

Método semiautomático para la creación de redes viales planas a partir de capas vectoriales mediante gvSIG y sextante

Resumen

Se propone un método para la creación de redes viales planas mediante gvSIG y Sextante, con base en capas vectoriales de tipo lineal que contengan las manzanas de la zona de interés. Se elaboró el modelo matemático y cartográfico correspondiente a tres métodos: la triangulación de Delaunay, la teselación de Voronoi y la interpolación por vecino más cercano, técnica en la que se basa el método propuesto. Los tres métodos se usaron para construir la red vial de cuatro zonas de prueba, se registró el tiempo empleado, tanto en operaciones automáticas como en edición manual, y finalmente se compararon los resultados contra los obtenidos mediante la elaboración manual de la red. Todo el trabajo se replicó en cuatro sistemas operativos libres y dos privativos, mediante un equipo con procesador doble núcleo, 2.31 GHz y 1.75 GB de RAM.

Palabras clave: redes viales, teselación de Voronoi, triangulación de Delaunay, gvSIG, Sextante.

Agradecimientos

El autor agradece de manera muy especial a Christina Hackl y Yésica Martín por su confianza y patrocinio, y a Andrea Mariño, por su permanente e invaluable apoyo.

Autor

Ing. Edwin Alberto Amado Barón (e.a.amado.baron@gmail.com)
Investigador Independiente

1. Introducción

Entre las innumerables aplicaciones que tienen los SIG actualmente, se encuentra el análisis de redes; este campo incluye, entre otras, a las redes viales. La importancia concedida al análisis de redes viales ha llevado a la creación de programas específicos para su tratamiento, como TransCad (Caliper, 2010), RoutingMaps (Rodríguez, 2007) y la extensión para ArcGIS Network Analyst (Barrientos, 2007), entre las opciones privativas; cabe destacar asimismo, entre las iniciativas libres, las extensiones desarrolladas para gvSIG, tanto no oficiales (Ubeda, 2008) como oficiales (gvSIG, 2009). Por supuesto, cualquier análisis de redes requiere una capa vectorial de tipo línea que contenga los ejes de las vías. Hasta hace apenas tres años no existían programas informáticos que realizaran la extracción automática de dichos ejes (Zhang y Baltsavias, 2007) y no hay evidencias de que esto haya cambiado. En la actualidad la mayoría de las redes viales se crean manualmente, a partir de capas vectoriales y ráster; sin embargo, según Doucette et al. (2004), el volumen de datos que recogerán los sensores remotos de la próxima generación sobrepasaría la capacidad de los analistas para realizar la extracción con base en capas ráster; de ahí el interés que existe en el medio académico por desarrollar métodos que permitan automatizar la labor. El presente trabajo explora la viabilidad de desarrollar un método para la creación de redes viales sin componente en altura (planas), mediante gvSIG y Sextante, tomando como insumo capas vectoriales que contengan las manzanas de la zona de interés. Se atendieron los aspectos operativos de cada método, no sus algoritmos internos. En la consulta bibliográfica solo se tuvieron en cuenta documentos de acceso gratuito. La explicación de cada método no se basó en formulaciones matemáticas rigurosas. Las principales limitaciones fueron la falta de documentación sobre los algoritmos que emplean gvSIG y Sextante, y el uso de un solo equipo de cómputo, que impide generalizar los resultados obtenidos.

2. Metodología

Se buscó documentación en castellano, inglés, francés y portugués, sobre métodos para la creación de redes viales y con base en ello se elaboraron los modelos matemáticos y cartográficos, así como una breve explicación para cada técnica de interés. Se utilizó el motor de búsqueda de Google en sus versiones búsqueda avanzada (GBA), Google Académico (GA) y Google Libros (GL), debido a la cantidad de resultados que se podían obtener, y la base de datos de ScienceDirect (SD), por su carácter predominantemente científico. Para explicar cada método se utilizaron dos aproximaciones: una definición informal y una explicación gráfica. A menos que se indique lo contrario, todas las figuras, gráficas y tablas fueron elaboradas por el autor. Se utilizó un equipo AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core, con velocidad de 2.31 GHz y memoria RAM de 1.75 GB. Se trabajó sobre más ambientes libres (cuatro), que propietarios (dos) debido a la convicción del autor sobre la importancia de apoyar el software libre; no obstante, se utilizaron dos ambientes privativos, debido a la gran difusión que aún tienen. Para definir los sistemas libre se buscó en internet cuáles son las distribuciones más populares de GNU/Linux. Luego se consultó el modelo matemático y cartográfico diseñado para cada método, con el fin de definir las herramientas SIG requeridas, se elaboró una lista de ellas, se revisaron las que se encuentran disponibles en cada versión de gvSIG considerada (1.9, 1.9 alpha y OADE, incluido Sextante en los tres casos) y por último se ensayaron las funciones de interés para cada método.

