualización con Arc-Editor

### 1.3.2 GvSIG

GvSIG (Generalitat Valenciana SIG) surge como un proyecto amparado por la Generalitat Valenciana de España que a finales de 2003 promocionó un concurso para el desarrollo de un SIG con una serie de características propias como: multiplataforma, de código abierto, modular, interoperable con formatos de otros programas (Autocad, Microstation, Arcview), y sujeto a estándares de la OGC (Open Geospatial Consortium)(Anguix and Carrión, 2005). El resultado ha sido una aplicación que ya tiene disponibles varias versiones al público y gran parte de las funcionalidades propias de los SIG cubiertas, aunque se desarrolla constantemente. Las funciones básicas que cualquier usuario desearía como diseño de impresión o

soporte de formatos de imagen típicos están incorporadas sin necesidad de ningún módulo adicional.

GvSIG posee una jerarquía de clases bien estructurada para la incorporación de nuevas funcionalidades. Permite la lectura de varios formatos de datos geográficos y no geográficos en forma de tablas así como la conexión con varias bases de datos. En la (Figura 9) se muestra la interfaz visual de gvSIG.



**Figura 9.** Interfaz Visual de gvSIG

Este SIG posee las aplicaciones traducidas a 20 idiomas; toda la documentación está disponible en 5 idiomas, incluyendo español e inglés, por lo que se ha convertido en un SIG muy popular en el mundo hispano (Anguix, 2009). Se ha reportado su utilización en varios países europeos como Francia, Italia, Suiza, Austria, Reino Unido y Alemania, donde se encuentra la mayor comunidad de usuarios de gvSIG no hispano hablantes. Varias instituciones y universidades prestigiosas han utilizado esta aplicación, tal es el caso de la Agencia Espacial Europea y Oxford Archeology. Varios países africanos han realizado trabajos con gvSIG pero su mayor uso se ha reportado en Iberoamérica.

La simplicidad para la incorporación de nuevas funcionalidades, la disponibilidad de toda su documentación, el soporte técnico suministrado por la lista de distribución de sus desarrolladores y el apoyo institucional del proyecto hace que se considere el SIG más adecuado para la incorporación de un módulo para el análisis de redes.

#### 1.4 Metaheurísticas

El auge que experimentan los procedimientos heurísticos se debe sin duda a la necesidad de disponer de herramientas que permitan ofrecer soluciones rápidas a problemas reales. Es importante destacar el hecho de que los algoritmos heurísticos, por sí solos, no garantiza la optimalidad de la solución encontrada, aunque su propósito es encontrar una solución cercana al óptimo en un tiempo razonable. Sin embargo, la gran cantidad de publicaciones donde problemas de gran dificultad son resueltos con gran rapidez, en muchos casos óptimamente, avalan estos métodos.

Dentro de las técnicas heurísticas podemos encontrar diversos métodos, tales como: Métodos constructivos, de descomposición, de reducción, de manipulación del modelo y de búsqueda local. Tradicionalmente para resolver un problema dado se diseñaba un algoritmo específico que pertenecía a algunos de los métodos enumerados. Hoy día, el interés primordial de los investigadores del área es el de diseñar métodos generales que sirvan para resolver clases o categorías de problemas. Dado que estos métodos generales sirven para construir o guiar el diseño de métodos que resuelvan problemas específicos se les ha dado el nombre de Metaheurísticas. Los profesores (Osman and Kelly, 1996) introducen la siguiente definición:

“Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que las heurísticas clásicas no son ni efectivos ni eficientes. Las Metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de: inteligencia artificial, evolución biológica y mecanismos estadísticos...”

Los procedimientos Metaheurísticos más utilizados y reconocidos en Optimización Combinatoria: Recocido Simulado (simulated annealing), Algoritmos Genéticos, Búsqueda Tabú, Algoritmos con Hormigas (Ant System), GRASP.

### 1.4.1 Recocido Simulado

Considerando los problemas de optimización combinatoria como problemas que buscan el óptimo global, se pueden incluir procedimientos de búsqueda estocástica como alternativas heurísticas.

El recocido simulado traducción del término inglés *simulated annealing*, se basa en determinados principios de termodinámica.

El problema que tiene este esquema es que depende fuertemente de la solución inicial elegida. Por tanto una solución puede quedar atrapada en un mínimo local y no llegar nunca al mínimo global. Introduce una variable de control  $T$ , (denominada temperatura), que permite, con una cierta probabilidad, empeorar la función objetivo para así salir de una hondonada donde ha podido quedar atrapado un mínimo local. Esta probabilidad se denomina función de aceptación.

La estrategia del recocido simulado es comenzar con una temperatura inicial alta, lo cual proporciona una probabilidad también alta de no mejora. En cada iteración se va reduciendo la temperatura y por tanto las probabilidades son cada vez más pequeñas conforme avanza el procedimiento y nos acercamos a la solución óptima. De este modo, inicialmente se realiza una diversificación de la búsqueda sin controlar demasiado el coste de las soluciones visitadas. En iteraciones posteriores resulta cada vez más difícil aceptar malos movimientos, y por tanto se produce un descenso en el coste. A igualdad de incremento, la probabilidad de aceptarlo es mayor para valores de  $T$  altos; en el caso límite  $T = \infty$  se acepta cualquier empeoramiento del coste; en el valor límite  $T = 0$  no acepta ningún incremento de la función objetivo y se tendría el esquema normal de minimización local.

La probabilidad se introduce a partir de números aleatorios  $\mu$  siguiendo la distribución  $U(0, 1)$ . El esquema básico del temple simulado sería el que resulta de incluir esta modificación, (variando el parámetro  $T$  desde un valor positivo hasta el valor nulo), en el algoritmo anterior.

#### Analogía física del recocido simulado

El nombre se justifica por el templado o enfriado controlado con el que se producen determinadas sustancias; es el caso, por ejemplo, del proceso de cristalización del vidrio. Inicialmente, a temperaturas muy elevadas, se produce una amalgama líquida. En este líquido las partículas se configuran aleatoriamente. El estado sólido se

caracteriza por tener una configuración de mínima energía y es una configuración concreta, (el mínimo global). Para alcanzar esta configuración, es preciso templar la amalgama lentamente, puesto que un enfriamiento súbito obstaculizaría el proceso y se llegaría a una configuración distinta a la esperada, (un mínimo local distinto del mínimo global).

### Implementación del método

Dado un problema de optimización, es preciso adaptarlo al esquema descrito anteriormente, lo que se consigue concretando los siguientes aspectos:

- Adaptación del problema:
  - Conjunto S de configuraciones o soluciones factibles del problema.
  - Función de coste C.
  - Vecindad de cada configuración.
  - Configuración inicial.
- Estrategia de templado:
  - Temperatura inicial.
  - Disminución de la temperatura en cada iteración, (por ejemplo  $T = \alpha T$  ( $0 < \alpha < 1$ )).
  - Número de iteraciones de cada temperatura N (T).
  - Criterio de parada.

### **1.4.2 Algoritmos Genéticos**

Los Algoritmos Genéticos (AG) son esquemas de representación que aplican una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Charles Darwin. Están basados en los procedimientos naturales de selección, en los que los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a las características del entorno en el cual se encuentran. Biológicamente, este proceso se controla por medio de los genes de un individuo, en los cuales se encuentra la codificación de cada uno de los atributos o características de un ser vivo y que pueden ser transferidos a sus descendientes cuando se reproducen.

En los procesos naturales, la evolución puede ocurrir cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Un individuo es capaz de reproducirse.
- Existe una población completa de estos individuos.

- Hay gran variedad o diferencias entre los individuos que se reproducen.
- Dentro de la variedad hay algunas diferencias en la habilidad para sobrevivir, es decir, existen individuos con mayor habilidad para adaptarse.

La combinación de los genes de un individuo forman los cromosomas, que en conjunto proyectan las cualidades de cada ser vivo. Esta estructura biológica refleja indirectamente el grado de supervivencia, de adaptación y el nivel de reproducción; así, los individuos que más se adaptan a su medio ambiente son los que más sobreviven a las adversidades y más se reproducen, transmitiendo esas cualidades a las siguientes generaciones originando seres cada vez con mayor capacidad y facilidad de adaptarse a su entorno.

El investigador John Holland es considerado el pionero de la aplicación de los principios de la selección natural en el diseño de sistemas artificiales para la solución de problemas. Publicó un libro en 1975 titulado "Adaptation in Natural and Artificial Systems" en el que representa la aplicación de los procesos evolutivos de la naturaleza a sistemas artificiales, en los que simula el proceso de evolución estudiado por Darwin, en modelos computacionales capaces de resolver problemas. Una definición formal de un AG es la propuesta por John Koza:

"Es un algoritmo altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto a través de un conjunto de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas y se les asocia con cierta función matemática que refleja su aptitud" (Koza, 1992).

### Características de los AG

Los AG son procedimientos adaptativos para la búsqueda de soluciones en espacios complejos inspirados en la evolución biológica, con patrones de operaciones basados en el principio Darwiniano de reproducción y supervivencia de los individuos que mejor se adaptan al entorno en el que viven.

La aplicación más común de los AG ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables. Sin embargo, no todos los problemas pueden ser resueltos por un AG, por lo que se recomienda analizar las siguientes características del problema:

- Su espacio de búsqueda debe ser finito, es decir, sus posibles soluciones deben estar limitadas dentro de un cierto rango.
- Debe poderse definir una función de aptitud que indique que tan buena o mala es una respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en una computadora.

Es recomendable utilizar un AG en la solución de problemas con espacios de búsquedas discretos, aunque sean muy grandes; sin embargo también pueden aplicarse para espacios de búsqueda continuos, de preferencia cuando exista un rango de soluciones relativamente pequeño. La función de aptitud es aquella que permite evaluar las diferentes respuestas y determina el objetivo del problema de optimización. Aunque los AG únicamente maximizan, la minimización puede implementarse aplicando el recíproco de la maximización. La particularidad que presenta la función de aptitud es que debe "castigar" a las malas soluciones y de "premiar" a las buenas, de forma que sean estas últimas las que se propaguen con mayor rapidez.

La codificación más común es por medio de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. Esta forma de codificación originalmente fue propuesta por John Holland y actualmente es muy popular debido a que resulta muy sencilla de implementar.

### Diferencias entre los AG y los métodos tradicionales de búsqueda

Los AG difieren en algunos aspectos respecto a los métodos tradicionales (Goldberg, 1989)

- Los AG trabajan con la codificación del conjunto de parámetros, no con los parámetros en sí.
- Los AG buscan en una población de puntos, no un punto en particular, es decir, evalúan un grupo de soluciones buscando el óptimo en lugar de un punto a la vez.
- Los AG evalúan las posibles soluciones (función de aptitud), sin aplicar ningún proceso de inferencia.
- Los AG usan reglas de transiciones probabilísticas en lugar de reglas determinísticas.

## Esquemas de representación

Los AG requieren un conjunto de parámetros para que el problema de optimización sea codificado con una cadena de longitud finita por medio de un conjunto de caracteres. En forma análoga a la codificación genética de los seres vivos, cuyas características físicas están almacenadas en los genes y que en conjunto forman los cromosomas, los AG codifican las características de los problemas para cada elemento de la población, formando cadenas finitas de símbolos. Esto es, que las variables que representan los parámetros del problema pueden ser representadas a través de cadenas de bits, codificando sus valores en forma discreta, o sea, que lo primero que se tiene que hacer para aplicar un AG para encontrar la solución a un problema es codificarlo con cromosomas artificiales tradicionalmente formados de 1's y 0's, aunque también pueden ser números reales o letras, de tal manera que la maquinaria genética manipule las representaciones finitas de las soluciones y no las soluciones en sí.

## Operadores

La mecánica de los AG es muy simple, ya que solamente involucra copiar cadenas de caracteres e intercambiar subcadenas aplicando algunos operadores.

Los operadores básicos utilizados en un AG son los siguientes:

- Selección.
- Cruzamiento.
- Mutación.

La selección es un proceso en el cual cada cadena individual es copiada de acuerdo a los valores de su función de aptitud  $f$ . Intuitivamente se puede pensar que la función  $f$  es una medida de rendimiento, utilidad o bienestar que se desea maximizar. Copiar cadenas de acuerdo a esa función significa que aquellas cadenas con un valor más alto, van a tener una probabilidad más alta de contribuir o aportar a la siguiente generación.

Este operador es una versión artificial de la selección natural según la Teoría de Darwin de la supervivencia de los individuos más capaces, aptos y superiores sobre los demás.

El cruzamiento es un operador que básicamente consiste en intercambiar subcadenas de una población por medio de un punto de corte y se puede aplicar a un par de cadenas de dos formas:

- Seleccionar un punto de cruce fijo en cada una de las cadenas.
- Seleccionar dos números enteros  $k$  entre uno y la longitud de la cadena menos uno  $[1, \text{long} - 1]$  en forma aleatoria que determinen los puntos de cruce.

Normalmente el cruzamiento se maneja dentro de la implementación del AG como un porcentaje que indica con qué frecuencia se efectuará. Esto significa que no todas las parejas de cromosomas se cruzarán, sino que habrá algunas que pasarán intactas a la siguiente generación. De hecho existe una estrategia en la que el individuo más apto a lo largo de las distintas generaciones no se cruza con nadie y se mantiene intacto hasta que surge otro individuo mejor que él, que lo desplazará.

También se pueden aplicar dos puntos de cruce entre dos individuos. En este caso se mantienen los genes de los extremos y se intercambian los del centro.

Además de la selección y el cruce, existe otro operador llamado mutación, el cual realiza un cambio a uno de los genes de un cromosoma elegido aleatoriamente. Cuando se usa una representación binaria, un bit se sustituye por su complemento (un cero se cambia por un uno y viceversa). Este operador permite la introducción de nuevo material cromosómico en la población, tal y como sucede con sus equivalentes biológicos.

