Arranz Justel, J.J., Sánchez Tamargo, D. y Novoa Plasencia, A. (2010): Estudio de procesos y herramientas aplicables a la generalización vectorial de entidades lineales. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 20-33. ISBN: 978-84-472-1294-1

ESTUDIO DE PROCESOS Y HERRAMIENTAS APLICABLES A LA GENERALIZACIÓN VECTORIAL DE ENTIDADES LINEALES

Arranz Justel, J.J.[1], Sánchez Tamargo, D.[2] y Novoa Plasencia, A.[3]

(1) Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur Carretera de Valencia km 7.5 C.P.28031 Madrid, josejuan.arranz@upm.es

(2) Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur Carretera de Valencia km 7.5 C.P.28031 Madrid, david.stamargo@alumnos.upm.es

(3) Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur Carretera de Valencia km 7.5 C.P.28031 Madrid, andres.novoa.plasencia@alumnos.upm.es

RESUMEN

Se presenta un estudio de algoritmos que ofrecen resultados óptimos en cuanto a lo que a la generalización vectorial de entidades lineales se refiere. Este estudio se encuentra dentro del marco del proyecto CENIT España Virtual para la investigación de nuevos algoritmos de procesado cartográfico.

La generalización constituye uno de los procesos cartográficos más complejos, cobrando su mayor importancia a la hora de confeccionar mapas derivados a partir de otros a mayores escalas. La necesidad de una generalización se hace patente ante la imposibilidad de representar la realidad en su totalidad, teniendo ésta que ser limitada o reducida para la posterior elaboración del mapa, manteniendo, eso sí, las características esenciales del espacio geográfico cartografiado. La finalidad, por tanto, es obtener una imagen simplificada pero representativa de la realidad.

Debido a que casi el ochenta por ciento de la cartografía vectorial está compuesta por elementos lineales, la investigación se centra en aquellos algoritmos capaces de procesar y actuar sobre éstos, demostrando además que su aplicación puede extenderse al tratamiento de elementos superficiales ya que son tratados a partir de la línea cerrada que los define.

El estudio, además, profundiza en los procesos englobados dentro de la exageración lineal que pretenden destacar o enfatizar aquellos rasgos de entidades lineales sin los que la representatividad de nuestro mapa se vería mermada. Estas herramientas, acompañadas de otras más conocidas como la simplificación y el suavizado de líneas, pueden ofrecer resultados satisfactorios dentro de un proceso de generalización.

Palabras Clave: cartografía, generalización vectorial, entidades lineales, exageración.

ABSTRACT

A study of algorithms that provide optimal results in vector generalization is presented. This study is within the CENIT project framework of the España Virtual for research of new cartographic processing algorithms.

The generalization is one of the more complex mapping processes, taking its greatest importance when preparing maps derived from other at larger scales. The need for generalization is evident given the impossibility of representing whole real world, taking it to be limited or reduced for the subsequent preparation of the map, keeping main features of the geographical space. Therefore, the goal is to obtain a simplified but representative image of the reality.

Due to nearly eighty percent of the mapping vector is composed of linear elements, the research focuses on those algorithms that can process them, proving that its application can also be extended to the treatment of surface elements as they are treated from the closed line that defines them.

Moreover, the study focussed into the processes involved within the linear exaggeration intended to highlight or emphasize those features of linear entities that increase the representativeness of our map. These tools, together with others known as the simplification and smoothing of lines, can provide satisfactory results in a process of generalization.

Key words: mapping, vector generalization, linear entities, exageration

INTRODUCCIÓN

Este documento queda enmarcado dentro del proyecto España Virtual del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

En él se pretenden abordar temas concernientes a la generalización de datos vectoriales atendiendo de manera particular los procesos relacionados con las entidades lineales debido a su especial relevancia dentro de la representación cartográfica. Para ello se llevará a cabo un estudio exhaustivo de los diferentes procedimientos vinculados con la cartografía lineal. Éstos han sido objeto de estudios por parte de autores relevantes en esta materia y hoy en día se integran en aplicaciones informáticas comerciales como CHANGE o ARCINFO.

La generalización cartográfica es uno de los procedimientos más difíciles de automatizar debido a factores que se comentarán con posterioridad; a pesar de esto, se pueden llegar a desarrollar herramientas que ofrecen resultados satisfactorios y que, trabajando en conjunto, faciliten la obtención de cartografía legible y representativa de la zona tratada. Mediante dichas herramientas se solventará, en la medida de lo posible, los conflictos que surgen durante la reducción de escala que tiene lugar en la generalización.

En primera instancia, se presenta el estado actual de la generalización vectorial mostrando especial atención a las propuestas y desarrollos más relevantes referentes a la generalización geométrica, dentro de la cual se sitúan los algoritmos y procesos relacionados con el tratamiento de entidades lineales.

En segundo lugar, se comentan los objetivos que guían el desarrollo de los trabajos propuestos que se describen con posterioridad. En ellos, se realizará la descripción de las posibles herramientas así como las comparativas entre las diferentes propuestas. Se incluyen además posibles mejoras a los algoritmos, eligiendo finalmente, las más adecuadas en función de los resultados obtenidos y en relación a la finalidad pretendida.

Más tarde, se comentarán los resultados derivados de aplicar los diferentes algoritmos sobre cartografía real extrayendo, a la postre, la conclusiones finales incluidas en el último apartado.

ESTADO DEL ARTE

Los trabajos relacionados con la generalización automática de cartografía comenzaron a finales de los años sesenta. Durante esa época la manipulación de grandes volúmenes de datos era un problema importante para los ordenadores. Para solventar este problema, surgieron algoritmos dedicados a la generalización de líneas empleados para reducir el número de puntos necesarios para la representación de las mismas denominados filtros o algoritmos de compresión (Lang 1969, Douglas Peucker 1973, Dougenik 1980). Debido a su relativa simplicidad, los algoritmos de filtrado encontraron un gran éxito en el área de generalización cartográfica.