Se utilizó el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS (EPSG 3116), definido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi como el oficial para Colombia desde 2004 (IGAC, 2004). Mediante gvSIG OADE y usando funciones de edición CAD, se crearon manzanas rectangulares de 80 m. por 100 m., con un ancho de vía de 10 m., separadores de 3 m. por 430 m. y una inclinación de 45°; a cada manzana se le asignó un código identificador. Para cada una de las cuatro zona de prueba se definió una cantidad diferente de manzanas (ver Tabla 3), con el fin de investigar la variación del tiempo total de proceso según la cantidad de manzanas operadas. La comparación de los resultados se realizó, por un lado, mediante una gráfica que muestra el tiempo total empleado por cada método, en función del sistema operativo y la cantidad de manzanas tratadas, y por el otro, a través de una tabla que resume algunas medidas estadísticas (suma, recuento, media, mínimo, máximo, ámbito y desviación estándar), calculadas independientemente para los tramos mayor (110 m.) y menor (90 m.) de las redes creadas mediante IVC (único método funcional) y digitalización manual (optimizada mediante la función separar polilíneas en nodos), ambos en Linux Mint. Puesto que no se encontró una herramienta para obtener el centroide de líneas, en el método de Delaunay se asumió que la duración de dicha operación era igual a la del cálculo de centroides de polígonos (suposición más conservadora).

3. Resultados

3.1. Consulta bibliográfica

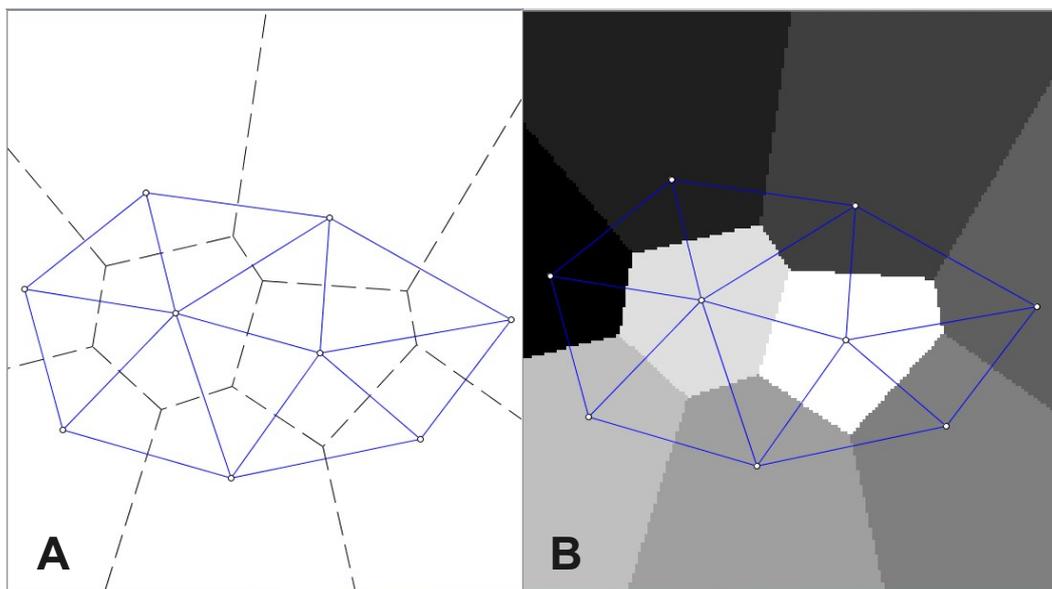
Durante la consulta bibliográfica se obtuvieron 8934 resultados, de los cuales se revisaron los más relevantes (476), para descargar finalmente 80 documentos: 8 en castellano, 54 en inglés, 8 en francés y 10 en portugués. Entre los métodos que permiten obtener redes viales, el 95% de los hallados (36 de 38) trabaja sobre capas ráster: mapas escaneados (Gold y Snoeyink, s.f.; Mioc et al., s.f.); imágenes satelitales como SPOT (Roux, et al., s.f.), QuickBird (Wang et al., s.f.) e Ikonos (Zhang y Couloigner, 2006); fotografías aéreas (Koutaki y Keiichi, 2003); sensores como Lidar (Zhu y Mordohai, s.f.), MOMS-2P (Wiedemann et al., s.f), y Radar (Amberg, 2005). Para tener una idea sobre las aproximaciones más importantes al tema, se puede consultar Mena, J., 2003, Idbraim, 2009 y Zanin, 2004. A pesar de su notable desarrollo, los métodos anteriores imponen algunas limitaciones: a) el costo relativamente alto que aún tienen las imágenes de sensores especializados. b) los conocimientos que demandan la gran mayoría de los métodos propuestos: matemática vectorial (Gonçalves y dal Poz, 2001), estadística avanzada