Al igual que el cruce, la mutación se maneja como una probabilidad que indica con qué frecuencia se efectuará, aunque a diferencia del cruzamiento, esta ocurre más esporádicamente (la probabilidad de cruce normalmente se encuentra de 0,6 a 0,95 mientras que el de mutación normalmente oscila entre 0,001 y 0,01) (Fogel, 1995)

La mutación es necesaria debido a que, aunque la selección y el cruce son operadores efectivos de búsqueda en un AG, ocasionalmente dejan de analizar material genético útil. El operador de mutación protege al AG de pérdidas prematuras de oportunidades de análisis de secciones del espacio de estados cuando se utiliza conjuntamente con los otros operadores genéticos. Sin embargo, debido a que la probabilidad de aplicarse es muy baja, es considerado un operador secundario (Goldberg, 1989)

### 1.4.3 Búsquedas Tabú

Los orígenes de Búsqueda Tabú pueden situarse en diversos trabajos publicados hace alrededor de 20 años. Oficialmente, el nombre y la metodología fueron introducidos posteriormente por Fred Glover. Numerosas aplicaciones han aparecido

en la literatura, así como artículos y libros para difundir el conocimiento teórico del procedimiento, ver (Glover and Laguna, 1997) Búsqueda Tabú es una técnica para resolver problemas combinatorios de gran dificultad que está basada en principios generales de Inteligencia Artificial. En esencia es un metaheurístico que puede ser utilizado para guiar cualquier procedimiento de búsqueda local en la búsqueda agresiva del óptimo local. Por agresiva nos referimos a la estrategia de evitar que la búsqueda quede atrapada en un óptimo local que no sea global. A tal efecto, la búsqueda tabú toma de la inteligencia artificial el concepto de memoria y lo implementa mediante estructuras simples con el objetivo de dirigir la búsqueda teniendo en cuenta la historia de ésta. Es decir, el procedimiento trata de extraer información de lo sucedido y actuar en consecuencia. En este sentido puede decirse que hay un cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente.

#### 1.4.4 Algoritmos con Hormigas (Ant System)

Según Mendoza (Mendoza García, 2001) Ant System es el primer algoritmo desarrollado en el área ACO: Ant Colony Optimizacion. En ésta se estudian sistemas artificiales que simulan colonias de hormigas reales, de donde toman su inspiración. Estos sistemas son utilizados para resolver problemas de optimización combinatoria, los cuales pueden ser descritos como problemas cuyo objetivo es encontrar la secuencia óptima de sus elementos componentes, como por ejemplo el problema TSP. El algoritmo Ant System, desarrollado por Marco Dorigo, ver (Dorigo et al., 1996) y (Dorigo, 1992), es utilizado para resolver este tipo de problemas.

#### Inspiración biológica

Las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto desde el hormiguero a una fuente de comida y viceversa sin usar pistas visuales. Asimismo, son capaces de adaptarse a cambios en el ambiente. Por ejemplo, que un obstáculo sea colocado en la ruta que están utilizando como la más corta. El medio por el que las hormigas logran esto es por rastreo de la feromona que ellas mismas depositan mientras caminan.

Todas las hormigas depositan una cierta cantidad de una sustancia llamada feromona mientras caminan y a su vez, cada hormiga prefiere caminar en una dirección rica en feromona. Esta simple conducta de las hormigas explica porque son capaces de ajustarse a cambios en el ambiente. Cuando un obstáculo inesperado es colocado en el camino que las hormigas están utilizando, las hormigas que están justo enfrente del obstáculo no pueden continuar siguiendo el rastro de feromona y por tanto, deben elegir sobre irse hacia la izquierda o hacia la derecha.

La elección es aleatoria, es decir, cada hormiga decide al azar hacia donde irse, pero se espera que aproximadamente la mitad de las hormigas intente evadir el obstáculo por un lado y la otra mitad lo haga por el otro. De esta forma, las hormigas que eligieron, (aleatoriamente), el camino corto, crearán en un cierto tiempo un depósito de feromona más fuerte que el de las hormigas que eligieron el camino largo. De tal forma, pasarán más hormigas por el camino corto, (debido a que llegan al otro lado más rápido que las otras), quedando depositada, por lo tanto, más feromona en esa ruta, lo que origina que las hormigas que vienen atrás, prefieran caminar por ella, restableciéndose así, el camino más corto.

Resulta obvio que encontrar la ruta más corta es una conducta que parece ser emergente de la interacción entre el obstáculo y la conducta distribuida de las hormigas, incluso cuando todas las hormigas caminan aproximadamente a la misma velocidad y depositan también, aproximadamente, la misma cantidad de feromona.

### El algoritmo

La conducta de las colonias de hormigas es imitada por el algoritmo usando agentes sencillos, llamados hormigas (ants), que se comunican indirectamente por medio de un mecanismo inspirado en el rastro de feromona. Los rastros de feromona artificial, son un tipo de información numérica distribuida que es modificada por las hormigas y refleja su experiencia en la solución de un problema en particular.

Hay tres ideas que el algoritmo de la colonia de hormigas ha adoptado de las colonias reales de hormigas:

- Se utiliza comunicación indirecta a través de la feromona.
- Las rutas más cortas tienden a tener una razón más alta de crecimiento del valor de la feromona.
- Las hormigas tienen preferencia probabilística por las rutas con valores altos de feromona.

Además de estas características, se les ha dado a los agentes, (hormigas), capacidades que no tienen las hormigas reales, pero que ayudan a resolver los problemas. Por ejemplo:

- Cada hormiga es capaz de determinar lo lejos que está de un estado.
- Poseen información acerca de su ambiente y la utilizan al tomar decisiones. Así, su comportamiento no sólo es adaptativo sino también “voraz”.

- Tienen memoria, la cual es necesaria para asegurar que se generen sólo soluciones factibles, (por ejemplo, en el TSP, necesitan saber las ciudades que han visitado pues una ciudad no se puede visitar más de una vez).

### 1.4.5 GRASP

Los métodos GRASP fueron desarrollados al final de la década de los 80 con el objetivo inicial de resolver problemas de cubrimientos de conjuntos, (Feo and Resende, 1989) El término GRASP fue introducido como una nueva técnica metaheurística de propósito general (Feo and Resende, 1995) GRASP es un procedimiento iterativo en donde cada paso consiste en una fase de construcción y una de mejora. En la fase de construcción se aplica un procedimiento heurístico constructivo para obtener una buena solución inicial. Esta solución se mejora en la segunda fase mediante un algoritmo de búsqueda local. La mejor de todas las soluciones examinadas se guarda como resultado final.

La palabra GRASP proviene de las siglas de Greedy Randomized Adaptive Search Procedures que en español puede traducir como: Procedimientos de Búsqueda basados en funciones Voraces Aleatorizadas Adaptativas.

En la fase de construcción se construye iterativamente una solución posible, considerando un elemento en cada paso. En cada iteración la elección del próximo elemento para ser añadido a la solución parcial viene determinada por una función greedy. Esta función mide el beneficio de añadir cada uno de los elementos según la función objetivo y elegir la mejor. Notar que esta medida es miope en el sentido que no tiene en cuenta qué ocurrirá en iteraciones sucesivas al realizar una elección, sino únicamente en esta iteración. Se dice que el heurístico greedy se adapta porque en cada iteración se actualizan los beneficios obtenidos al añadir el elemento seleccionado a la solución parcial. Es decir, la evaluación que se tenga de añadir un determinado elemento a la solución en la iteración  $j$  no coincidirá necesariamente con la que se tenga en la iteración  $j + 1$ .

El heurístico es aleatorizado porque no selecciona el mejor candidato según la función greedy adaptada sino que, con el objeto de diversificar y no repetir soluciones en dos construcciones diferentes, se construye una lista con los mejores candidatos de entre los que se toma uno al azar.

Al igual que ocurre en muchos métodos deterministas las soluciones generadas por la fase de construcción de GRASP no suelen ser óptimos locales. Dado que la fase inicial no garantiza la optimalidad local respecto a la estructura de entorno en la que

se esté trabajando, (notar que hay selecciones aleatorias), se aplica un procedimiento de búsqueda local como postprocesamiento para mejorar la solución obtenida.

En la fase de mejora se suele emplear un procedimiento de intercambio simple con el objeto de no emplear mucho tiempo en esta mejora. Notar que GRASP se basa en realizar múltiples iteraciones y quedarse con la mejor, por lo que no es especialmente beneficioso para el método el detenerse demasiado en mejorar una solución dada.

### Implementación del método

El siguiente esquema muestra el funcionamiento global del algoritmo distinguiendo cada una de sus fases, que se deben repetir hasta verificar una determinada condición de parada.

- Fase Constructiva:
  - Seleccionar una lista de elementos candidatos.
  - Considerar una lista restringida de los mejores candidatos.
  - Seleccionar un elemento aleatoriamente de la lista restringida.
  
- Fase de Mejora:
  - Búsqueda local a partir de la solución construida hasta que no se pueda mejorar más.
  
- Fase de Actualización:
  - Si la solución obtenida mejora a la mejor almacenada, actualizarla.

Al realizar muchas iteraciones, GRASP es una forma de realizar un muestreo del espacio de soluciones. Las implementaciones GRASP generalmente son robustas en el sentido de que es difícil el encontrar ejemplos patológicos en los cuales el método funcione arbitrariamente mal.

Algunas de las sugerencias de los autores para mejorar el procedimiento son: Se puede incluir una fase previa a la construcción: una fase determinista con el objetivo de ahorrar esfuerzo a la fase siguiente. Si se conoce que ciertas subestructuras forman parte de una solución óptima, estas pueden ser el punto de partida de la fase constructiva.

## Conclusiones parciales

En este capítulo se presentaron los principales elementos teóricos de las redes, profundizando en las operaciones sobre redes de transporte, ya que la herramienta que se pretende implementar opera sobre este tipo de redes. Además se analizaron características generales de los SIG y sus aplicaciones en el mundo actual, se profundizó en gvSIG y ArcGIS que fueron seleccionados para el desarrollo de los nuevos algoritmos y para la comprobar los resultados respectivamente. También se mostraron conceptos y características de las metaheurísticas, adentrándose más en las que se utilizan para resolver problemas de optimización combinatoria.

Se concluye que las operaciones sobre redes constituyen valiosas herramientas para el análisis y estudio de datos de importancia geográfica, en particular de la operación de localización-asignación se escogieron algunas variantes para ser implementadas en un módulo de análisis de redes de transporte de gvSIG. De las metaheurísticas estudiadas algoritmos genéticos fue considerada la más adecuada para resolver este tipo de problemas.

En el siguiente capítulo se presentan los aspectos de diseño e implementación relacionados con la integración de nuevos algoritmos de la operación localización-asignación al módulo de análisis de redes de gvSIG

## CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA EXTENSIÓN

En el presente capítulo se abordan los principales aspectos que se tuvieron en cuenta para realizar la implementación del proyecto. Se escoge el algoritmo a utilizar y se muestran las razones de la elección. También se brindan los elementos que se utilizaron en el diseño de la extensión. Además se describen las clases que se implementaron, su función y relación con las demás clases del módulo de redes. Por otra parte se argumenta cómo se añadió la operación localización-asignación a gvSIG.

### 2.1 Selección del tipo de algoritmo a utilizar en la extensión

Para la solución del problema de localización-asignación se seleccionaron algoritmos genéticos, porque estos poseen tres operadores: selección, cruce y mutación, los cuales son sencillos de entender e implementar en aplicaciones, pues sólo involucran generación aleatoria de números, copiar cadenas de símbolos e intercambio parcial de cadenas.

También porque el AG trabaja con poblaciones de nodos, mientras que otras técnicas lo hacen con un sólo nodo a la vez, esto origina que manteniendo un conjunto de nodos bien adaptados, se reduce la probabilidad de encontrar una solución falsa como un óptimo local. Las reglas de transición de un AG son estocásticas, es decir, usa elecciones aleatorias para guiar el proceso de búsqueda. Además los espacios de búsquedas para el problema localización-asignación, aunque pueden ser muy grandes, son discretos; para lo cual es recomendable utilizar un AG, pues estos gozan de cierto prestigio cuando se trata de este tipo de espacio de búsqueda. No necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver. Cuando se usan para problemas de optimización maximizar una función objetivo, resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales. Resulta sumamente fácil ejecutarlos en las modernas arquitecturas masivamente paralelas. Usan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las otras técnicas.

El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades.

Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria.

### **2.1.1 Descripción de la biblioteca utilizada para resolver el algoritmo seleccionado**

Para la solución de los algoritmos genéticos se utilizó la biblioteca JGAP hecha en java, JGAP son las siglas de Java Genetic Algorithms Package (paquete de algoritmos genéticos para Java). Es un componente de programación de algoritmos genéticos que se utiliza como un framework. Tiene clases e interfaces para representar: genes (Gene), cromosomas (Chromosome), individuos (IChromosome), la población (Genotype), la función de ajuste (Fitness Function), operadores genéticos.

Se trata de una solución genérica, sin relación alguna con un problema particular. Por esa razón se deben crear nuevas clases que heredan o implementan las clases e interfaces mencionadas. Así se adapta JGAP al problema específico que se quiere solucionar.

#### **Motor genético**

El “motor genético” crea varias soluciones (individuos) aleatoriamente con el método `randomInitialGenotype()`.

Aplica operadores genéticos (mutación y combinación) para que surjan nuevas soluciones con el método `evolve()`. Pone a prueba cada solución con la función de ajuste `evaluate()`, y por último retorna el cromosoma del individuo mejor adaptado con `getFittestChromosome()`.

Se requiere una función de ajuste o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo, los padres deben ser seleccionados para la reproducción, a continuación dichos padres seleccionados se cruzaran generando dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuara un operador de mutación.

El resultado de la combinación de las anteriores funciones será un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema), los cuales en la evolución del Algoritmo Genético formarían parte de la siguiente población, así después un número de iteraciones determinada por el programador se obtiene el mejor individuo adaptado.