El algoritmo de filtrado más famoso es el algoritmo de Douglas Peucker (1973), todavía es una referencia y muchos autores tratan de mejorarlo o adaptarlo a problemas concretos como de Berg et al. (1995), Zhang and Tian (1997), Saafeld (1999).

En cuanto a los algoritmos de suavizado han sido desarrollados para simplificar la forma de objetos lineales. Estos algoritmos tienden a mantener la forma general de una línea mediante la supresión de los detalles más pequeños. La mayoría opera con principios extraídos del campo del procesamiento de imágenes; Brophy (1973), Lowe (1988), McMaster (1989).

El suavizado y la simplificación son sólo parte de las operaciones llevadas a cabo durante el proceso de la generalización. Otra operación importante es la exageración, aunque debido a su difícil automatización, no han sido tantos los autores que han abordado el tema.

A la hora de llevar a la práctica el proceso de generalización dos han sido las teorías predominantes. La primera trata de desarrollar algoritmos que realicen operaciones diferentes, tales como suavizado y exageración, de manera simultáneamente. Por contra una segunda teoría es desarrollar algoritmos específicos que lleven a cabo una operación específica y que se complementen con algoritmos, actuando por separado.

Ha habido un progreso considerable en estos años con algoritmos que siguen la primera teoría; Fritsch (1997), Harrie y Sarjakoski (2000), Sester (2000), Bader (2001). Estos algoritmos, que trabajan de manera simultánea minimizando un conjunto de constricciones, proporcionan resultados cartográficos alentadores. En este artículo, nos concentramos en la segunda teoría, donde varios algoritmos se aplican sucesivamente a objetos. Esta última tendencia ha sido adaptada por autores como Ruas y Plazanet (1996).

OBJETIVO

El objetivo de esta investigación consiste en abordar los principales procedimientos y pautas de actuación acerca de los elementos lineales presentes en la cartografía, estableciendo las comparativas oportunas entre las diferentes propuestas existentes y emitiendo los informes de las pruebas realizadas. A su vez, se tratará de incluir, en aquellos casos en los que sea posible, las mejoras que pueden incluirse a cada uno de los procesos y el porqué de las mismas.

Las herramientas de generalización que se incluyen en el estudio son las que pueden aportar una solución óptima a los problemas que pueden presentarse durante la generalización vectorial de elementos lineales, y son: simplificación, suavizado, exageración lineal y esquematización de curvas.

Debido a la inexistencia de aplicaciones informáticas que incluyan las diversas rutinas que son objeto de estudio en esta investigación, se opta por implementar los algoritmos estudiados en una herramienta de autor con la que se efectuarán las pruebas oportunas.

DESCRIPCIÓN DE TRABAJOS

Simplificación lineal

Varios son los autores que aseguran que el operador de generalización utilizado con mayor frecuencia es la simplificación, presuponiendo que casi el ochenta por ciento de la cartografía vectorial está compuesta por elementos lineales. Al mismo tiempo, la aplicación de esta herramienta puede extenderse al tratamiento de entidades superficiales como edificios, ya que estos pueden ser tratados a partir del contorno lineal que los define. Debido a lo mencionado, se ha elegido la simplificación lineal como el primer procedimiento a tener en cuenta durante los trabajos de generalización.

El funcionamiento de este tipo de procesos se fundamenta en la eliminación de la mayor cantidad de información irrelevante, manteniendo la forma original del objeto en la medida de lo posible.

La mayoría de las rutinas de simplificación utilizan criterios geométricos (medidas de distancias, ángulos o áreas) para la selección de los datos significantes o críticos, haciéndose necesaria la determinación de un parámetro que actuará de umbral para la selección de los puntos críticos. Estos parámetros son fundamentales para la obtención de una solución óptima y no existen referencias para su correcta elección en función de la escala. No obstante, en esta investigación se han realizado múltiples pruebas para la búsqueda de una correcta cuantificación de estos umbrales que facilitarán la utilización de los algoritmos presentados.

Para justificar la elección de los algoritmos utilizados en los ensayos, se va a recurrir a la clasificación propuesta por McMaster (1989). Según este reconocido autor, una clasificación general de los métodos de simplificación podría ser:

- *Rutinas de puntos independientes:* Éstas no tienen en cuenta las relaciones de vecindad entre los puntos, siendo la selección de los puntos aleatoria. Un algoritmo representativo de este tipo podría ser el planteado por Tobler (1964).

- *Rutinas de procesamiento local:* Utilizan las relaciones de vecindad inmediata de los puntos para seleccionarlos. Entre estos algoritmos está el desarrollado por McMaster (1983) que relaciona distancias y ángulos. No se va a ensayar con este tipo de algoritmos, ya que el siguiente grupo incluye algoritmos con un funcionamiento similar a estos.

- *Rutinas de procesamiento local extendidas y constreñidas:* Estos algoritmos se extienden más allá de relaciones de vecindad inmediatas, dependiendo de criterios de distancia o ángulos y del número de puntos. Entre los algoritmos de este tipo más famosos está el algoritmo de Lang (1969). Este algoritmo necesita de un umbral de distancia (o ángulo) y un número de puntos N, dentro de los cuáles establece las mismas relaciones locales que en el algoritmo de McMaster (1987), es decir, no sólo se limita al siguiente punto vecino, sino a los N vecinos siguientes.

- ***Rutinas de procesamiento local extendidas y no constreñidas:*** Se extienden, igualmente, más allá de relaciones de vecindad inmediatas, dependiendo de la complejidad geomorfológica de la línea. Entre los algoritmos de este tipo más famosos está el algoritmo de Reumann-Witkam(1973). Aunque McMaster no lo incluyera en su listado, se podría añadir en este grupo el algoritmo propuesto por Wang-Müller (1998) e incorporado en las aplicaciones de ESRI.