(Anil y Natarajan, 2010), redes neuronales (Yuan et al., s.f.; Doucette et al., 2004), lógica difusa (Bonneton, s.f.) y, desde luego, análisis digital de imágenes avanzado (Ruskoné, 1996; Farah, 1998; Zhang y Couloigner, 2006). Los dos factores citados dificultan la difusión masiva de las técnicas en cuestión entre la comunidad de usuarios de gvSIG; sin embargo, las administraciones locales podrían convertirse en valiosas fuentes de información (Cores, et. al., s.f), si se emplean los mapas callejeros digitales que ellas poseen, con el fin de obtener los ejes viales. Según la consulta realizada, las principales técnicas usadas para crear redes viales a partir de mapas callejeros son la teselación de Voronoi, la triangulación de Delaunay y la interpolación por vecino más cercano (Cores et al., s.f., p. 2). La primera se encuentra detalladamente explicada en Gómez (2007), la segunda se expone de manera general en Cores et al. (s.f.) y sobre la tercera no se encontró documentación. El objetivo del trabajo fue implementar y documentar las tres técnicas, compararlas y determinar la que ofrecía mejores perspectivas, para proponer así una posible línea de trabajo a la comunidad mundial de usuarios de gvSIG.

3.2. Explicación de los métodos de interés

Si se toma una muestra de puntos, un polígono de Voronoi se compone de todos los que están más cerca a uno de ellos, que se toma como base, que a cualquier otro; el conjunto de todos los polígonos generados es lo que se llama un diagrama de Voronoi, cuyo procedimiento de creación puede resumirse así: a) se une cada punto de la muestra a su vecino más próximo, mediante segmentos de recta (lo cual genera una triangulación); b) se construyen las mediatrices de los segmentos de rectas recién creados; c) se unen todas las mediatrices y con ellas se forman los polígonos que delimita el área de influencia de cada punto de la muestra. Bajo ciertas restricciones (Suárez, 2001, p. 11 – 14) la triangulación de Delaunay se puede obtener uniendo todos los puntos de la muestra con sus vecinos más cercanos. Entre las propiedades más importantes del diagrama de Voronoi están que es ilimitado (Esperança y Roma, s.f.) y que es único (Sharifzadeh, 2007). Para una exposición amplia sobre el tema se puede consultar a Suárez (2001) y a Roberts et al. (2005). La interpolación por vecino más cercano crea un diagrama de Voronoi, pero en formato ráster. El método IVC se basa en dicha interpolación, ejecutada sobre las capas que contienen las manzanas de interés (ya sea como líneas o como puntos equiespaciados). La Figura 1 muestra la triangulación de Delaunay acompañada del diagrama de Voronoi (A) y de la interpolación por vecino más próximo (B), para una muestra de nueve puntos. Como se ve, la triangulación de Delaunay, el diagrama de Voronoi y la interpolación por vecino más cercano tienen una estrecha relación geométrica.

Figura 1. Triangulación de Delaunay, diagrama de Voronoi e interpolación



3.3. Definición de funciones

A partir de la consulta bibliográfica realizada, se diseñaron los modelos matemáticos y cartográficos correspondientes a los tres métodos vectoriales hallados: la triangulación de Delaunay, la teselación Voronoi y la interpolación por vecino más cercano (ver Anexo); adicionalmente se creó un modelo para la preparación de las capas de entrada. Con base en los modelos diseñados, se elaboró una lista con las funciones requeridas, junto con los programas que las ofrecen, como se muestra a continuación.

Tabla 1. Funciones de interés

N°	Descripción	Proceso que la requiere*				Versión que la ofrece					
		PC	Dy	Vr	IVC	1.9 + Sextante		1.9 alpha + Sextante		OADE + Sextante	
						D**	F**	D	F	D	F
1	Área de influencia	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Eliminar huecos	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Polígono a línea	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Juntar	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	Líneas a puntos	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Puntos a líneas		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Líneas a polígonos		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Triangulación de Delaunay		✓			✓	-	✓	✓	✓	✓
9	Teselación de Voronoi			✓		✓	-	✓	✓	✓	-
10	Diferencia		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Separar polilínea en nodos		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Centroide de líneas		✓			-	-	-	-	-	-
13	Interpolación por vecindad				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Enlace espacial			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	Disolver			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	Ráster a polígonos				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17	Corrección líneas (clean)				✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
	Total	5	8	4	4	16	13	16	16	16	15

*PC: Preparación de las capas de prueba; Dy: triangulación de Delaunay; Vr: teselación de Voronoi.