## 2.2 Diseño de la extensión

El diseño es el primer paso en la fase de desarrollo de cualquier producto o sistema de ingeniería. El objetivo del diseño es producir un modelo o representación de una entidad que se va a construir posteriormente (Pressman, 2005).

Hay tres características que sirven como parámetros generales para la evaluación de un buen diseño. Estos parámetros son los siguientes:

- Debe implementar todos los requisitos explícitos obtenidos en la etapa de análisis.
- Debe ser una guía que puedan leer y entender los que construyen el código y los que prueban y mantienen el software.
- Debe proporcionar una idea completa de lo que es el software.

Es la primera de las tres actividades técnicas que implica un proceso de ingeniería de software; estas etapas son diseño, codificación y pruebas. Generalmente la fase de diseño

- Diseño de datos: esencialmente se encarga de transformar el modelo de dominio de información creado durante el análisis.
- Diseño arquitectónico: se definen las relaciones entre los principales elementos estructurales del programa.
- Diseño de interfaz: describe cómo se comunica el software con los sistemas que operan con él, y con los operadores que lo emplean.
- Diseño procedural: transforma elementos estructurales de la arquitectura del programa en una descripción procedural de los componentes del software.

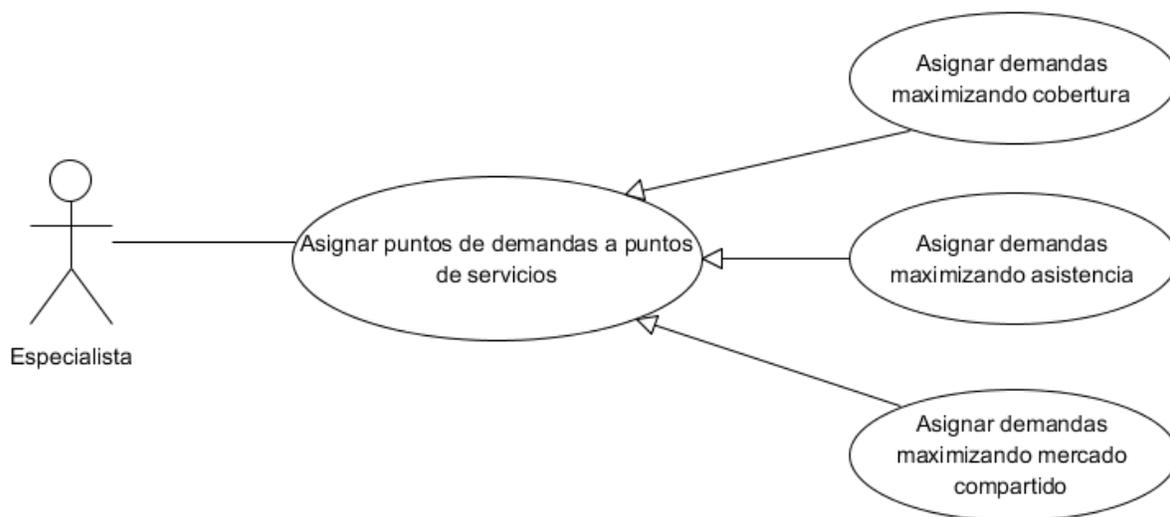
El lenguaje de modelado utilizado para la adición de la operación localización-asignación al módulo de análisis de redes de gvSIG fue el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, por sus siglas en inglés), es uno de los lenguajes de modelado de sistemas de software más conocido y utilizado en la actualidad. Es un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema. Ofrece un estándar para describir un "plano" del sistema (modelo), incluyendo aspectos

conceptuales tales como procesos de negocio, funciones del sistema, y aspectos concretos como expresiones de lenguajes de programación, esquemas de bases de datos y compuestos reciclados.

Los diagramas UML empleados en el diseño del módulo fueron: diagramas de casos de uso y diagramas de clases.

### 2.2.1 Diagrama de casos de uso

Los diagramas de casos de uso documentan el comportamiento de un sistema desde el punto de vista del usuario. Por lo tanto los casos de uso determinan los requisitos funcionales del sistema, es decir, representan las funciones que un sistema puede ejecutar. Su ventaja principal es la facilidad para interpretarlos, lo que hace que sean especialmente útiles en la comunicación con el cliente.



**Figura 10.** Diagrama de casos de uso

La operación implementada está destinada a un solo tipo de actor que es el especialista o investigador de cualquier rama que desee realizar un análisis del tipo localización-asignación sobre un callejero, percibirlo de forma visual y sacar conclusiones.

Como se muestra en la Figura 10 el caso de uso que se toma en consideración es: asignar los puntos de demandas a puntos de servicios que es el objetivo del problema localización-asignación teniendo en cuenta siempre que esté dentro de la

distancia de impedancia seleccionada por el especialista. Como instancias de este caso de uso el especialista puede asignar la demanda según el tipo de problema específico, ya sea maximizar cobertura, maximizar asistencia o maximizar mercado compartido. El caso de uso maximizar cobertura elige los servicios que la máxima demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios. Maximizar asistencia elige los servicios que se asigne el máximo peso de demanda posible a los servicios asumiendo que el peso de la demanda se reduce con la distancia. Maximizar mercado compartido se elige un número concreto de servicios que la demanda asignada se maximice en presencia de competidores. El objetivo es captar la máxima cuota de mercado posible con un número dado de servicios que se especifique. La cuota de mercado total es la suma de todo el peso de demanda para los puntos de demanda válidos.

### 2.2.2 Diagrama de Clases

Un diagrama de clases es un tipo de diagrama estático que describe la estructura de un sistema mostrando sus clases, atributos y las relaciones entre ellos. Los diagramas de clases son utilizados durante el proceso de análisis y diseño de los sistemas, donde se crea el diseño conceptual de la información que se manejará en el sistema, y los componentes que se encargaran del funcionamiento y la relación entre uno y otro.

Dentro del paquete *org.gvsig.graph.gui* están la mayoría de las clases creadas para el funcionamiento de la nueva herramienta encargada del análisis de redes. Solo la clase *Location\_AllocationExtension* no está dentro de ese paquete, se encuentra en el paquete de extensiones (*org.gvsig.graph*) del módulo de redes.

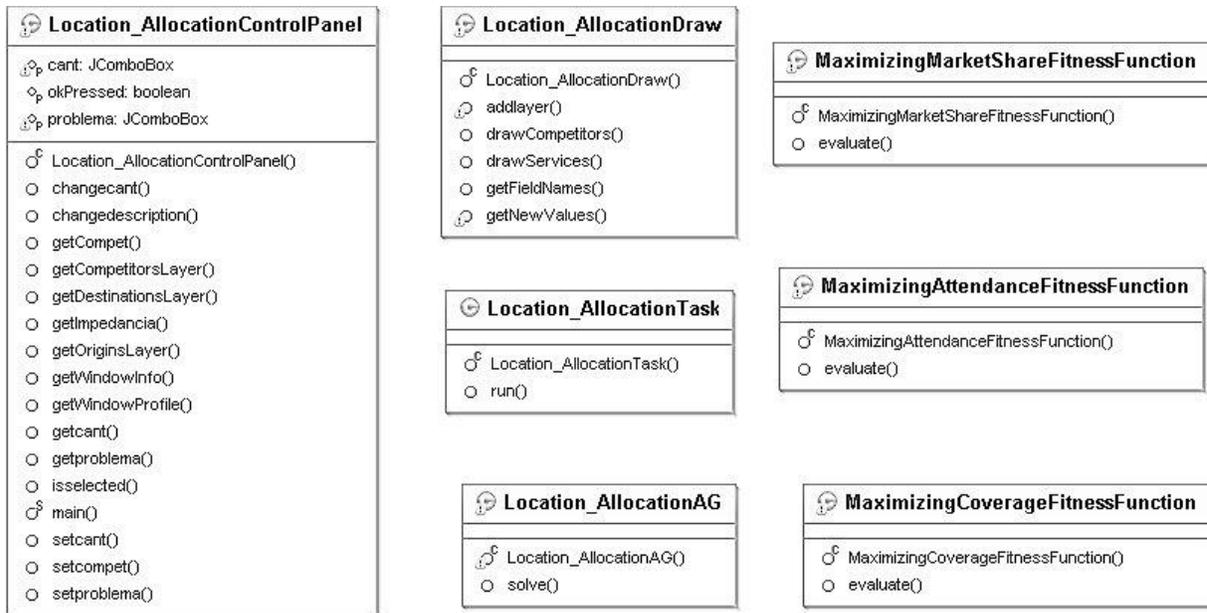


Figura 11. Diagrama de las clases dentro de *org.gvsig.graph.gui*

En la Figura 11 se muestran los atributos y métodos de las clases que se elaboraron en el paquete *org.gvsig.graph.gui*, posteriormente se describirán y se explicarán sus funciones dentro del proyecto.

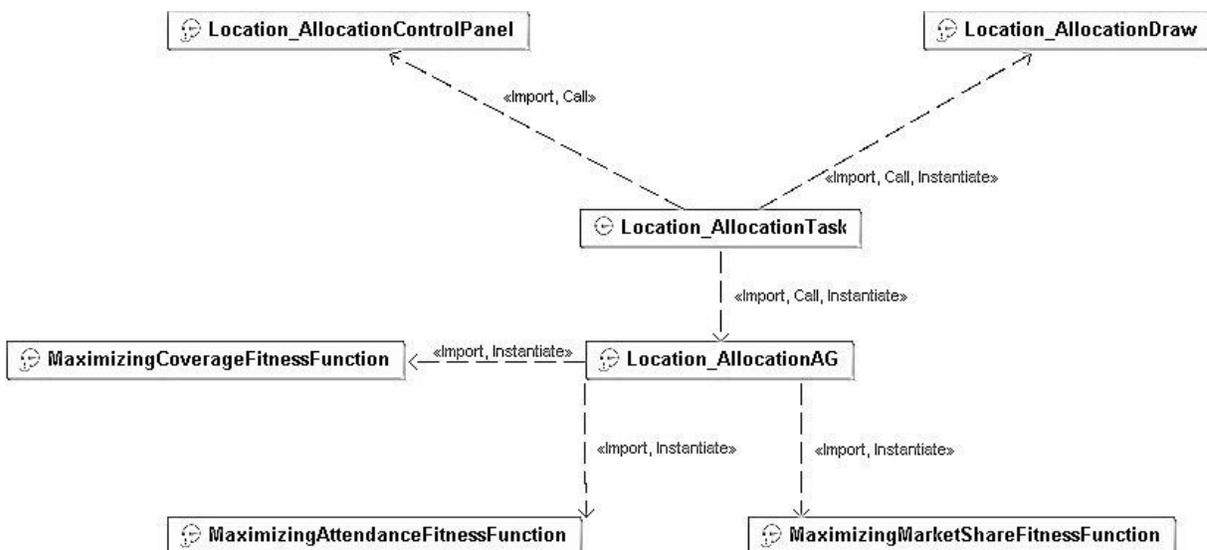
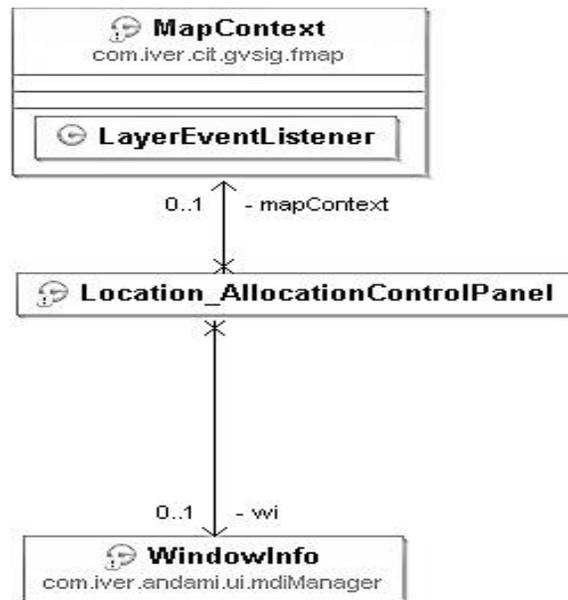


Figura 12. Dependencias entre las clases nuevas en *org.gvsig.graph.gui*

En la Figura 12 se muestran las dependencias entre estas clases revelando a la clase *Location\_AllocationTask* como la que controla todo el proceso de ejecución del proyecto. En estas dependencias se indica si una clase llama, instancia y/o importa a las demás.



**Figura 13.** Asociaciones de la clase *Location\_AllocationControlPanel*

En la Figura 13 podemos observar las asociaciones de la clase *Location\_AllocationControlPanel* con *MapContext* y con *WindowInfo*, que se encuentran en paquetes diferentes y se crean objetos de esas clases.

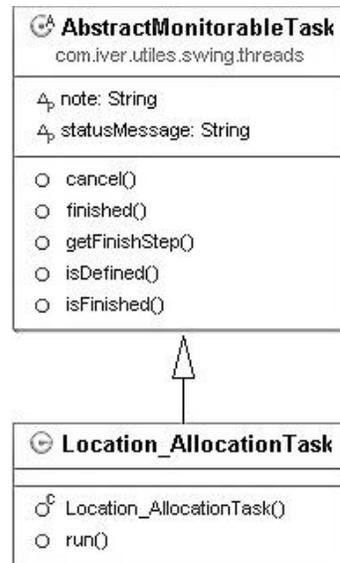


Figura 14. Relaciones de la clase *Location\_AllocationTask*

La clase *Location\_AllocationTask* se hereda de *AbstractMonitorableTask* como se muestra en la Figura 14.