- ***Métodos globales:*** Estos consideran la línea completa o segmentos de ella durante el proceso, seleccionando aquellos puntos críticos. Entre los algoritmos de este tipo se encuentra el algoritmo de Douglas-Peucker (1973). Este algoritmo fue ideado en Canadá y es el más utilizado para la eliminación de puntos en entidades lineales en el momento de la simplificación. Permite especificar un umbral que controle el aumento de simplificación. La forma de actuación se realiza uniendo los puntos extremos de una entidad lineal y calculando las distancias perpendiculares desde el resto de puntos de la entidad a dicha línea.

Algoritmos estudiados de simplificación lineal

Siguiendo la línea de la anterior clasificación, se selecciona las rutinas más representativa de cada uno de los grupos, mencionadas a continuación, con las que se experimentará utilizando para ello una aplicación informática desarrollada para tal efecto y se obtendrán los datos relativos al tiempo empleado por cada algoritmo, número de elementos eliminados y la forma simplificada de la línea, con los que se establecerán las comparativas oportunas incluidas en el apartado de resultados, eligiendo finalmente el proceso más adecuado para los trabajos cartográficos.

Los algoritmos seleccionados para las pruebas han sido los siguientes:

- *Tobler (1969)*: Este algoritmo sólo requiere que se le indique cada cuántos puntos se desea eliminar uno ya que no considera ninguna propiedad geométrica de la línea, con lo que el riesgo de eliminar un punto crítico es elevado.

- *Wang-Müller (1998)*: Este algoritmo requiere un umbral de tolerancia superficial para buscar aquellas concavidades de la línea que son críticas. Esto supone una complicación debido a la dificultad de establecer un valor mínimo de superficie en función del denominador de la escala.

- *Reumann-Witkam (1974)*: Para su utilización se requiere definir una banda de simplificación a través de un valor lineal.

- *Douglas-Peucker (1973)*: Requiere el establecimiento de un umbral de tolerancia lineal para buscar los puntos críticos.

- *Lang (1969)*: Este algoritmo necesita un umbral de tolerancia lineal para buscar los puntos críticos al igual que el algoritmo de Douglas-Peucker. Sin embargo, mientras que éste último considera todos los puntos de la línea, el algoritmo de Lang requiere que se estipule un radio de acción, es decir, cuántos puntos se van a analizar en cada momento.

- *Douglas-Peucker modificado*: Para terminar, se ha utilizado el algoritmo de Douglas-Peucker con la introducción de un valor de tolerancia angular como modificación, buscando conservar puntos importantes en tramos pequeños, como pueden ser en elementos curvos.

Suavizado

Como siguiente parte de la investigación, se han analizado los algoritmos de suavizado lineal existentes. Al igual que ocurre con las rutinas de simplificación lineal, se ofrece un amplio abanico de propuestas por parte de investigadores y aplicaciones comerciales.

Los algoritmos de suavizado pretenden mejorar los aspectos visuales de las entidades lineales, introduciendo o modificando la ubicación de los puntos que las definen (McMaster y Shea 1992)

Este tipo de actuaciones se hace necesario en entidades procedentes de procesos automáticos como la simplificación o interpolación, los cuales pueden generar zonas angulosas poco estéticas. Debido a ello, se establece el suavizado como segundo procedimiento a tratar en este estudio.

A continuación, se muestra una clasificación de las principales rutinas de actuación propuesta, como en el caso de la simplificación lineal por McMaster (1989):

- ***Medias ponderadas:*** Algoritmos representativos de este grupo pueden ser los propuestos por el propio McMaster (1989), ambos similares y denominados de "Medias deslizantes" y "Medias ponderadas".

- ***Filtros épsilon:*** El algoritmo más conocido de este grupo es el aportado por Brophy (1973).

- ***Aproximaciones matemáticas:*** Este grupo contiene todas las rutinas concernientes a los splines: b-splines, splines cúbicos, curvas de Bézier, etc.

Al igual que para la simplificación, se efectuarán las pruebas necesarias para poder evaluar los patrones de comportamiento de las diferentes rutinas. Se obtendrán los datos concernientes a tiempo empleado, número de puntos introducidos y forma final de la línea una vez suavizada. Finalmente se podrán extraer las conclusiones que en última instancia nos faciliten la elección de los algoritmos adecuados para la práctica cartográfica.

Algoritmos estudiados de suavizado

Como se ha descrito en el apartado de simplificación lineal, los algoritmos seleccionados se van a implementar en una aplicación informática desarrollada al efecto, que permitirá analizarlos a fondo e incluir variantes en su funcionamiento.

Los algoritmos seleccionados para las pruebas han sido los siguientes:

- B-spline: Exceptuando los puntos extremos de la línea, utiliza los demás como puntos de control, con lo que no pasará estrictamente por ellos, generando curvas tangentes a los segmentos originales. Visualmente ofrece resultados aceptables, pero en algunas ocasiones el hecho de no pasar por los puntos originales puede no ser aceptable.

- Splines cúbicos: Utilizan los puntos de la línea original como puntos de obligado paso de la línea suavizada. Debido a ello puede darse el caso de que generen líneas suavizadas muy desplazadas con respecto a la original.

- Medias deslizantes de McMaster: Este algoritmo no necesita ningún parámetro para realizar los procesos además de no introducir puntos nuevos. Su funcionamiento se basa en desplazar los puntos originales de la línea aplicando medias.

- Medias ponderadas de McMaster: Al igual que el anterior, ni requiere ningún parámetro ni introduce ningún punto nuevo. Por contra, los desplazamientos que realiza sobre los puntos son calculados mediante medias ponderadas inversamente proporcionales a la distancia. Ambos algoritmos no resultan aceptables debido al desplazamiento significativo que introducen con respecto a las líneas originales.