**D: Disponible; F: Funcional

3.4. Herramientas informáticas

Las distribuciones elegidas para trabajar sobre entornos libres fueron las que, según Distrowatch (2010), son las más populares de GNU/Linux, en su orden: Ubuntu (Ub), Fedora (Fd), openSUSE (oS) y Linux Mint (LM). Entre los sistemas privativos, se trabajó con Windows XP y Windows 7, dejando de lado la versión Vista, debido a las amplias críticas recibidas por ella (Wikipedia, 2010). En la tabla se pueden ver las características de los sistemas instalados.

Tabla 2. Sistemas operativos usados

Tipo	Nombre	Versión	Sobrenombre	Kernel	Entorno de escritorio	Año de lanzamiento
Libre	Ubuntu	9.10	Karmic Koala	2.6.31.14-generic	GNOME 2.28.1	2009
	Fedora	12	Constantine	2.6.31.5-127.fc12.i686	GNOME 2.28.0	2009
	openSUSE	11.2	-	2.6.31.12-0.2-default	GNOME 2.28.2	2009
	Linux Mint	8	Helena	2.6.31.14-generic	GNOME 2.28.1	2009
Privativo	Windows XP	SP3	-	NT 5.1.2600*	-	2001*
	Windows 7	-	-	NT 6.1.7600*	-	2009

* Fuente: Wikipedia (2010), p. 4.

Se instalaron gvSIG 1.9, 1.9 alpha y OADE 2010, junto con las extensiones NavTable 0.4 y Sextante 0.3; se aumentó hasta 1400 MB la memoria RAM de todas las versiones, junto con el nivel de prioridad de las extensiones de interés – Wizard de Geoprocesamiento de OADE (100), el modelador (500) y las herramientas de Sextante (500), entre otras – . Debido a su estabilidad y ergonomía (atajos por teclado), se usó gvSIG OADE para elaborar las zonas de prueba, probar los métodos de Delaunay e IVC y elaborar las redes manualmente; para ensayar la teselación de Voronoi se utilizó la versión 1.9 alpha, puesto que fue la única en la que la citada herramienta resultó funcional con un número aceptable de puntos. Se crearon los modelos correspondientes en Sextante (ver Anexo) y se realizaron las tareas mediante procesos por lotes; se ejecutaron pruebas para hallar la mejor combinación entre distancia fuzzy y longitud de nodos colgantes (función Clean, método IVC): el resultado fue de 9 m. y 0.3 m. respectivamente.

3.5. Zonas de prueba

En la siguiente tabla se muestran las características de las cuatro zonas de prueba creadas.

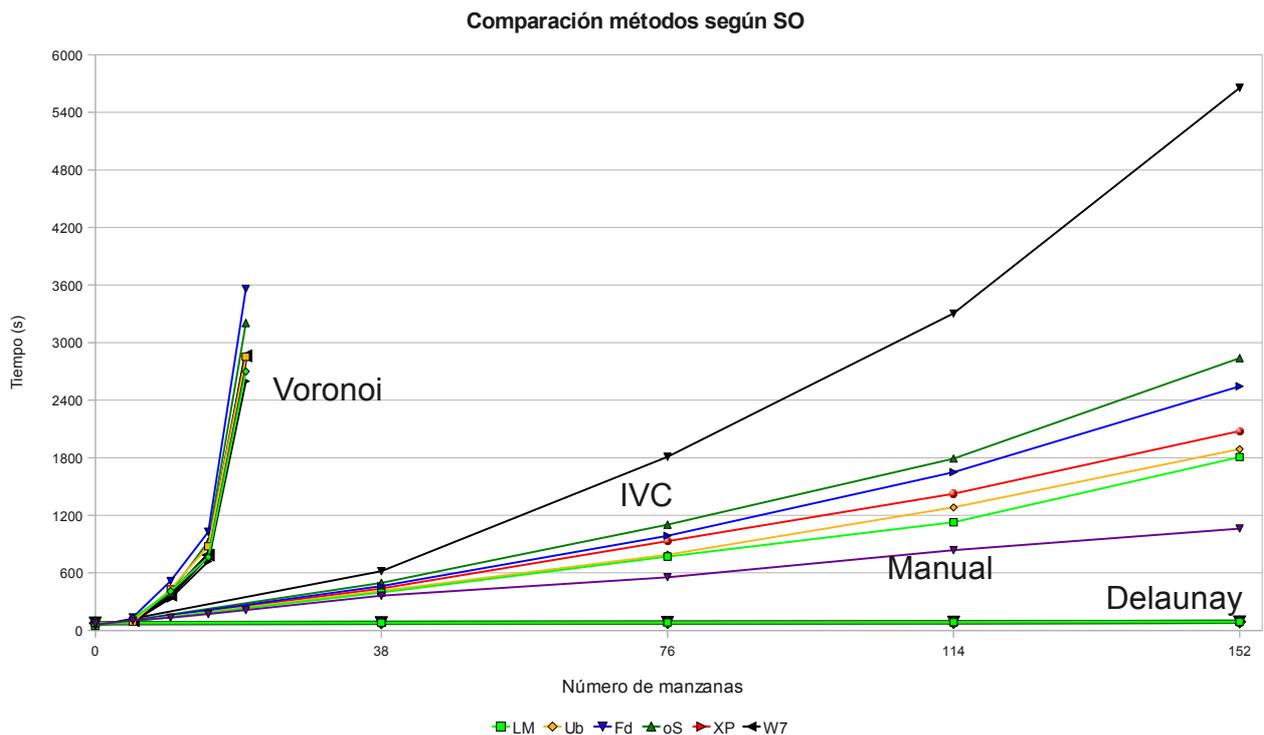
Tabla 3. Características zonas de prueba