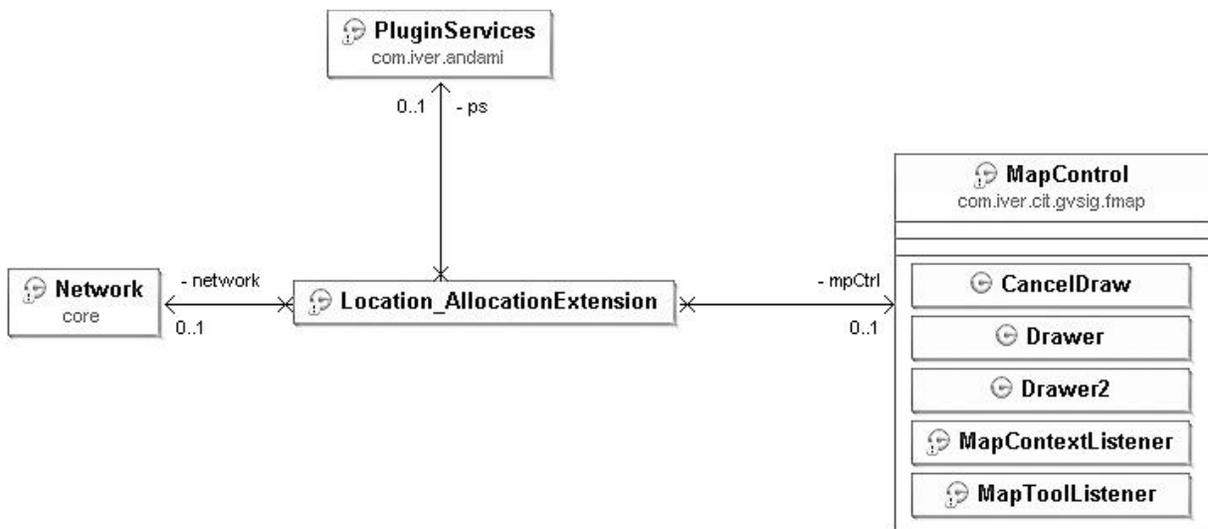
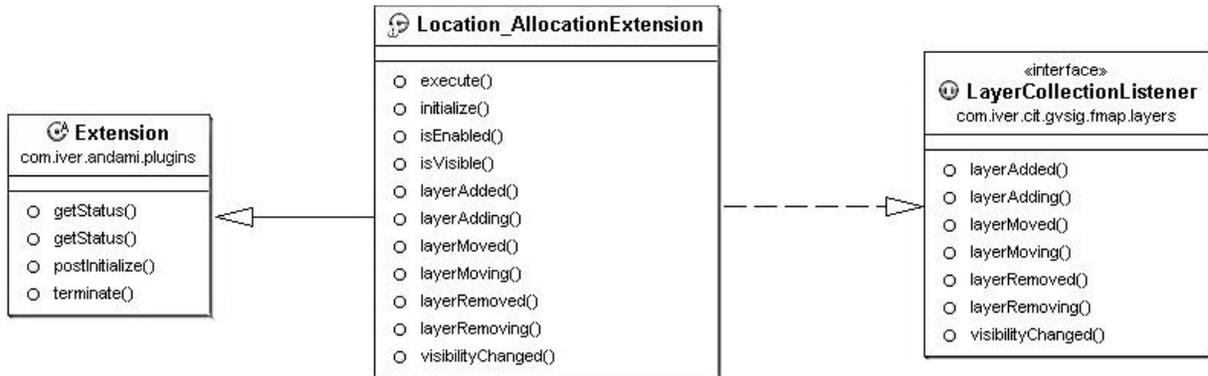


Figura 15. Asociaciones de la clase *Location\_AllocationExtension*

La clase *Location\_AllocationExtension* crea objetos de las clases *PluginServices*, *Network* y *MapControl*, como se expone en la Figura 15, además hereda de *Extension* e implementa la interfaz *LayerCollectionListener* (ver Figura 16), concibiendo métodos de esta interfaz como son: *layerAdded()*, *layerAdding()*, *layerMoving()*, *visibilityChanged()*, entre otros.



**Figura 16.** Relación de la nueva extensión con otras clases

En la Figura 17 se muestra el diagrama de clases relacionado con la biblioteca JGAP, donde se exhiben la clase *Fitness Function* de la cual se hereda, así como las clases que se instancian como son: *Chromosome*, *IntegerGene*, *Configuration* y *Genotype*.

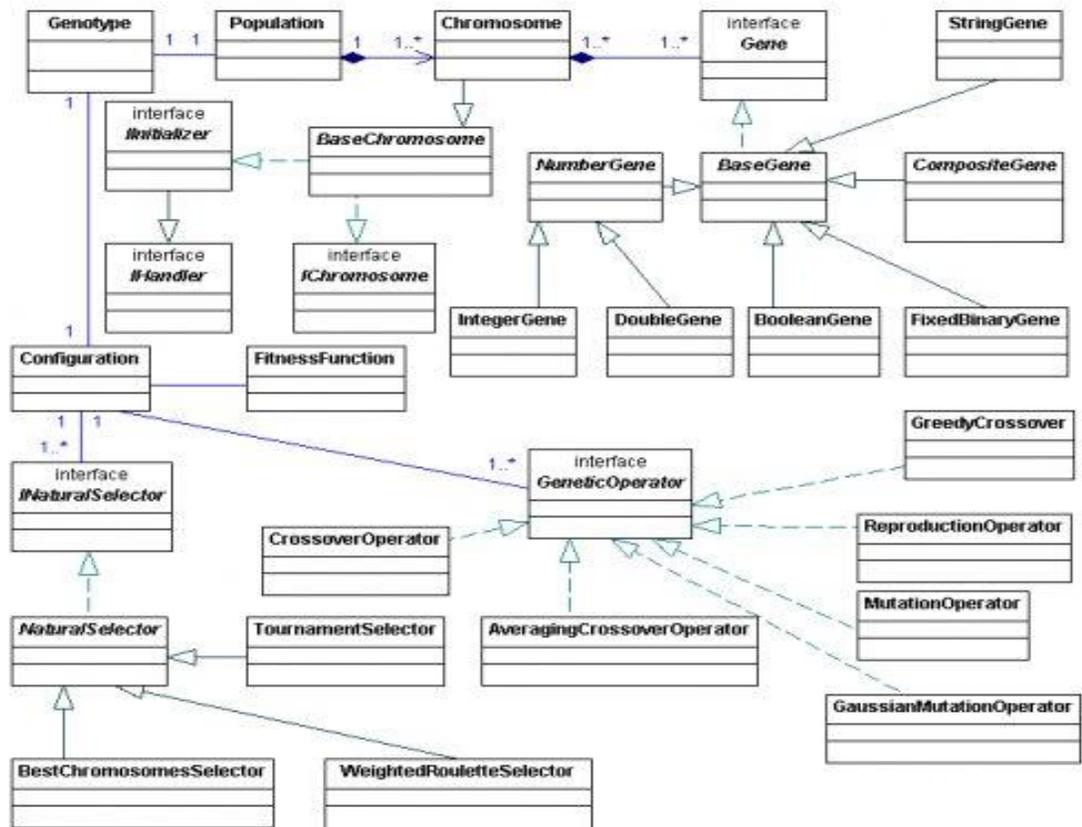


Figura 17. Diagrama de clases del paquete JGAP

## 2.3 Implementación

En este epígrafe se muestra los principales contenidos concernientes a la implementación de la extensión teniendo en cuenta la selección de las tecnologías necesarias, consideraciones sobre la operación implementada y describiendo mediante una secuencia de pasos como se añade dicha operación al módulo de análisis de redes de gvSIG.

### 2.3.1 Selección de las tecnologías

Durante el desarrollo o extensión de un sistema es importante la elección de la plataforma objetivo y del lenguaje de desarrollo a utilizar. En cada investigación hay que puntualizar en determinadas áreas específicas de la aplicación. En el caso

particular de esta investigación debe fijarse la API (Application Programming Interface) gráfica a utilizar.

### **Elección del lenguaje de desarrollo**

El objetivo de esta investigación es adicionar una operación al módulo de análisis de redes de gvSIG. Este SIG está implementado con el lenguaje Java. El proceso de integración de la operación con el sistema actual inevitablemente tendrá que interactuar y utilizar el código fuente de gvSIG. Esto hace al lenguaje Java la mejor elección para mantener la mayor compatibilidad posible con el sistema actual.

A las razones descritas anteriormente se puede agregar que este proyecto necesita de un lenguaje potente en la implementación de interfaz gráfica, lo que se puede conseguir con la plataforma Java. También se pretende utilizar una biblioteca viable para la utilización de algoritmos genéticos, en este sentido Java nos puede proveer de una gran variedad de bibliotecas y garantizar la eficiencia de la misma. Por otra parte la implementación de la operación en este lenguaje permite la fácil reutilización y adaptación de varias de sus componentes, facilitando su integración con otros sistemas, producto de la flexibilidad y potencialidades de Java.

### **Elección de la API gráfica**

Las operación que se pretende implementar no requiere de gran complejidad en la API gráfica. . Dado que lo que se quiere es pintar líneas rectas no se necesita de una API 3D. Por esto se decidió utilizar la tecnología Java2D que brinda un excelente desempeño y potencialidad para la programación gráfica en dos dimensiones. Esta decisión facilita a los usuarios la utilización del sistema pues no necesitan paquetes adicionales a los de la plataforma Java. La API Java 2D está constituida por un conjunto de clases que pueden ser usadas para crear gráficos de elevada calidad. Utilizamos esta API para crear la representación visual de la operación implementada.

### **Elección del Entorno de Desarrollo Integrado**

Existe un conjunto de Entornos de Desarrollo Integrado (IDE, de sus siglas en inglés) que permiten el desarrollo de proyectos en Java. El IDE Eclipse versión 3.4 fue el seleccionado como ambiente de programación de esta extensión, debido a que resulta cómodo y fácil de usar para depurar programas. Por otra parte Eclipse provee al programador con frameworks muy ricos para el desarrollo de aplicaciones gráficas, definición y manipulación de modelos de software. Posee plugins para el desarrollo

de editores visuales que pueden ir desde procesadores de texto hasta editores de diagramas UML, interfaces gráficas para el usuario (GUI).

Además la estructura de proyectos de gvSIG está diseñada para ser compilado con mayor facilidad utilizando este IDE.

### **Elección de la versión de gvSIG a utilizar como sistema base**

El progresivo desarrollo de gvSIG por parte de una comunidad de desarrolladores hace posible que con cierta regularidad se actualice su versión. La operación localización-asignación se desarrolló en la versión 1.12 de gvSIG, por tener esta el módulo de análisis de redes pero es compatible con las versiones anteriores, solo se debe copiar el compilado del módulo para las otras versiones.

#### **2.3.2 Consideraciones sobre la operación Localización-Asignación**

Para la implementación de la operación localización-asignación se tiene en cuenta que este problema se puede analizar desde tres puntos de vista diferentes en dependencia de lo que necesite el especialista. Como se ha mencionado con anterioridad la división del problema quedaría de la siguiente forma: maximizar cobertura, maximizar asistencia y maximizar mercado compartido. Además hay que mostrar de forma visual la solución del problema para lo que se realizó una clase en específica llamada *Location\_AllocationDraw*.

##### **2.3.2.1 Implementación del algoritmo genético**

Para la implementación se tienen tres clases para funciones de evaluación, una para cada arista del problema, por lo que se dice que son tres los algoritmos genéticos implementados y se tiene la clase *Location\_AllocationAG*, en la que se define la cantidad de genes que va a tener cada cromosoma de la población, esta coincide con la cantidad de puntos de servicios que el especialista quiere seleccionar. También se definen los valores admisibles para cada gen, va desde cero hasta la cantidad de puntos de servicios menos uno. El valor de cada gen representa un punto de servicio que se seleccionó. La población inicial escogida fue de 100, se crearon cromosomas iniciales con valores aleatorios dentro de los valores admisibles y el algoritmo tiene 500 iteraciones, donde en cada iteración se evalúan los cromosomas para seleccionar los mejores y se le aplican los operadores del algoritmo genético en búsqueda de la mejor solución. Según el tipo de problema seleccionado llama a la clase correspondiente que tiene la función por la que se va a evaluar cada cromosoma de la población.

### 2.3.2.2 Implementación para resolver maximizar cobertura

Maximizar cobertura elige los servicios que la máxima demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios.

Maximizar cobertura se utiliza con frecuencia para ubicar estaciones de bomberos, comisarías de policía y centros ERS, porque a menudo se exige a los servicios de emergencia que lleguen a todos los puntos de demanda dentro de una distancia de respuesta especificados. Observe que es importante para todas las organizaciones, y crítico para los servicios de emergencia, tener datos exactos y precisos para que los resultados del análisis modelen correctamente los resultados del mundo real.

La siguiente lista describe cómo gestiona la demanda el problema de maximización de la cobertura:

- Cualquier punto de demanda que se encuentre fuera de las tolerancias de impedancia de todos los servicios no se asignará.
- Un punto de demanda dentro de la tolerancia de impedancia de un servicio tiene todo el peso de su demanda asignado a esa demanda.
- Un punto de la demanda dentro de la tolerancia de impedancia de dos o más servicios tiene todo su peso de demanda asignado en exclusiva al servicio más cercana.

Para esto se creó la clase *MaximizingCoverageFitnessFunction* que hereda de *org.jgap.FitnessFunction*, donde se encuentra la función de evaluación para este enfoque. El especialista tiene que seleccionar la cantidad de puntos de servicios que él quiere. Función de evaluación funciona por dos maneras. Primero busca la cantidad de demanda que satisface por cantidad de servicios que se seleccionaron. Si esa cantidad es menor que demanda, función de evaluación trata maximizar esa cantidad. Si satisface todas demandas, función de evaluación trata minimizar total distancia entre los servicios y las demandas.

### 2.3.2.3 Implementación para resolver maximizar asistencia

Maximizar asistencia sigue la filosofía que elige los servicios que satisface el máximo peso de demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios. El peso de demanda se reduce con la distancia.