Exageración lineal

Una vez estudiados los diferentes algoritmos de simplificación y suavizado de entidades lineales y entendiendo la importancia de estos elementos dentro de la cartografía vectorial, cabe proceder al estudio de una serie de algoritmos que, complementándose con los anteriores y englobados dentro de un proceso conjunto, ofrezcan finalmente resultados óptimos en cuanto a lo que a la generalización lineal se refiere.

Dentro de la generalización lineal, se pueden encontrar numerosos algoritmos basados, en su mayoría, en procedimientos matemáticos que abordan el proceso de una manera exclusivamente geométrica. Sin embargo, los cartógrafos deben llevar a cabo la generalización determinando las características de la línea y detectando diferentes relaciones a lo largo de la misma como, por ejemplo, las relaciones existentes entre curvas consecutivas.

La mayor parte de los autores sugieren que, para llevar a cabo un proceso óptimo, deberá realizarse previamente una fragmentación de la entidad lineal, a fin de encontrar tramos diferenciados unos de otros, y aplicar en ellos algoritmos específicos. La mayoría de los autores consideran este reconocimiento de la estructura como la primera etapa dentro de un trabajo de generalización lineal.

McMaster (1983) indica que cada individuo parece juzgar la forma de una línea bajo dos criterios: la dirección de la línea y la sinuosidad de la misma. Además, sugiere una clasificación de las líneas en tres grandes grupos: ligeramente curvadas, muy sinuosas y multidireccionales.

Buttenfield (1991) propone la división de la línea en fragmentos homogéneos con el fin de realizar una mejor selección del algoritmo a aplicar; esta autora indica que las relaciones entre la geometría de las líneas, los algoritmos y las tolerancias pueden presentarse bajo una serie de reglas.

Plazanet (1995) sigue esta misma tendencia aconsejando la detección de curvas y la segmentación de la línea para, a continuación, aplicar un algoritmo y una tolerancia a cada sección.

Continuando con esta línea de trabajo y tratando de maximizar la automatización dentro del proceso de generalización cartográfica, se ha optado, en primera instancia, por identificar y precisar una serie de reglas cartográficas para normalizar, dirigir y controlar el proceso. Autores como Plazanet (1995), Weibel (1995), Müller (1989) han desarrollado inventarios con constricciones de este tipo para abordar trabajos sobre entidades lineales, de entre las que cabe destacar las siguientes:

-Eliminar pequeñas curvas e irregularidades.

-Mantener la forma general de las líneas. A su vez, líneas que no sean rectas no se deben sustituir por líneas geométricamente rectas, manteniéndose el aspecto local.

-Dos curvas sucesivas, siendo similares, se combinarán en una cuando su tamaño sea inferior a un cierto umbral establecido. A su vez, tres curvas se combinarán en dos.

-Se exagerarán curvas y detalles aislados si son relevantes para el entendimiento de la cartografía y si su tamaño supera un umbral definido previamente.

-Dentro de las series de curvas, se pueden realizar operaciones tales como la esquematización de la serie o eliminación de algunas de sus curvas componentes, a fin de evitar solapamientos entre las mismas.

Para ir más allá en la automatización de la generalización, los conceptos incluidos en estas pautas deben formalizarse para que así sean procesables por un ordenador. Mustière (1995) resalta la necesidad de desarrollar un conjunto de herramientas de análisis espacial que formalicen los conceptos que se encuentran en las pautas cartográficas (curvas, solape, sinuosidad,...) y optimicen la eficacia de los algoritmos, determinando las partes de la entidad lineal en las que deben ser aplicadas.

Una vez indicados los diversos parámetros y pautas de actuación, se puede proceder al análisis de los diferentes algoritmos de transformación de entidades lineales a fin de determinar su eficacia y obtener datos suficientes para la toma de posteriores decisiones acerca del empleo de los mismos.

Algoritmos estudiados de exageración lineal

Ante la ausencia detectada en la revisión bibliográfica realizada de estudios centrados en los algoritmos estrictos de exageración lineal, se ha decidido estudiar un conjunto de algoritmos de transformación de entidades lineales que facilitan la reducción de conflictos en la representación de líneas en el contexto de una reducción de escala en determinadas situaciones.

Actualmente, no se incluyen activos experimentales sobre estos algoritmos debido a la dificultad de automatizar los procesos de este tipo. Esto es debido a que para su correcto funcionamiento, tendrían en primer lugar que detectar de manera automática aquellos segmentos de las entidades lineales en los que se hace necesaria su actuación tales como meandros característicos de ríos, curvas aisladas en carreteras y en definitiva todos aquellos rasgos de la cartografía que puedan de una u otra manera evocar la realidad cartografiada. Debido a la dificultad que entraña tal actividad, se hace necesaria la intervención de un operador, con lo que se pierde en gran parte la finalidad de este estudio en cuanto a la automatización de procesos. Por tanto, se opta por mencionarlos de manera teórica, aunque no se descartan posibles pruebas en el futuro.

Los algoritmos estudiados son los siguientes:

- Exageración curvas aisladas (Mustière, 1998)

- Acordeón (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997)

- Esquematización (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997)

- Globo (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997)

- Combinación (Wang y Müller, 1998)

Exageración curvas aisladas

Procesos encaminados a exagerar una curva aislada para hacerla legible y que se basan en principios morfológicos. Ambos algoritmos dilatan el eje hacia el exterior de un esqueleto de la curva a partir de una triangulación de Delaunay. Además, se diferencian en la cantidad de desplazamiento que aplican.