Zona	Coordenadas de los límites				Tamaño		Número de manzanas
	Superior (m)	Inferior (m)	Izquierda (m)	Derecha (m)	Alto (m)	Ancho (m)	
1	956.10	-14.14	-654.06	314.07	970.24	968.13	38
2	1267.23	-14.14	-654.06	642.06	1281.37	1296.12	76
3	1594.62	-14.14	-654.06	952.58	1608.76	1606.64	114
4	1905.75	-14.14	-654.06	1263.71	1919.89	1917.77	152

3.6. Comparación métodos

En la gráfica que se muestra a continuación se exponen los tiempos totales empleados por cada método, según el número de manzanas operadas y el sistema operativo usado.

Figura 2. Tiempos totales de cada método según sistema operativo



En la siguiente tabla se aprecian las medidas estadísticas obtenidas para los dos tramos de red (90 m. y 110 m.), según zona de prueba y método utilizado: manual (M) e IVC.

Tabla 4. Descripción estadística tramos analizados

Tramo	Medida Estadística	Zona							
		1		2		3		4	
		M	IVC	M	IVC	M	IVC	M	IVC
90 m	Suma	4317,282	4346,776	7922,737	7992,805	12243,846	12351,585	15862,462	15978,619
	Recuento	48	48	88	88	136	136	176	176
	Media	89,943	90,558	90,031	90,827	90,028	90,820	90,128	90,788
	Máximo	90,786	92,790	92,280	99,095	91,946	94,917	93,322	97,635
	Mínimo	88,699	87,435	88,295	83,629	86,898	84,510	87,422	84,942
	Ámbito	2,087	5,355	3,986	15,467	5,048	10,407	5,900	12,693
	Desv. Est.	0,568	1,202	0,722	1,878	0,863	1,796	1,189	1,477
110 m	Suma	4943,804	4814,706	9470,397	9465,235	14211,567	14223,146	18962,845	18946,346
	Recuento	45	45	86	86	129	129	172	172
	Media	109,862	109,425	110,121	110,061	110,167	110,257	110,249	110,153
	Máximo	111,522	114,825	111,653	116,200	113,071	118,794	115,359	118,794
	Mínimo	107,895	105,803	108,236	104,368	108,062	102,549	106,522	104,387
	Ámbito	3,627	9,022	3,418	11,831	5,009	16,245	8,837	14,407
	Desv. Est.	0,754	2,367	0,783	2,940	0,988	3,352	1,268	2,786

4. Discusión

En la Figura 2 se puede ver que el método más rápido es la triangulación de Delaunay. El IVC es más lento que la digitalización manual, debido a que la corrección final de las redes se hizo manualmente, en vez de usar la extensión de topología (debido a problemas de estabilidad). Aunque Gómez (2007) menciona la teselación de Voronoi como un método viable para creación de redes viales, se pudo determinar que éste emplea más tiempo que los demás por un factor cercano a 60 (por esto se utilizaron menos manzanas en él); además, mediante ensayos sobre capas adicionales a las usadas como zonas de prueba, se verificó que la calidad de los resultados alcanzados mediante Voronoi, es muy sensible a la variación de tamaño y forma de las manzanas.