Las tiendas especializadas con poca o ninguna competencia se benefician de este tipo de problema, pero también puede beneficiar a comercios generalistas y

restaurantes que no tengan los datos sobre competidores necesarios para los tipos de problema de mercado compartido. Algunos negocios que podrían beneficiarse de este tipo de problema son las cafeterías, gimnasios, clínicas médicas y dentales, boleras y tiendas de electrónica. Las paradas del transporte público suelen elegirse con la ayuda de Maximizar asistencia. Maximizar asistencia supone que cuando más lejos tengan que desplazarse las personas para llegar hasta el servicio, menos probable será que la utilicen. Esto se refleja en cómo se reduce con la distancia la cantidad de demanda asignada a los servicios. La reducción asociada a la distancia se especifica con la transformación de impedancia.

La siguiente lista describe cómo gestiona la demanda el problema de maximización de la asistencia:

- La demanda exterior a la tolerancia de impedancia de todos los servicios no se asigna a ningún servicio.
- Cuando un punto de demanda está dentro de la tolerancia de impedancia de un servicio, su peso de demanda se asigna parcialmente de acuerdo con la tolerancia y la transformación de impedancia.
- El peso de un punto de demanda cubierto por la tolerancia de impedancia de más de un servicio se asigna solo a la instalación más cercana.

Para esto se implementó la clase *MaximizingAttendanceFitnessFunction* que hereda de *org.jgap.FitnessFunction*, donde se encuentra la función de evaluación para este enfoque. El especialista tiene que seleccionar la cantidad de puntos de servicios que él quiere. Función de evaluación trata minimizar total distancia entre los servicios y las demandas.

#### **2.3.2.4 Implementación para resolver maximizar mercado compartido**

El objetivo de maximizar mercado compartido es captar la máxima cuota del mercado posible con un número dado de los servicios que se especifique. La cuota de mercado total es la suma de todo el peso de demanda para los puntos de demanda válidos.

Los tipos de problema de mercado compartido requieren la máxima cantidad de datos porque, además de conocer el peso de los servicios propios, también es necesario conocer el de los servicios de los competidores. Los mismos tipos de servicios que utilizan el tipo de problema de maximización de la asistencia pueden utilizar también tipos de problema de mercado compartido, dado que tienen información completa que incluye datos de los competidores. Las grandes tiendas de

descuento suelen utilizar Maximizar porción de mercado para buscar un conjunto finito de nuevas tiendas.

La siguiente lista describe cómo gestiona la demanda el problema de maximización de la cuota de mercado:

- La demanda exterior a la tolerancia de impedancia de todos los servicios no se asigna a ninguna instalación.
- Un punto de demanda dentro de la tolerancia de impedancia de una instalación tiene todo el peso de su demanda asignado a esa demanda.
- Un punto de demanda dentro de la tolerancia de impedancia de dos o más servicios tiene todo su peso de demanda asignado a los servicios que la cubren; además, el peso se divide inversamente proporcional a la distancia entre el servicio y el punto de demanda. Esto significa que se asigna más peso de demanda a los servicios cercanos que a los lejanos.
- La cuota total de mercado, que se puede utilizar para calcular la cuota de mercado captada, es la suma del peso de todos los puntos de demanda ubicados en la red; los puntos de demanda no ubicados no contribuyen a la cuota total de mercado y deben reubicarse en la red si se van a tener en cuenta.

Para esto se creó la clase *MaximizingMarketShareFitnessFunction* que hereda de *org.jgap.FitnessFunction*, donde se encuentra la función de evaluación para este enfoque. El especialista tiene dos opciones, seleccionar los puntos de competidores o no seleccionar.

En el caso de que elija la primera opción para calcular la función de evaluación funciona utiliza un modelo Huff, también conocido como problema de gravedad o interacción espacial

Si selecciona la segunda opción la función de evaluación funciona por dos maneras también. Primero busca la cantidad de demanda que satisface por los servicios que se seleccionaron. Si esa cantidad es menor que la demanda, la función de evaluación trata maximizar esa cantidad. Los servicios que se seleccionaron si satisface todas demandas, la función de evaluación trata de minimizar la total distancia entre los servicios y las demandas.

### 2.3.3.5 Implementación para visualizar la solución del problema

Para visualizar la solución del problema se tiene la clase *Location\_AllocationDraw*, que permite al especialista analizar de una forma más fácil los resultados de la operación implementada y tiene una serie de métodos para ese objetivo. El método *drawServices* pinta una chinche sobre los puntos de servicios a los cuales se les asignó demandas. El método *drawCompetitors* pinta una cruz sobre los puntos de competidores. El método *addlayer()* es el más importante de la clase porque crea una nueva capa de líneas, pintando una línea recta desde los puntos de demandas hasta los puntos de servicios asignados a ellas y si selecciona el algoritmo mercado compartido pinta una línea recta desde los puntos de demandas hasta los puntos de competidores asignados a ellas, en la nueva capa, si se visualiza en forma de tabla, se puede ver el nombre del punto de demanda, el nombre del punto de servicio al cual fue asignada y la distancia recorriendo las calles desde un punto hasta el otro. Por otra parte en este método se crean archivos dentro de la carpeta *\_fwAndami* dentro del *gvSIG-workspace* con extensiones *.dbf*, *.shp*, *.shx* y nombre *location\_allocation\_(un número)* para poder guardar las capas resultantes de aplicar la operación localización-asignación. También posee los métodos *getFieldNames()* y *getNewValues()* para obtener los nombres de los campos y los valores de los campos respectivamente de la capa de servicios y la capa de demandas.

### 2.3.3 Secuencia de pasos utilizados para la adición de la operación Localización-Asignación al módulo de análisis de redes de gvSIG

Lo primero que se hizo para la adición de la operación al módulo de redes de gvSIG fue añadir una extensión con el nombre *Location\_AllocationExtension* dentro del paquete *org.gvsig.graph*, se configuró el archivo *config.xml* que se encuentra dentro de la carpeta *config* en el módulo *extgraph* (módulo de redes). En ese archivo se declaró la nueva extensión, se precisó la dirección de donde se cargó y se definió el menú al que pertenece, en este caso es el menú *Red*. La clase *Location\_AllocationExtension* hereda de *com.iver.andami.plugins.Extension* e implementa *com.iver.cit.gvsig.fmap.layers.LayerCollectionListener*.

Luego se crearon las demás clases necesarias dentro del paquete *org.gvsig.graph.gui*. La clase *Location\_AllocationControlPanel* que hereda de *javax.swing.JPanel* e implementa *com.iver.andami.ui.mdiManager.IWindow* para generar la ventana donde el especialista escogerá las especificaciones para aplicar la operación localización-asignación. La clase *Locaton\_AllocationTask* que hereda de *com.iver.utiles.swing.threads.AbstractMonitorableTask* es la clase central, de donde se llama a las otras y se manejan los resultados que estas ofrezcan. La clase *Location\_AllocationDraw* que es la permite al especialista ver el resultado de aplicar

la operación de una forma más clara. También en ese paquete se encuentran las clases *Location\_AllocationAG*, *MaximizingCoverageFitnessFunction*, *MaximizingAttendanceFitnessFunction* y *MaximizingMarketShareFitnessFunction* para resolver los algoritmos genéticos.

## Conclusiones parciales

En este capítulo se presentaron los principales elementos de diseño de la extensión, profundizando en los diagramas de casos de usos y diagrama de clases. Además se analizaron las clases que se implementaron, ahondando en su función dentro del proyecto y mostrando su relación con las demás clases del módulo de redes. También se mostraron los pasos que se siguieron para llevar a cabo la implementación de la operación localización-asignación y su introducción dentro del módulo de análisis de redes de gvSIG.

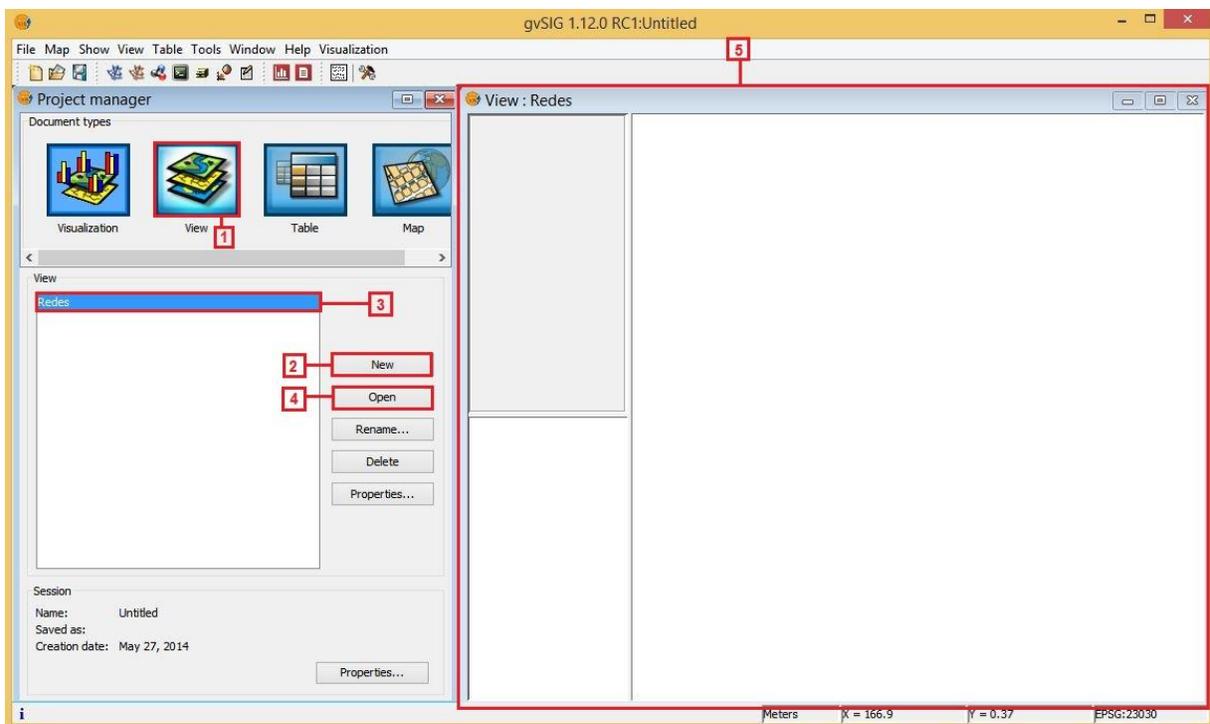
Además se llega a la conclusión que el lenguaje de modelado de software ideal para diseñar el proyecto es el UML por sus facilidades y por ser el más utilizado en la actualidad dentro de la comunidad de programadores.

## CAPÍTULO 3. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentarán al usuario las facilidades de la operación implementada, así como una descripción de cómo utilizar la nueva herramienta y se comprobará su efectividad.

### 3.1 Manual de usuario

Para la utilización de la nueva herramienta es necesario que se tenga el callejero de la ciudad o región donde se va a aplicar la operación, por otra parte es necesario también tener preparada una capa de puntos para los puntos de demandas y otra para los puntos de servicios. Teniendo ya lo primario, el primer paso sería crear una nueva vista.



**Figura 18.** Creación de una nueva vista

En la Figura 18 se muestran los pasos para establecer una nueva vista, los cuales son: elegir el tipo de documento que se va a visualizar, identificado con el número

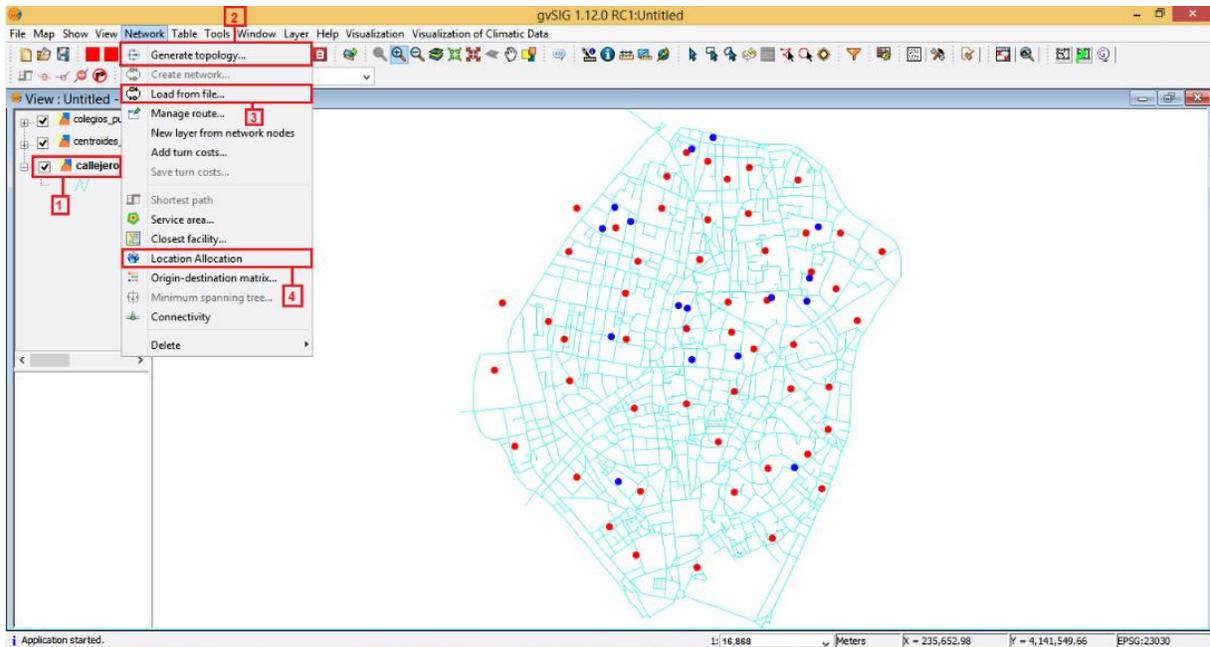
uno; crear un documento nuevo, oprimiendo el botón *New* (número dos); seleccionar el documento nuevo (número tres) y oprimir el botón *open* para abrirlo (número cuatro). Si se desea se puede cambiar el nombre del documento oprimiendo en *Rename*. Después de seguir estos pasos se mostrará una vista como la que se resalta con el número cinco.