Acordeón

Algoritmo basado en la idea de estiramiento de un acordeón para evitar los conflictos de solapamiento en curvas muy pronunciadas o series de curvas sucesivas. Consisten en determinar los límites de las curvas detectando los puntos de inflexión e identificando un punto invariante, tanto para una curva aislada como para un conjunto de curvas sucesivas y, a su vez, en desplazar los puntos anteriores y posteriores a éste en sentidos opuestos.

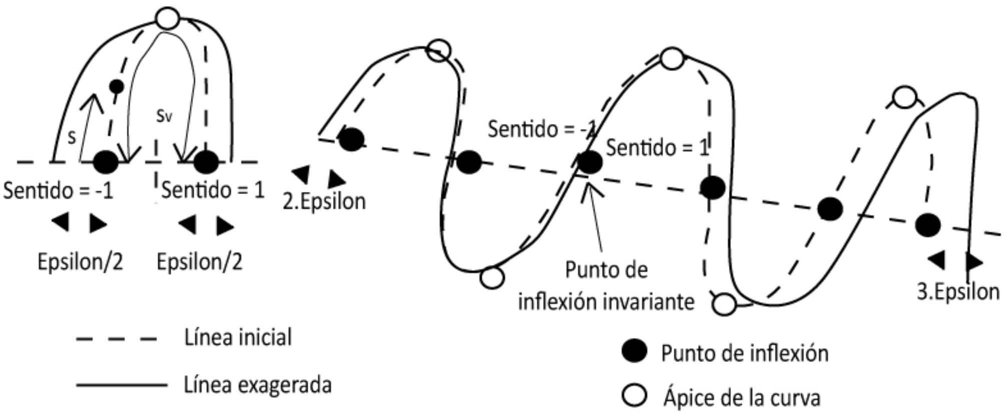

Figura 1. Actuación del algoritmo "acordeón" (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997).

Esquematización

El algoritmo de esquematización está dedicado a la eliminación de curvas en series de curvas. Al igual que el algoritmo "acordeón", se identifican las curvas mediante el análisis de los puntos de inflexión y se eliminan posteriormente las curvas menos importantes. La eliminación se basa en criterios de forma y tamaño. El proceso consiste en la eliminación de pares de curvas sucesivas manteniendo la ubicación espacial de los extremos de la serie.

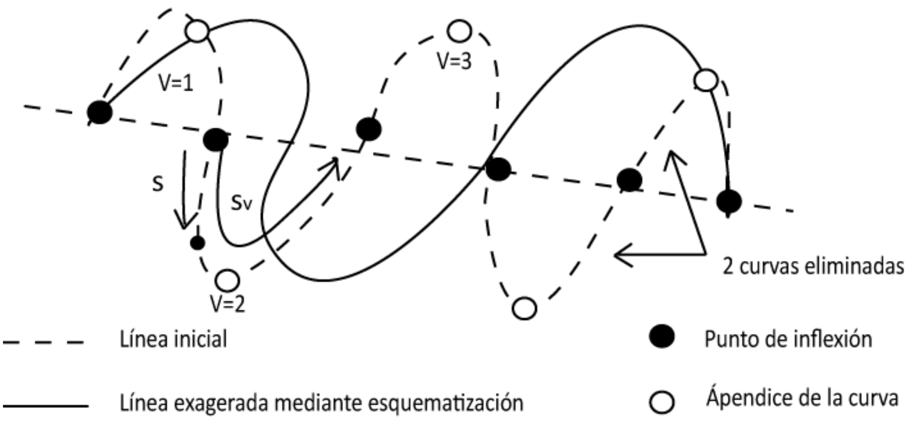

Figura 2. Algoritmo de esquematización (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997).

Globo

Algoritmo de exageración cuyo fin es tratar de mantener la posición de los extremos de la base de una curva, desplazando los puntos intermedios en la dirección perpendicular a la curva en el punto considerado. El desplazamiento es proporcional a la distancia existente entre el punto de inflexión de la curva y el ápice de la misma, lo que da lugar a desplazamientos nulos en las bases y máximos en el ápice.

Figura 3. Algoritmo de globo (Lecordix, Plazanet y Lagrange, 1997).

Combinación

El algoritmo de combinación se fundamenta en una clasificación de las curvas para identificar similitudes entre curvas sucesivas. Una vez que se han identificado se combinan en una sola permitiendo aminorar conflictos al reducir la escala. En la clasificación de las curvas se utilizan parámetros tales como: tamaño, longitud de la línea base e índice de compactación.

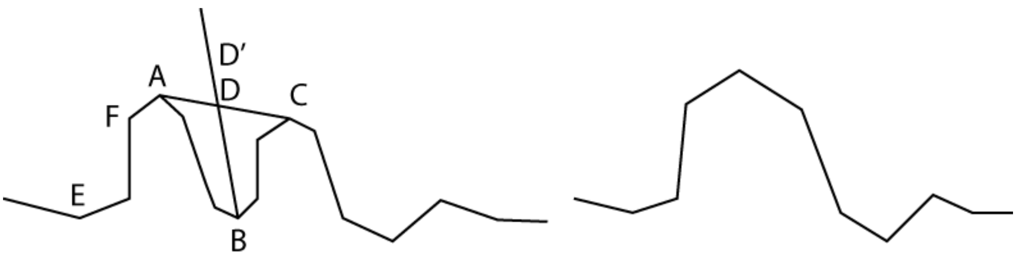

Figura 4. Resultado del proceso de combinación (Wang y Müller, 1998).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El fichero seleccionado para la realización de los activos experimentales corresponde a una hoja de altimetría de la base de datos BCN25.

- Cantidad de líneas: 1441 con 663496 puntos.

- Cantidad puntos: 477.

Resultados de Simplificación Lineal

La siguiente prueba tiene como objeto obtener valores de tiempo empleado y ratio de elementos eliminados como consecuencia de la simplificación y considerando como escala de destino 1:50000. Tras resultados previos obtenidos a partir de la actuación de los algoritmos sobre elementos lineales, se van a elegir los siguientes parámetros para cada uno de los algoritmos:

- Douglas-Peucker: Tolerancia lineal de 2 m.