Aunque para los fines de comparación buscados, la escala de la Figura 2 no lo permite apreciar, el rendimiento del método de Delaunay es prácticamente igual en todos los sistemas operativos. La teselación de Voronoi fue más eficiente sobre Windows XP y el método IVC tuvo su mejor desempeño en Linux Mint. Como se ve en la Tabla 4, la media y la desviación estándar de los tramos creados mediante IVC, permiten inferir que la calidad de sus resultados es aceptable, comparada con la creación manual de la red.

5. Conclusiones

El método de Voronoi no es funcional debido a su excesivo tiempo de proceso, a la pequeña cantidad de manzanas sobre las que puede operar y a que la calidad de sus resultados depende de la uniformidad en el tamaño y la forma de las manzanas de interés; aunque la triangulación de Delaunay no se pudo implementar por falta de una función que permita obtener el centroide de líneas, resulta notable la rapidez de este método y su independencia ante el sistema operativo usado. El método IVC es más lento que la elaboración manual de la red; para cambiar esta situación, se podría ensayar el uso de la extensión de topología (estable) para realizar la corrección final de la red. La calidad de los resultados obtenidos a través del IVC es aceptable en comparación con la elaboración manual de la red. Mediante regresión por mínimos cuadrados, se encontró que la forma en que varía el tiempo de proceso de todas las técnicas analizadas, depende del número de manzanas operadas según una función potencial de entre segundo y tercer grado.

6. Referencias bibliográficas

Amberg, Virginie (2005), Amélioration de l'extraction de routes par un algorithme contextuel. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000291/>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 28 noviembre de 2006.

Anil, P.N. y Natarajan, S. (2010), "Automatic road extraction from high resolution imagery based on statistical region merging and skeletonization", *International Journal of Engineering Science and Technology* 2 (3), pp. 165-171. Disponible en: <http://www.ijest.info/docs/IJEST10-02-03-08.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Barrientos, Miguel Ángel (2007), Network Analyst: el analista de redes desde ArcGIS 9.2 http://www.gabrielortiz.com/descargas/Network_Analyst_9_2.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Bonnefon, Régis (s.f.), Extraction d'objets cartographiques à partir d'images de télédétection : possibilité d'application à la mise à jour de Systèmes d'Information Géographique. http://www.irit.fr/ACTIVITES/EQ_TCI/EQUIPE/bonnefon/these.pdf. Fecha consulta: abril 2010 fecha actualización sitio web: no disponible.

Caliper (2010), Versiones TransCad. <http://www.caliper.com/TransCAD/versiones.htm>. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Cores, et al. (s.f.), Generación automática de redes de transporte a través de datos cartográficos. Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla, España. http://www.esi2.us.es/GT/docs/cit2008_cores.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible

dal Poz, Aluir, Agouris, Peggy (2000), "Extração semi-automática de rodovias usando programação dinâmica", *Anais do II Workshop Brasileiro de GeoInformática GeoInfo 2000*, São Paulo, Brasil, pp. 3-9. <http://www.tecgraf.puc-rio.br/geoinfo2000/anais/005.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 1 junio de 2000.

DistroWatch, (2010), Las distribuciones más populares de Linux. <http://distrowatch.com/>. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Doucette, Pete et. al. (2004), "Automated road extraction from high resolution multispectral imagery", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 70 (12), pp. 1405 -1416. https://www.asprs.org/publications/pers/2004journal/december/2004_dec_1405-1416.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Esperança, Claudio y Roma, Paulo (s.f.), Geometria Computacional: Triangulações. <http://orion.lcg.ufrj.br/gc/download/Triangulacoes.ppt>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 30 julio de 2001.

Farah, Noureddine (1998), Extraction et evaluation du réseau routière urbain à partir des images satellitaires : développement d'algorithmes. Disponible en: http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape17/PQDD_0010/MQ35674.pdf. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: 26 febrero de 2008.

Gold, Christopher y Snoeyink, Jack (s.f), A one-step crust and skeleton extraction algorithm. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.12586&rep=rep&type=pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Gómez, Emilio (2007), Voronoi centerlines skeleton. http://es.wikiedia.org/wiki/Archivo:Voronoi_centerlines_skeleton.gif. Fecha de consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 13 de noviembre de 2007.

Gonçalves, Tatiana y dal Poz, Aluir (2001), Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação. <http://www.geoinfo.info/geinfo2002/papers/Sussel.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

gvSIG (2009), Manual de usuario de la extensión de redes gvSIG 1.9. <http://jornadas.gvsig.org/projects/gvsig-desktop/official/extensiones/>. Fecha consulta: junio 2010, fecha actualización sitio web: 1 junio de 2010.

Idbraim, Soufiane (2009), Méthodes d'extraction de l'information spatiale et de classification en imagerie de télédétection : applications à la cartographie thématique de la région d'Agadir (Maroc). <http://thesesups.ups-tlse.fr/553/>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 1 diciembre de 2009.