Luego de abrir el documento se procede a añadir las capas necesarias para ejecutar la operación, para lo cual se debe oprimir el botón señalado con el uno en la Figura 19. En ese entonces se muestra un diálogo para seleccionar la ubicación de los archivos con extensión *.shp* y se cargarán como capas en el documento, dos capas de puntos para servicios y demandas y una capa de líneas para el callejero.



**Figura 19.** Adición de capas

Una vez cargadas las capas se procede a generar la red, si no existe, o a cargarla en caso contrario. Primero hay que seleccionar la capa correspondiente al callejero dando clic sobre el nombre de la capa (marcado con el número uno en la Figura 20). Luego se selecciona el menú *red*, dentro de ese menú el botón *Generar topología de red* (marcado con el número dos, Figura 20) si la red no se encuentra previamente en un fichero. Una vez oprimido este botón se abrirán varios paneles para seleccionar las opciones disponibles, se debe seleccionar las opciones por defecto. Luego saldrá un diálogo preguntando si desea cargar la red generada, si oprime en *Sí* y se carga la red. En el caso de que la red se tenga con anterioridad en un fichero con extensión *.net* se oprime *Cargar red desde fichero...* marcado con el número tres en la Figura 20, se busca el directorio donde se encuentra y se carga. Después de seleccionar el fichero se revelará otro diálogo para seleccionar el campo por el cual se van a identificar las rutas, en este caso será el campo que represente el nombre.



**Figura 20.** Agregar la red y seleccionar la operación sobre redes

Una vez cargada la red se procede a aplicar la operación Localización-Asignación oprimiendo el botón con ese nombre en el menú Red, señalado con el número cuatro de la Figura 20. Es necesario indicar que para que el botón se encuentre habilitado es preciso que la capa correspondiente al callejero esté seleccionada.

The image shows a software dialog box titled "Location Allocation" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into two main sections: "Parameters" and "Description".

**Parameters section:**

- Layer of Services:** A dropdown menu with "colegios\_pub\_priv" selected. A red box highlights this dropdown, with a red line connecting it to a red box containing the number "1".
- Layer of Demands:** A dropdown menu with "centroides\_secc\_censales" selected. A red box highlights this dropdown, with a red line connecting it to a red box containing the number "2".
- Numbers of services:** A dropdown menu with "16" selected. A red box highlights this dropdown, with a red line connecting it to a red box containing the number "3".
- Impedance:** A text input field containing "1000" followed by the label "Meters". A red box highlights the input field, with a red line connecting it to a red box containing the number "4".
- Type of problem:** A dropdown menu with "Maximize Market Share" selected. A red box highlights this dropdown, with a red line connecting it to a red box containing the number "5".
- Layer\_Competitors:** A dropdown menu with "centroides\_secc\_censales" selected. A red box highlights this dropdown, with a red line connecting it to a red box containing the number "6".

**Choose competitors section:**

- A large empty text input field is highlighted with a red box, with a red line connecting it to a red box containing the number "8".
- To the right of the input field is a dropdown menu with "1" selected, highlighted with a red box, with a red line connecting it to a red box containing the number "7".

**Description section:**

- A text area containing the following text: "Maximize Market Share: This option solves the competitive facility location problem. It chooses facilities to maximize market share in the presence of competitive facilities. The set of facilities that maximizes the total allocated demand is chosen." A red box highlights this text area, with a red line connecting it to a red box containing the number "9".

**Buttons:**

- An "Ok" button is highlighted with a red box, with a red line connecting it to a red box containing the number "10".
- A "Cancel" button is present but not highlighted.

**Figura 21.** Panel de opciones de la operación localización-asignación

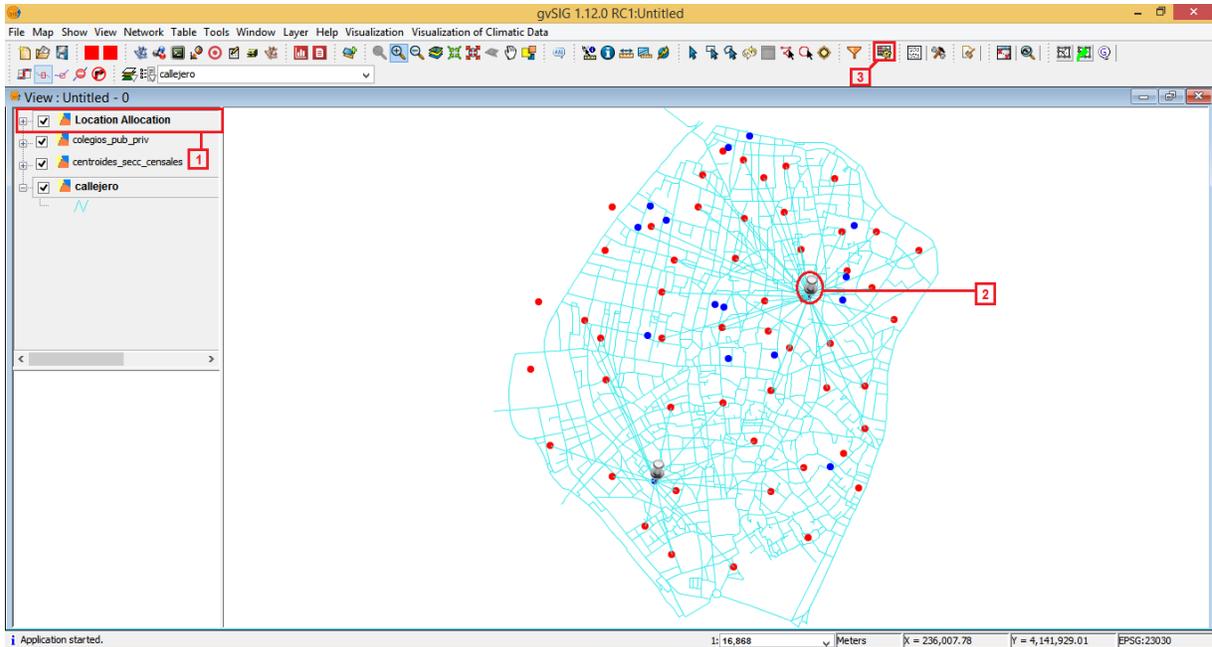
En la Figura 21 se muestran todas las opciones posibles de la nueva herramienta implementada. Se puede seleccionar cuál va a ser la capa destinada a los servicios y la destinada a las demandas de las capas de puntos que se encuentran cargadas en el documento, estas opciones están marcadas con los números uno y dos. Con el número tres está indicada la cantidad máxima de servicios que la operación puede seleccionar para asignar la demanda, el algoritmo puede brindar un resultado con menos de esa cantidad en dependencia de la presencia de servicios redundantes o no; siempre la cantidad que puede elegir el especialista será menor o igual que la cantidad de puntos de servicios existentes en la capa de servicios seleccionada.

Además hay que precisar el valor de impedancia, tenga en cuenta que la impedancia es el valor máximo de distancia que puede existir desde un punto de servicio hasta un punto de demanda para que se satisfaga dicha demanda, está medido en metros y esta opción está señalada con el número cuatro. El número cinco muestra el tipo de problema a elegir, ya sea minimizar impedancia, maximizar impedancia, minimizar servicios, maximizar cobertura, maximizar asistencia o maximizar mercado compartido, una vez seleccionado uno de estos se muestra una descripción (número nueve) de ellos en la parte inferior de la ventana. Si elige maximizar mercado compartido se puede seleccionar cuál va a ser la capa compartida (número seis). Además existe un ComboBox (número siete) para que el especialista seleccione los competidores. Cuando el usuario los selecciona imprime en un TextField (número ocho).

Luego de fijar las condiciones en las que se quiere se ejecute la operación, se procede a presionar el botón Aceptar (número diez).

El resultado de aplicar la herramienta se mostrará visualmente en el documento, agregándole una capa de líneas (número uno, Figura 22) cuyo nombre es Localización-Asignación. En esta capa cada línea va desde un punto de demanda hasta el punto de servicio al que fue asignado y significa la asignación. Además se agregó un chinche (número dos, Figura 22) por cada punto de servicio que abastece al menos a un punto demanda.

El resultado puede verse también en forma de tabla, presionando en el botón señalado con el número tres de la Figura 22.



**Figura 22.** Representación visual de los resultados de la operación Localización-Asignación para el tipo de problema maximizar impedancia con dos servicios exactamente

Servicio	Demanda	Distancia
COLEGIO C...	0	277.0
COLEGIO C...	1	910.0
COLEGIO P...	2	952.0
COLEGIO C...	3	452.0
COLEGIO P...	4	741.0
COLEGIO C...	5	804.0
COLEGIO C...	6	549.0
COLEGIO C...	7	609.0
COLEGIO C...	8	844.0
COLEGIO C...	9	24.0
COLEGIO C...	10	260.0
COLEGIO C...	11	939.0
COLEGIO C...	12	540.0
COLEGIO C...	13	393.0
COLEGIO C...	14	486.0
COLEGIO P...	15	594.0
COLEGIO P...	16	797.0

0 / 44 Total records selected.

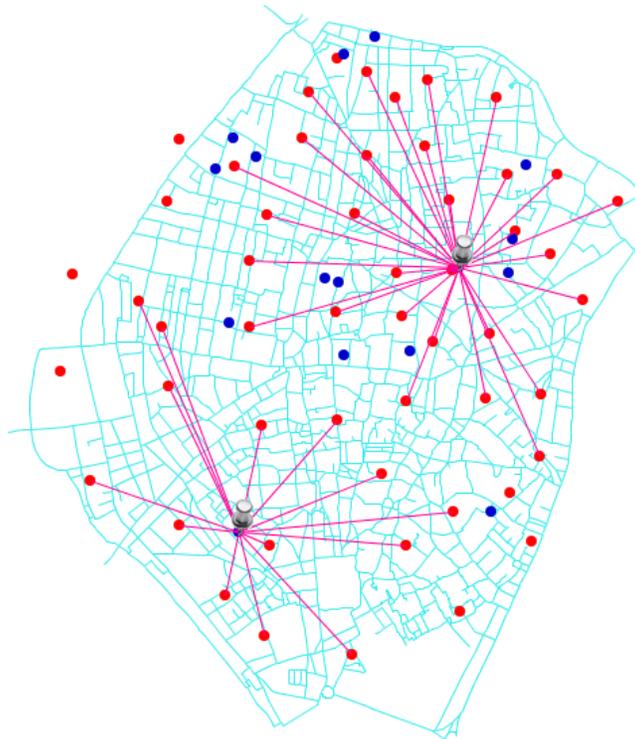
**Figura 23.** Tabla de los resultados

En la Figura 23 se muestra la tabla de la capa de los resultados, posee tres campos, estos son: Servicios, con los nombres de los servicios; Demandas, al lado de cada servicio se encuentra el nombre de una demanda que fue asignada a ese servicio; y Distancia, que muestra la distancia de la mínima ruta que existe, a través de las calles, desde el punto de servicio hasta el punto de demanda.

### 3.2 Validación de los resultados

ArcGIS es un software que goza de un gran prestigio en el mundo de los Sistemas de Información Geográfica, es por eso que se quiere comprobar la efectividad de los resultados de la nueva herramienta implementada para el análisis de redes comparándolos con los resultados de este.

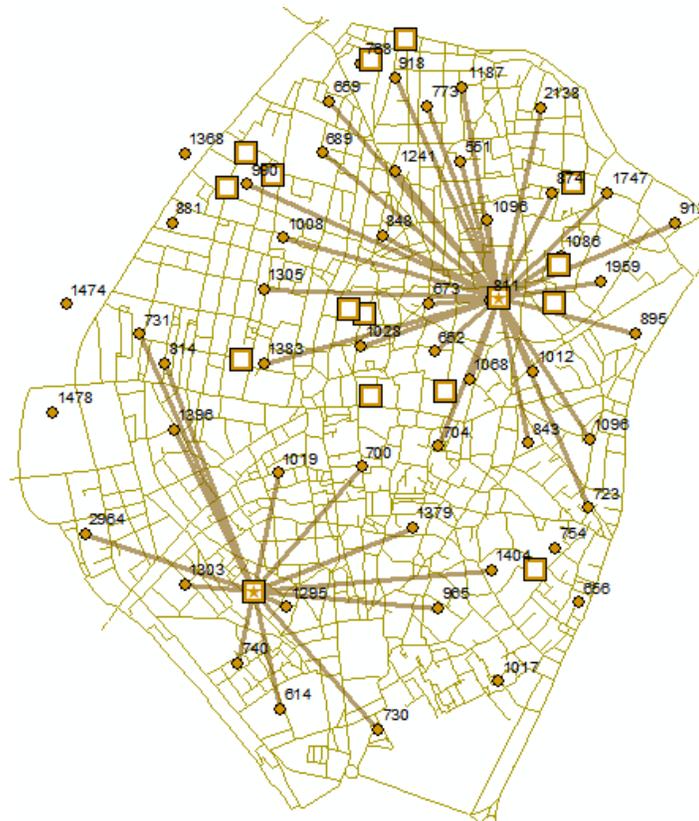
Maximizar cobertura sigue la filosofía de elige los servicios que satisface la máxima demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios, como se muestra en la Figura 24 donde se seleccionaron dos puntos de servicios con una impedancia de 1000 metros y se asignaron 44 puntos de demandas a esos servicios.