- Tobler: Eliminación de un punto de cada cinco.

- Lang: Tolerancia lineal de 2 m y 10 puntos de vecindad.

- Wang-Müller: Tolerancia angular de 200 m^2.

- Reumann-Witkam: Ancho de banda de 4 m.

- Douglas-Peucker modificado: Tolerancia lineal de 2 m.

Tras proceder con el proceso de simplificación, los resultados han sido los siguientes:

Tabla 1. Resultados de la prueba efectuada para algoritmos de simplificación.

ALGORITMO	TIEMPO (seg.)	PUNTOS CRÍTICOS	PORCENTAJE
Douglas-Peucker	4.48	236228	36%
Tobler	2.43	529522	80%
Lang	2.05	209986	32%
Wang-Müller	57.61	356859	54%
Reumann-Witkam	2.09	196065	30%
Douglas-Peucker modificado	4.58	282494	43%

A la vista de los resultados obtenidos, son varias las conclusiones que se pueden extraer:

- Por un lado, el algoritmo de Douglas-Peucker es el más utilizado por las aplicaciones informáticas, debido a su buen comportamiento: rapidez de proceso y buenos resultados. Es por ello el algoritmo aconsejado para su utilización en la práctica cartográfica.

- La elección adecuada de los parámetros de configuración de los diferentes algoritmos es una tarea difícil y vital para una correcta obtención de resultados. En el caso del algoritmo de Douglas-Peucker sería la elección de la tolerancia lineal. Por ello, es de gran ayuda la tabla propuesta de valores en función de la escala final de generalización. Esta tabla, confeccionada a partir de múltiples pruebas a diversas escalas, permitirá al usuario de estos algoritmos tener una importante referencia en su determinación.

Tabla 2. Umbrales de tolerancia lineal para las distintas escalas.

DENOMINADOR ESCALA DESTINO	TOLERANCIA LINEAL (metros)
500	0.02
1000	0.04
2000	0.08
5000	0.20
10000	0.40
25000	1.00
50000	2.00

- El algoritmo propuesto por Wang-Müller (1998) funciona correctamente y se realizarán más pruebas en el futuro, sobre todo para el análisis de los algoritmos de exageración lineal, donde puede que tenga su verdadero potencial. Sin embargo, no llega a eliminar muchos de los puntos descartados por el algoritmo de Douglas-Peucker y que realmente no muestran información especialmente relevante de la forma geométrica de la línea. Tiene, además, el gran inconveniente de la determinación del parámetro que configura su funcionamiento. Este parámetro es un valor superficial, poco intuitivo a la hora de simplificar elementos lineales. Por último, su tiempo de procesado es elevado.

- El resto de algoritmos probados no llegan a superar al algoritmo de Douglas-Peucker por lo que se desaconseja su utilización.

Las imágenes de las pruebas que se muestran a continuación están a una escala exagerada aproximada de 1:5.000, para poder apreciar los detalles de la simplificación. En azul se muestra la línea original y en rojo la línea resultante de aplicar la simplificación.

Figura 5. Algoritmo Douglas-Peucker: tolerancia lineal 2m; puntos eliminados 12.

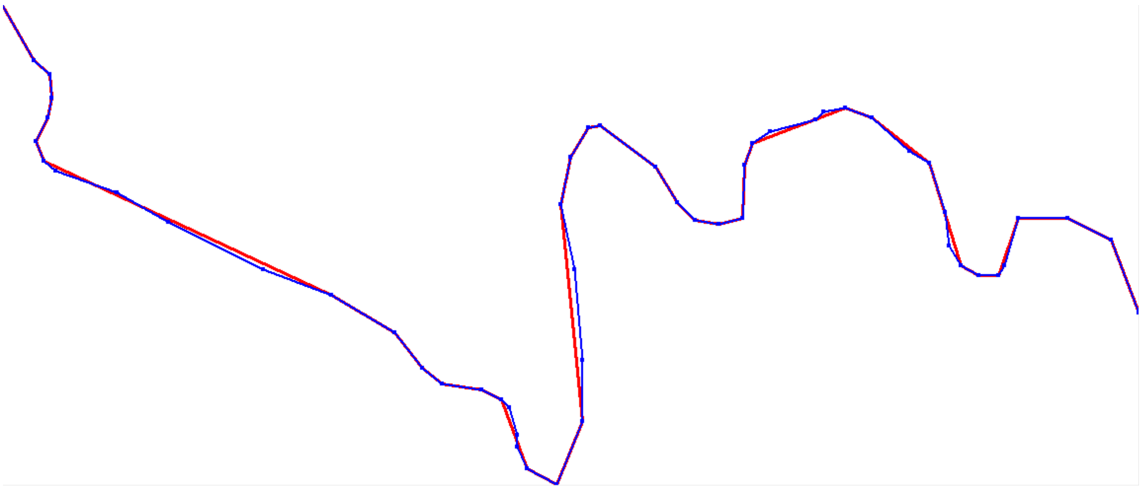

Figura 6. Algoritmo Douglas- Peucker modificado: tolerancia lineal 4m; puntos eliminados 16.

Resultados de Suavizado de Líneas

La siguiente prueba tiene como objetivo cuantificar el tiempo empleado por los diferentes algoritmos y el ratio de elementos nuevos introducidos. En este apartado sólo se incluyen los algoritmos de B-splines y splines cúbicos por considerarse los más aptos para el suavizado de entidades. Al igual que en caso de la simplificación se considera una escala destino de 1:50000.

EL fichero seleccionado se corresponde con la misma hoja de altimetría de la BCN25, pero en este caso después de haber sido simplificada mediante el algoritmo Douglas-Peucker modificado que transforma nuestro fichero original obteniéndose los siguientes resultados:

Cantidad de líneas: 1441 con 282494 puntos.