IGAC (2004), Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. http://www2.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/DocumentosMAGNA.htm. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Kareaga, Iñaki (2008), Extensión para redes hídricas. <http://www.gvsig.org/web/plugins/downloads/extwaternetwork1>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 12 noviembre de 2008.

Koutaki, Go y Uchimura, Keiichi (2003), Automatic road extraction based on cross detection in suburb. Disponible en: http://navi.cs.kumamoto-u.ac.jp/english/publications/pdf/int_thesis/2004-02.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 13 octubre de 2004.

Mena Berríos, Juan (2003), "State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification", Pattern Recognition Letters, 24, pp. 3037 –3058. http://www2.uah.es/juan_mena/curriculo.htm. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 1 noviembre de 2010.

Mioc, et al., (s.f.), An algorithm for centreline extraction using natural neighbour interpolation. Disponible en: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/522.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Roberts et al. (2005), "Street centreline generation with an approximated area Voronoi diagram", en Fischer, Peter (Editor). Developments in spatial data handling. Springer, New York. pp 436 – 446.

Rodríguez, Alejandro (2007), "Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas", XI Congreso de Ingeniería de Organización, Madrid, Septiembre 5 - 7, 2007. Disponible en: http://personalesupv.es/arodrigu/IDI/CIO_2007_RodriguezA.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Roux, Michel et al. (s.f.), Recalage Image SPOT : carte routière. http://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part3/384_XXIX-part3.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: 12 abril de 2010.

Ruskoné, Renaud (1996), Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données cartographiques. http://recherche.ign.fr/labs/matis/pdf/theses/these_ruskone.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Sharifzadeh, Mehdi (2007), Spatial query processing using Voronoi diagrams. <http://digitallibrary.usc.edu/assetserver/controller/view/search/etd-Sharifzadeh-20070416>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Suárez Rivero, José Pablo (2001), Estructuras de datos tipo grafo en los algoritmos de refinamiento y desrefinamiento basados en la bisección por el lado mayor: aplicaciones. <http://bdigital.ulpgc.es/digital/visualizar/propiedad.php?accion=tesis&id=234&vol=no>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Ubeda, Miguel (2008), Herramienta de análisis de redes en un sistema de información geográfica. https://forxa.mancomun.org/frs/?group_id=71. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Wang, Ruisheng et. al, (s.f.), Extraction of road networks using pan-sharpened multispectral and panchromatic QuickBird images. <http://www.geoict.yorku.ca/past-publications/test-page/papers/past-researchers-papers/Extraction%20of%20Urban.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Wiedemann, Christian et al. (s.f), Automatic extraction and evaluation of road networks from MOMS-2P imagery. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.48.5837>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Wikipedia (2010). Artículo Microsoft Windows. <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=38307768>. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: 1 mayo 2010.

Yuan, Jiangye et al. (s.f.), Automatic road extraction from satellite imagery using LEGION networks. Disponible en: <http://www.cse.ohio-state.edu/~dwang/papers/YWWYL.ijcnn09.pdf>. Fecha consulta abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Zanin, Rodrigo (2004), Metodologia automática para extração de cruzamentos de rodovias em imagens de alta resolução. http://www4.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_zain_rb.pdf. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Zhang, Chunsun y Baltsavias, Manuella (2007), Automatic road extraction by integrated analysis of images and GIS data. <http://www.asprs.org/publications/proceedings/tampa2007/0084.pdf>. Fecha consulta: abril 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Zhang, Qiaoping y Couloigner, Isabelle (2006), Automatic road change detection and gis updating from high spatial remotely-sensed imagery. http://www.hku.hk/dupad/asiagis/fall03/Full_Paper/Zhang_Qiaoping.pdf. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

Zhu, Qihui y Mordohai, Phillippos (s.f.), A minimum cover approach for extracting the road network from airborne LIDAR data. http://www.cs.stevens.edu/~mordohai/public/Zhu_MinCoverRoadsLidar09.pdf. Fecha consulta: mayo 2010, fecha actualización sitio web: no disponible.