**Figura 24.** Solución de gvSIG para maximizar cobertura con 2 servicios y 1000 de impedancia

Se puede ver en la **Error! Reference source not found.** como el algoritmo para maximizar cobertura escogió los puntos de servicios que satisface más demandas y a su vez satisfizo 44 puntos de demandas, el punto de servicio que se encuentra en el medio satisface a gran número de demanda por lo que es factible que sea uno de los seleccionados. Los puntos azules son los puntos de servicios candidatos, los rojos los de demandas y las líneas representan la asignación.

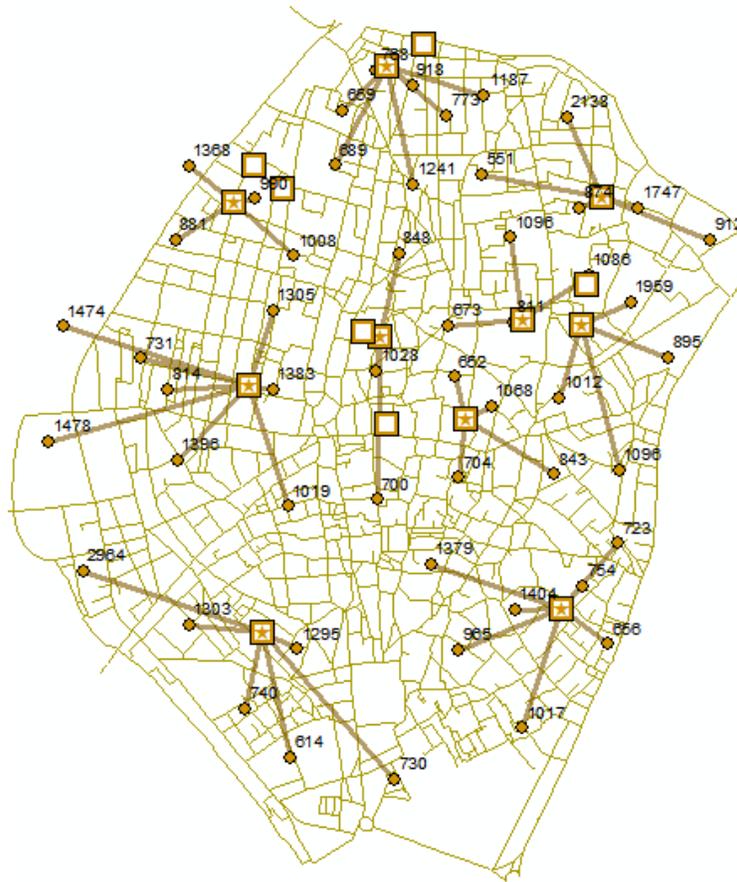
Comparando la variante de maximizar cobertura con ArcGIS se tiene que dada la localización espacial de todos los colegios (públicos y privados de Sevilla), ¿cuáles demandas serán asignadas a cuáles servicios? El número total de demandas es 52 y el de servicios, 16. Se utilizó la capa Colegios como servicios y la capa CENTROIDES\_SECC\_CENSALES como demandas. Se escogen como posibles soluciones los 16 colegios, de ahí el algoritmo selecciona los óptimos para que los servicios satisfice máxima demanda posible. El resultado de ArcGIS se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Solución de ArcGIS para maximizar cobertura con 2 servicios y 1000 de impedancia

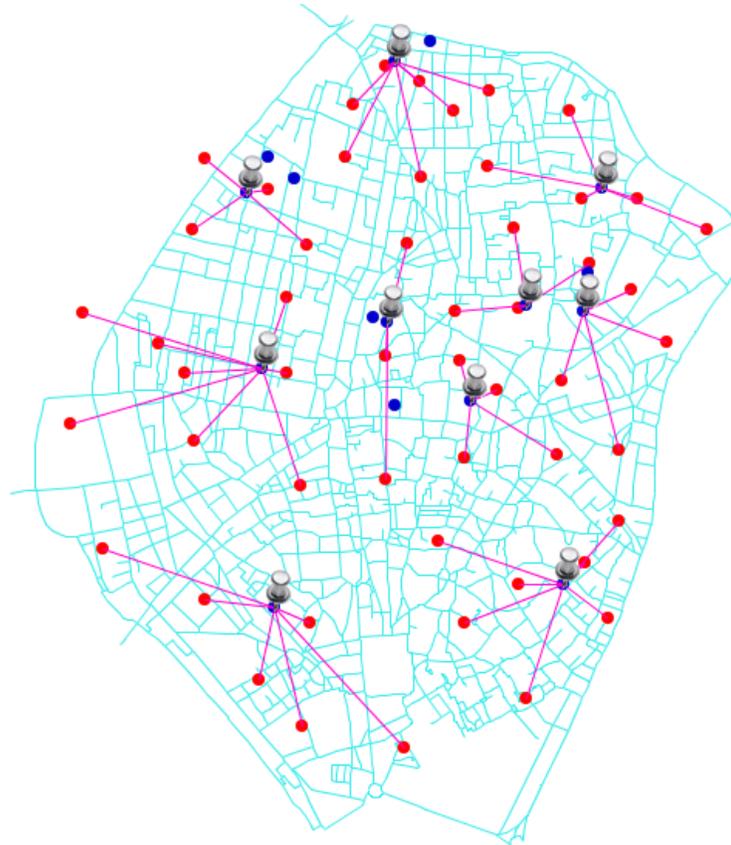
En gvSIG se probó con esta misma variante, con 16 servicios como se hizo en ArcGIS y los resultados fueron las mismas asignaciones, queda redundante el mismo punto de servicio como se exhibe en la Figura 24. Esto nos lleva a deducir que existe un buen funcionamiento de la herramienta, pues ya se ha mencionado con anterioridad la fama de los respuestas de este SIG (ArcGIS).

Se compara de nuevo esta variante pero esta vez con solo 10 servicios y 1000 metros de impedancia, los 10 colegios los cuales tratan de satisfacer máxima demanda posible. La solución de ArcGIS es la que se muestra en la Figura 26.



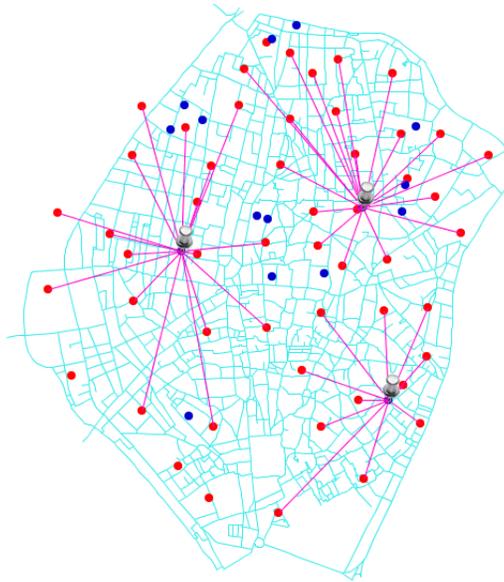
**Figura 26.** Solución de ArcGIS para maximizar cobertura con 10 servicios y 1000 de impedancia

Nuevamente gvSIG nos revela los mismos resultados que ArcGIS, resultando como se expone en la Figura 27.



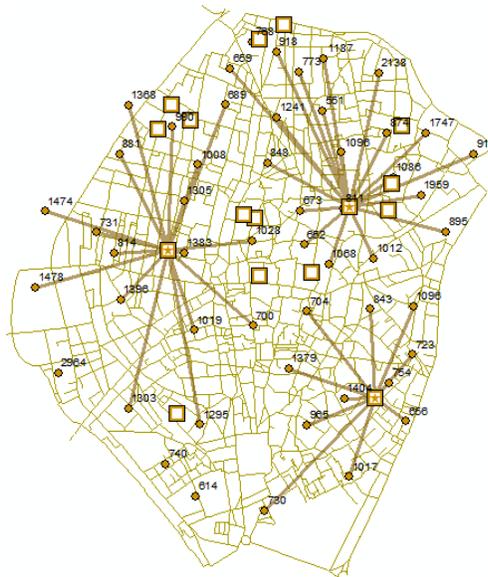
**Figura 27.** Solución de gvSIG para maximizar cobertura con 10 servicios y 1000 de impedancia

Se quieren comprobar los resultados de la variante “Maximize Attendance” del problema de Localización-Asignación, haciendo una comparación similar con ArcGIS. Maximizar asistencia sigue la filosofía que elige los servicios que satisface el máximo peso de demanda posible quede cubierta por la tolerancia de impedancia de los servicios. El peso de demanda reduce con la distancia. Se muestra en la Figura 28 donde se seleccionaron dos puntos de servicios con una impedancia de 1000 metros y se asignaron 48 puntos de demandas a esos servicios.



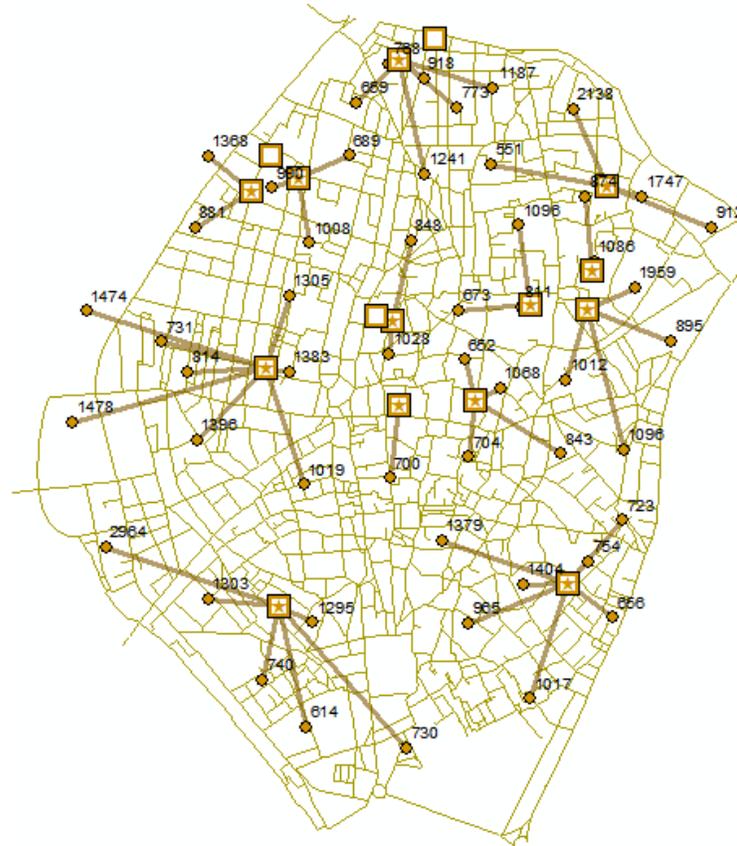
**Figura 28.** Solución de gvSIG para maximizar asistencia con 3 servicios y 1000 de impedancia

En ArcGIS se prueba con esta misma variante (Figura 29), con 16 servicios como se hizo en gvSIG y los resultados fueron las mismas asignaciones, queda redundante el mismo punto de servicio como se exhibe en la Figura 28. Esto nos lleva a deducir que existe un buen funcionamiento de la herramienta, pues ya se ha mencionado con anterioridad la fama de los resultados de este SIG (ArcGIS).



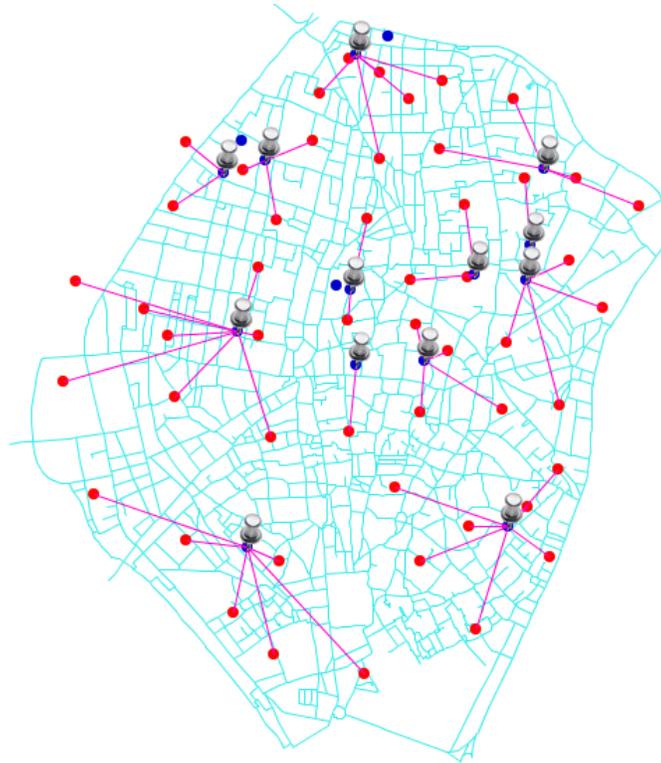
**Figura 29.** Solución de ArcGIS para maximizar asistencia con 3 servicios y 1000 de impedancia

Se compara de nuevo esta variante pero esta vez con 13 servicios y 1000 metros de impedancia, los 13 colegios que tratan de satisfacer el máximo peso de demanda posible. La solución de ArcGIS es la que se muestra en la Figura 30.