Cantidad puntos: 477.

Tras proceder con el proceso de simplificación, los resultados han sido los siguientes:

Tabla 3. Resultados de la prueba efectuada para algoritmos de suavizado.

ALGORITMO	TIEMPO (seg.)	PUNTOS NUEVOS	PORCENTAJE
B-splines	1.85	43227	15%
Splines-cúbicos	1.30	73980	26%

- Las rutinas planteadas por McMaster (1989), aunque rápidas y simples, no generan resultados aceptables, puesto que desplazan en gran medida la posición de los puntos que definen la línea. En zonas reviradas, efectivamente, realiza un suavizado que podría ser aceptable.

- Tanto el algoritmo de b-splines como splines cúbicos generan líneas visualmente aceptables, bien suavizadas. Ambos no consumen demasiado tiempo de cálculo y el incremento de puntos no es excesivo. Por tanto, se podría aconsejar la utilización de ambos. Es necesario recordar el funcionamiento de ambos tipos de algoritmos, puesto que en función de esto se podrá tender hacia la utilización de uno u otro.

Se han aportado dos mejoras a estos algoritmos:

- Primero, la posibilidad de realizar un suavizado en tres dimensiones. Es decir, además de modificar las coordenadas planimétricas de los puntos originales, también se va a modificar la coordenada altimétrica. Esta idea va en consonancia con lo comentado en las mejoras de simplificación lineal, ya que la cartografía, actualmente, no sólo se visualiza en planta, precisándose una altimetría correcta de los elementos.
- Segundo, se ha introducido un parámetro adicional a las funciones originales de b-splines y splines cúbicos que actúa a modo de ponderación permitiendo elegir el grado de suavizado de las líneas. Este factor tiene un rango de diez valores y permite suavizar en su modo natural o con diversos grados que aportan un suavizado menor, más ajustado a la línea original. Esta aportación es útil cuando las líneas suavizadas se alejan mucho de las líneas originales apoyándose en curvas pronunciadas.

Para los siguientes ejemplos gráficos se ha seleccionado el mismo elemento que en las pruebas anteriores, después de haber sido simplificado con el algoritmo de Douglas-Peucker modificado. Con este ejemplo, sin tantos puntos como el original, se pretenderá demostrar la bondad geométrica de la rutina analizándolo gráficamente.

Las imágenes de las pruebas que se muestran a continuación, al igual que en casos anteriores, están a una escala exagerada aproximada de 1:5.000, para poder apreciar los detalles del suavizado.

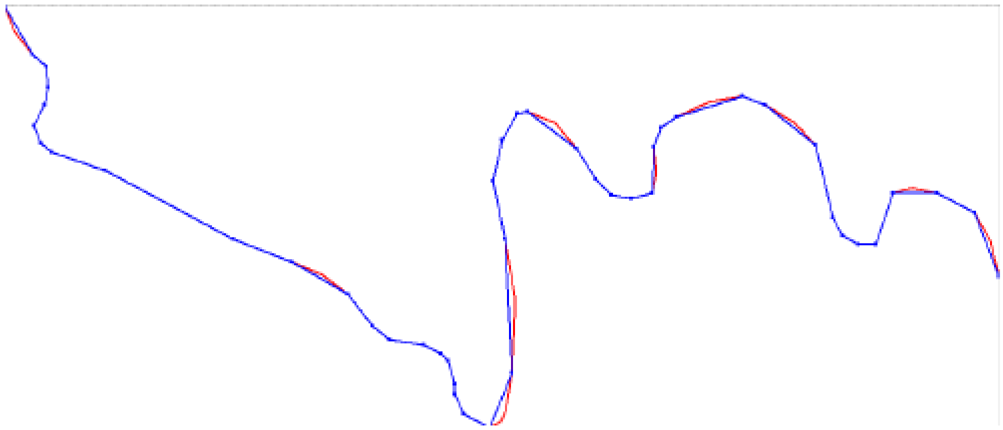

Figura 7. Algoritmo Spline Cúbico: Factor de suavizado 10; Puntos introducidos 11.

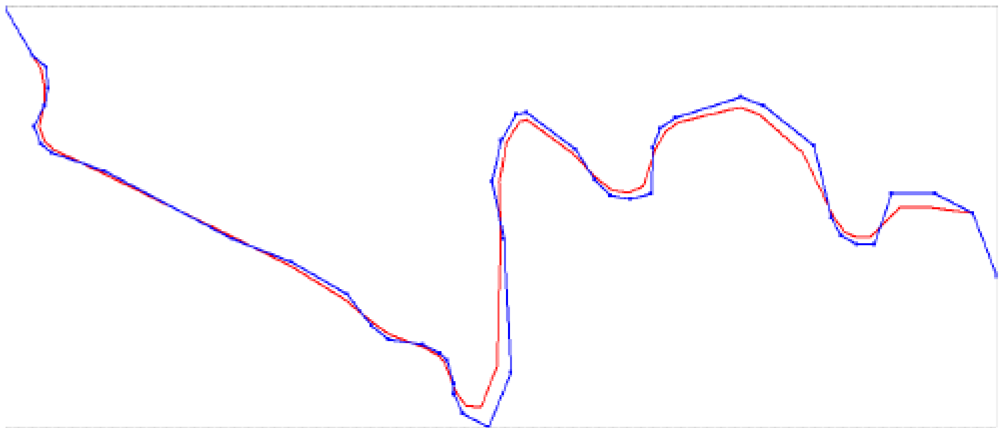

Figura 8. Algoritmo Medias Ponderadas de McMaster: Puntos Introducidos 0.