ANEXO. MODELOS MATEMÁTICOS Y CARTOGRÁFICOS

Figura 3. Leyenda modelos matemáticos y cartográficos

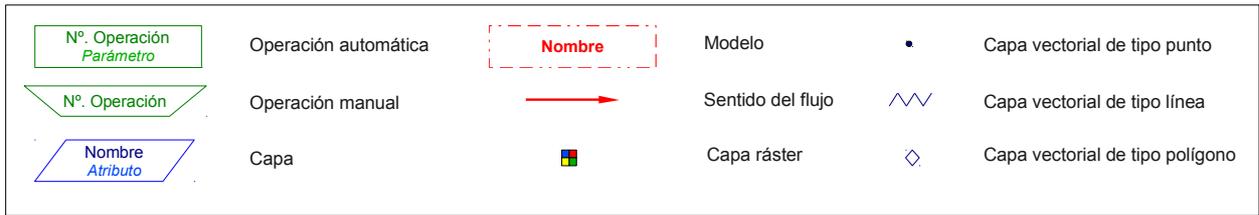


Figura 4. Modelo preparación capas

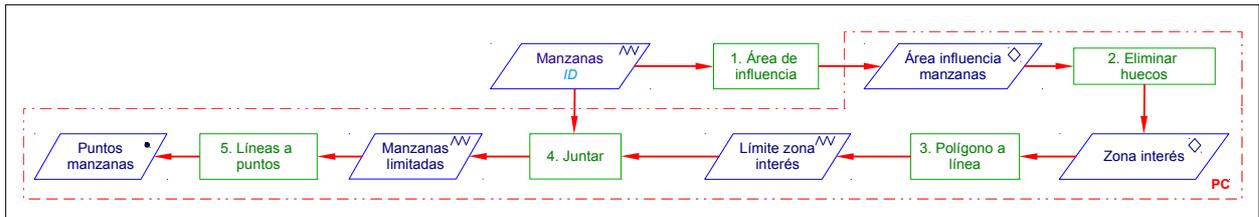


Figura 5. Modelo triangulación de Delaunay

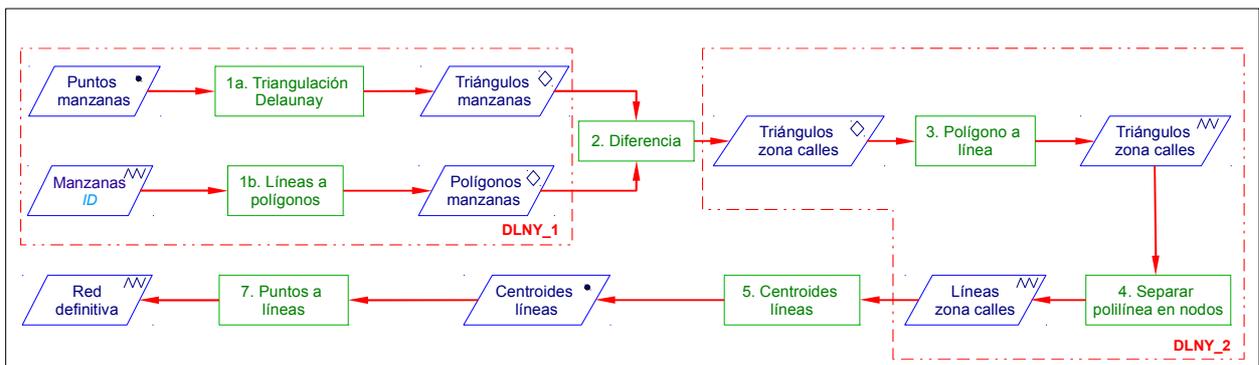


Figura 6. Modelo teselación de Voronoi

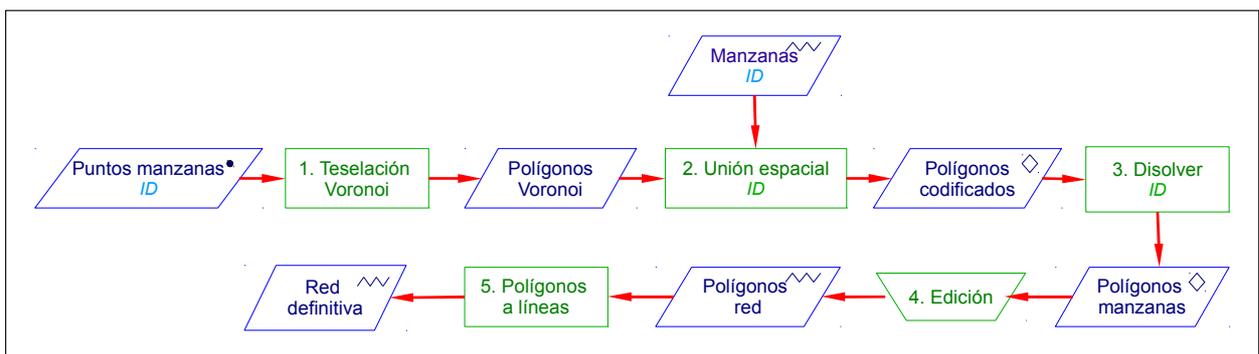


Figura 7. Modelo método IVC