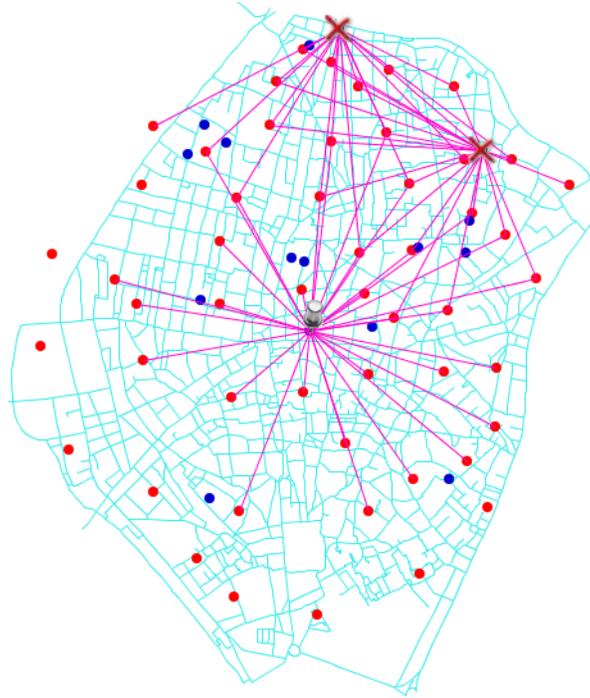
**Figura 30.** Solución de ArcGIS para maximizar asistencia con 13 servicios y 1000 de impedancia

Nuevamente gvSIG nos revela los mismos resultados que ArcGIS, resultando como se expone en la Figura 31.



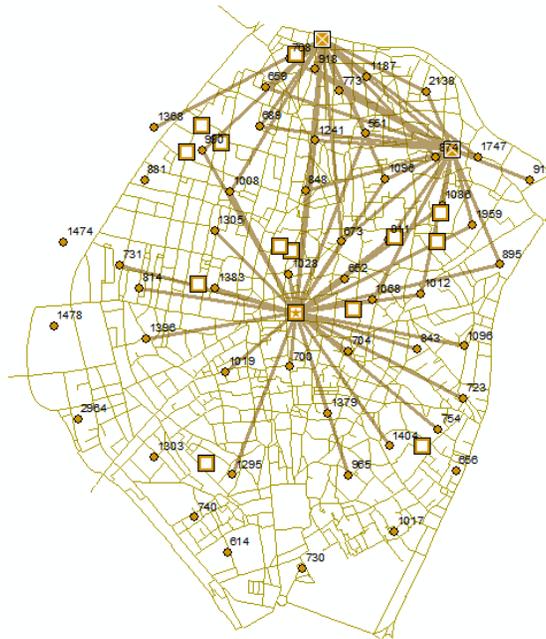
**Figura 31.** Solución de gvSIG para maximizar asistencia con 13 servicios y 1000 de impedancia

Además se quieren comprobar los resultados de la variante “Maximize Market Share” del problema de Localización-Asignación, haciendo una comparación similar con ArcGIS. El objetivo de maximizar mercado compartido es captar la máxima cuota del mercado posible con un número dado de los servicios que se especifique. La cuota de mercado total es la suma de todo el peso de demanda para los puntos de demanda válidos. Se muestra en la Figura 32 donde se seleccionaron un punto de servicio, dos puntos de competidores y con una impedancia de 1000 metros.



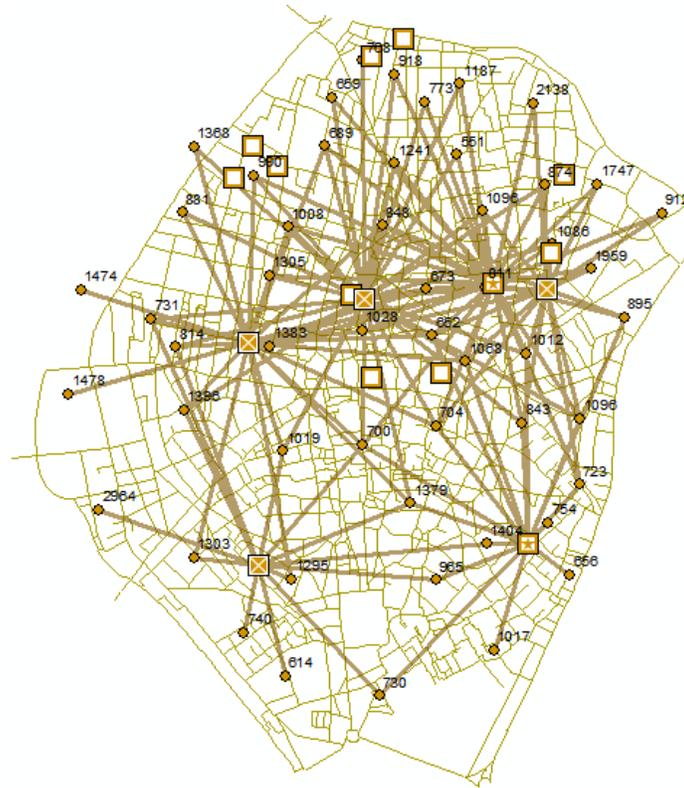
**Figura 32.** Solución de gvSIG para maximizar mercado compartido con 1 servicio, 2 competidores y 1000 de impedancia

Una vez más se prueba en ArcGIS con la misma variante y con los mismos parámetros que en gvSIG, devolviendo los mismos resultados (ver Figura 33).



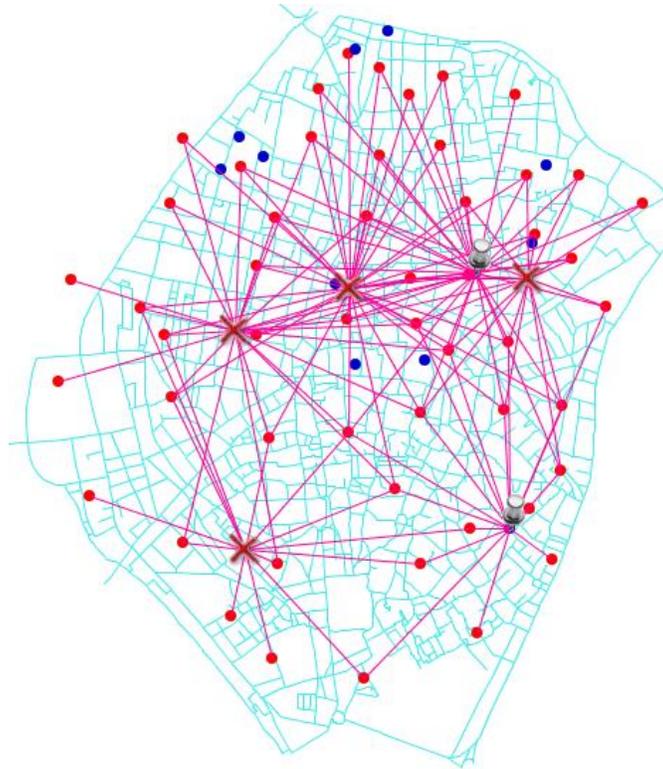
**Figura 33.** Solución de ArcGIS para maximizar mercado compartido con 1 servicio, 2 competidores y 1000 de impedancia

También se hace la comprobación de esta variante pero esta vez con 2 servicios, 4 competidores y 1000 metros de impedancia, los 2 colegios cuya tratan satisfacer máxima cuota de mercado posible. La solución de ArcGIS es la que se muestra en la Figura 34.



**Figura 34.** Solución de ArcGIS para maximizar mercado compartido con 2 servicios, 4 competidores y 1000 de impedancia

Nuevamente gvSIG nos revela los mismos resultados que ArcGIS, resultando como se expone en la Figura 35.



**Figura 35.** Solución de gvSIG para maximizar mercado compartido con 2 servicios, 4 competidores y 1000 de impedancia

Se realizaron múltiples comparaciones en los dos enfoques del problema que se podían comprobar con ArcGIS y los resultados fueron los mismos, lo que demuestra que la nueva herramienta añadida para el análisis de redes de transporte funciona bajo los mismos fundamentos que dicho software, y teniendo en cuenta que este es el Sistema de Información Geográfica más utilizado en la actualidad se deduce que los resultados son buenos.

## Conclusiones Parciales

En este capítulo se muestra al usuario los pasos que debe seguir para utilizar nuevos algoritmos para la operación localización-asignación para el análisis de redes de transporte, así como las capas necesarias para que funcione según lo que él quiera resolver. También se le explica como utilizar la herramienta, qué significa cada parámetro de los que se exigen y cómo se pueden interpretar los resultados visuales, además de mostrarle que tiene la opción de ver la solución en forma de tabla.

En el capítulo también se hace una comparación de los resultados de la herramienta con la misma herramienta en otro SIG para comprobar que la solución es acertada.

Se concluye que la nueva operación implementada es muy fácil de utilizar, tanto para un especialista como para un usuario común, pues está bien claro lo que representa cada parámetro y el análisis de la solución es muy fácil de entender, tanto gráficamente a través de líneas rectas para mostrar las asignaciones, como en forma de tabla mostrando el servicio, la demanda y la distancia en esa asignación.

Además se concluye que la operación Localización-Asignación insertada a gvSIG ofrece buenos resultados pues al comparar con ArcGIS (SIG más utilizado en la actualidad) muestra exactamente la misma solución.

## CONCLUSIONES GENERALES

Como resultado de esta investigación se encontraron los principales referentes teóricos de la teoría sobre redes y los modelos matemáticos de las operaciones sobre redes de transporte, además se implementó la operación Localización-Asignación utilizando principalmente el algoritmo genético para llegar a la solución. También se integró la nueva herramienta al módulo de análisis de redes de gvSIG. Se describe la secuencia de pasos empleada en el trabajo para integrar en gvSIG los algoritmos implementados, la cual puede servir de guía para futuras implementaciones de otros algoritmos. Se comprueban los resultados obtenidos con otro de los SIG más reconocidos en el mundo, ArcGIS, que si implementa esta operación, y se llega a la conclusión de que se obtienen buenas soluciones.

Finalmente se cumplió el con el objetivo general de la investigación, pues se incorporaron nuevos algoritmos para la operación localización-asignación para el análisis de redes de transporte.

## RECOMENDACIONES

- Implementar todas las variantes posibles del problema Localización-Asignación para que se pueda realizar un análisis más completo al utilizar esta operación sobre redes de transporte.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANGUIX, A. 2009. "gvSIG: un proyecto global Casos de éxito". *Primera jornada de Latinoamérica y el caribe de usuarios de gvSIG*. Buenos Aires, Argentina.
- ANGUIX, A. & CARRIÓN, G. 2005. "gvSIG: Soluciones Open Source en las tecnologías espaciales". *GISPLANET 2005*.
- AUSTIN, C. M. 1974. "The evaluation of urban public facility location: An alternative to benefitcost analysis". *Geographical Analysis*. Columbus: The Ohio State University Press
- BERRY, B. J. L., VALVERDE, R. M., LAJO, L. R. & SÁEZ, H. C. 1971. "Geografía de los centros de mercado y distribución al por menor", Vicens-Vives.
- BOSQUE SENDRA, J. 2000. "Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos". *Estudios geográficos*, 61, 567-598.
- BOSQUE SENDRA, J. & MORENO JIMÉNEZ, A. 1990. "Facility location analysis and planning: a GIS approach". *EGIS'90. First European Conference on Geographical Information Systems*.
- BOSQUE SENDRA, J. & MORENO JIMÉNEZ, A. 2004a. El uso de SIG para localizar equipamientos e instalaciones. *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Madrid: Ra-ma, 103-120.
- BOSQUE SENDRA, J. & MORENO JIMÉNEZ, A. 2004b. La localización óptima como problema: cuestiones teóricas y metodológicas. *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Madrid: Ra-ma, 3-16.
- BUZAI, G. & BAXENDALE, C. 2006. Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. In: BUENOS AIRES, L. E. (ed.). Buenos Aires.
- DENSHAM, P. J. 1991. Spatial decision support systems. *Geographical information systems: Principles and applications*, 1, 403-412.
- DORIGO, M. 1992. Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy*.
- DORIGO, M., MANIEZZO, V. & COLORNI, A. 1996. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 26, 29-41.
- EASTMAN, J. R. 2007. La verticalización del SIG. *XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Luján.
- FEO, T. A. & RESENDE, M. G. 1989. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters*, 8, 67-71.

- FEO, T. A. & RESENDE, M. G. 1995. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, 6, 109-133.
- FOGEL, D. B. 1995. *"Evolutionary Computation"*, IEEE Press.
- GLOVER, F. & LAGUNA, M. 1997. *"Tabu search"*, Springer.
- GOLDBERG, D. E. 1989. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning". *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.*
- GUTIERREZ PUEBLA, A. J. 1998. "Redes, espacio y Tiempo" *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. Madrid.
- GUTIERREZ PUEBLA, J. & GOULD, M. 1997. "SIG: Sistemas de Información Geográfica" Madrid.
- KOZA, J. R. 1992. *"Genetic Programming"*, MIT Press.
- MCALLISTER, D. M. 1976. "Equity and efficiency in public facility location". *Geographical Analysis*. Columbus: The Ohio State University Press.
- MENDOZA GARCÍA, B. 2001. Uso del sistema de la colonia de hormigas para optimizar circuitos lógicos combinatorios.
- MORENO JIMÉNEZ, A. 1995. Planificación y. gestión de servicios a la población desde la perspectiva territorial: algunas propuestas metodológicas. *Boletín de la Asociación de geógrafos españoles*, 115-134.
- MORENO JIMÉNEZ, A. 2004. Modelos de localización óptima de instalaciones y equipamientos. *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Madrid: *Ra-ma*, 53-101.
- OSMAN, I. H. & KELLY, J. P. 1996. *"Meta-heuristics: theory and applications"*, Springer.
- PRESSMAN, R. S. 2005. Software engineering: a practitioner's approach. *Nova lorque:Mcgraw-hill*.
- PUEBLA, J. G. 2003. Infraestructuras, redes y dinámicas de transporte. *Servicios y transportes en el desarrollo territorial de España*.
- REVELLE, C. & SWAIN, R. 1970. "Central Facility Location" . *Geographical Analysis*. Columbus:The Ohio State University Press.
- SALADO GARCÍA, M. J. 2004. Localización de los equipamientos colectivos, accesibilidad y bienestar social. *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Madrid: *Ra-ma*, 17-51.
- STEVENS, B. H. 1985. "Location of economic activities: the JRS contribution to the research literature". *Journal of Regional Science*, 25, 663-685.