CONCLUSIONES FINALES

Tras la realización de los trabajos expuestos en el documento pueden darse por concluidos en gran parte los tratamientos de entidades lineales, si bien es cierto, que sería recomendable en algunos casos poder implementar pautas de exageración lineal que den lugar a futuros avances en este campo. A pesar de esto, una vez efectuados los procedimientos de simplificación y suavizado, se está en condiciones de dar paso a otras actividades necesarias para el correcto desarrollo de un proceso de generalización.

De entre las diferentes actividades futuras, destaca todo lo concerniente a la generalización de núcleos urbanos, que constituyen por sí sólo uno de los grandes retos de la generalización, debido a la cantidad de procesos que engloban y a la cantidad de elementos por los que están constituidos.

REFERENCIAS

Agent (1999): S*election of basic measures.* Report dc1 of the agent project, esprit/ltr/24939.

Bader M., (2001): *Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalization*.

Bildirici I.O., (2004): Building and Road Generalization with the CHANGE Generalization Software Using Turkish Topographic Base Map Data*. Cartography and Geographic Information Science,* Volume 31, Number 1, January 2004, pp. 43-54(12).

Brophy, M., (1973): An automated methodology for linear generalization in thematic cartography*. In Proceedings of American Congress of Surveying and Mapping,* pp. 300–314.

Burghardt D. (2005): *Controlled Line Smoothing by Snakes*.

Buttenfield B.P. (1991): A rule for describing line feature geometry. In: Buttenfield, B.P., and McMaster R.B. (eds), *Map generalization: Making rules for knowledge representation*. London: Longman, pp. 150-71.

Buttenfield y McMaster (1991): *Map generalization: Making rules for knowledge representation*. Longman Scientific & Technical.

De Berg, M., Van Kreveld, M. and Schirra, S. (1995): A New Approach to Subdivision Simplification. In *Proceedings of ACSM/ASPRS Annual Convention, 12th Autocarto*, Charlotte, VA, Vol. 4, pp. 79–88.

D.H Douglas and T.K. Peucker. (1973): Algorithms for the reduction of the number of points required to represent digitalized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, Vol. 10(2), pp. 112±122,

Dougenik, J.A., (1980): Whirlpool; a program for polygon overlay. In *Proceedings of Auto-Carto 4*, pp. 304–311.

Fritsch, E., (1997): *Représentations de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier*. PhD thesis, Université de Marne-la-Vallée (in French).

Harrie, L. and Sarjakoski, T., (2000): Generalisation of vector data sets by simultaneous least squares adjustment. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, Part B4, pp. 348–355.

Lang, T. (1969): Rules for the robot Draughtsmen. *The Geographical Magazine*, Vol. 42(1), 50-51.

Lecordix, F., Plazanet, C. y Lagrange, J.P., (1997): A platform for research in generalization: application to caricature. *GeoInformatica*, 1997, 1(2), pp. 161–182.

Lowe, D.G. (1988): Organization of smooth image curve at multiple scales. In *Proceedings of 2nd International Conference on Computer Vision*, pp. 558–567.

McMaster, R.B. (1989): The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization. *Cartographica*, 26(1), pp. 101–121.

McMaster, R.B. (1983): *Mathematical measures for the evaluation of simplified lines on maps*. PhD thesis, University of Kansas.

McMaster y Shea, (1992): Generalization in Digital Cartography. *Association of American Geographers*.

Muller J.C. (1989): *Theoretical Considerations for Automated Map Generalization*.
Mustière, S. (1995) : *Mesures de la qualité de la généralisation du linéaire*. Université Paris I/ENSG, France.

Mustière, S. (1998) : GALBE: Adaptive generalisation. The need for an adaptive process for automated generalisation, an example on roads. In *Proceedings of 1st GIS'PlaNet conference*, Lisbon, CD-ROM.

Mustière, S. (2006): Cartographic generalization of roads in a local and adaptative approach: a knowledge acquisition problem. *Int. J. Geogr. Inf. Sci*. 19 (2006) 937–955.

Plazanet C. (1995): "Measurements, characterisation and classification for automated linear feature generalisation. *Proce. AutoCarto'12*, Charlotte, USA. Vol. 4, 59-68.

Regnauld, N. (1998): *Généralisation du bâti: Structure spatiale de type graphe et représentation cartographique.* Thèse de doctorat, Laboratoire d'Informatique de Marseille.

Regnauld, N. y McMaster R.B. (2007): A synoptic view of generalisation operators. In W.A. Mackaness, A. Ruas, L.T. Sarjakoski (eds), *Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications*. Oxford, UK: Elsevier, pp. 37-66.

Reumann K. y Witkam A.P.M. (1973): Optimizing Curve Segmentation in Computer Graphics. *International Computing Symposium*.

Ruas, A. and Plazanet, C. (1996): Strategies for automated generalization. *Proce. International Symposium on Spatial Data Handling*, 7th, Vol. 1, Session 6,

Saafeld, A. (1999): Topologically consistent line simplification with the Douglas–Peucker algorithm. *Cartography and Geographic Information Science*, 26, pp. 7–18.

Sester M. (2000): Generalization based on least squares adjustment. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 13:931–938.

Sester M., (2001): Optimization Approaches for Generalization. *Proceedings of the GIS Research UK Conference*.

Tobler W.R. (1964): *An Experiment in the Computer Generalization of Maps*. Office of Naval Research. Geography Branch.

Wang Z. y Müller J.C. (1998): Line generalization based on analysis of shape characteristics. *Cartography Geogr. Inf. Syst*. 25, 3–15.

Weibel L.R. (1996): A typology of constraints to line simplification. In *Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vol. 2, sec. 9a, pp. 1–14 (Delft, Pays-Bas).

Zhang, L. and Tian, Z. (1997): Refinement of Douglas–Peucker algorithm to move the segments towards only one side. In *Proceedings of 18th International Cartographic Conference*, Stockholm, Vol. 2, pp. 831–855.