

# COMUNICACIÓN PARA EL XI CONGRESO DEL GMCSIG: “EXPERIENCIAS SOBRE LOS CÁLCULOS DE ACCESIBILIDAD MEDIANTE SIG”

*Fco. Alberto Varela García<sup>1</sup>*

(1) Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Campus de Elviña s/n 15071 La Coruña. albertovarela@iccp.udc.es 981.16.70.00 Ext. 1447

## RESUMEN

*La accesibilidad de un punto se refiere a la dificultad o al coste, ya sea económico, energético o en tiempo empleado para llegar a él. Si nos referiremos al concepto de accesibilidad como un factor de interacción del territorio, entonces las relaciones entre dos puntos aumentan en función de la disminución del coste de desplazamiento entre ellos, denominándose accesibilidad territorial de un lugar a aquella que representa la calidad y diversidad de las comunicaciones que dispone un punto del territorio.*

*Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen un tratamiento flexible de un gran volumen de datos geográficos, posibilitando además la realización de una presentación cartográfica de las operaciones realizadas sobre esos datos. Este hecho unido a la sencilla conceptualización de las comunicaciones mediante el uso de redes convierte a los SIG como un instrumento de gran capacidad para el análisis de la accesibilidad sobre un territorio.*

*La comunicación propuesta intenta profundizar en las diversas posibilidades de los sistemas de información geográfica para realizar análisis sobre la influencia de la calidad de la red viaria en la determinación de las condiciones de accesibilidad. Se describen experiencias concretas, propias o de otros autores, sobre el uso de estas herramientas para la realización de cálculos matemáticos, operaciones espaciales y análisis geográficos que intenten poner de manifiesto las relaciones entre el tipo de vía y el grado de desarrollo territorial que existe en su entorno, y que se caracterizarán mediante el concepto de accesibilidad.*

**Palabras Clave:** Accesibilidad; SIG; Indicadores; Territorio.

## ABSTRACT

*The accessibility of a point refers to the difficulty or cost, whether economic, energy or in time employed to arrive at him. If we will refer to concept of accessibility as a factor of interaction of the territory, then the relations among two points enlarge in function of the decrease of the cost of displacement among them, being called territorial accessibility of a place to that represents the quality and diversity of the communications that arranges a point of the territory.*

*The Geographical Information Systems (GIS) offer a flexible processing of a great geographics data volume, enabling besides the execution of a presentation cartographics of the operations carried out on those data. This fact, furthermore of conceptualización of the communications by means of the use of networks convert to the SIG as an instrument of great capacity for the analysis of the accessibility on territory.*

*This communication tries to deepen in the diverse possibilities of the GIS to carry out analysis on the influence of the quality of the road network in the decision of the accessibility. Concrete experiences are described, own or of other authors, on the use of these tools for the execution of mathematical calculations, spatial operations and geographical analysis that try to show the relations among the type of way and the degree of territorial development that exists in their environment, and that they will be characterized by means of the concept of accessibility.*

**Key words:** Accessibility; GIS; Indicators; Territory.

## INTRODUCCIÓN

Esta comunicación trata de exponer brevemente diferentes trabajos e investigaciones en los que se intenta profundizar, mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el análisis de la influencia de la calidad de la red viaria en la determinación de las condiciones de accesibilidad de una determinada región o de ciertos equipamientos de servicios (sanitarios, asistenciales, culturales, comerciales, etc.) en un ámbito territorial concreto. Las funcionalidades que permiten los SIG para el tratamiento y análisis de datos georreferenciados sobre la superficie terrestre los hacen especialmente interesantes para aplicar en investigaciones de este tipo.

El texto expuesto a continuación, pretende ser un pequeño apunte de los comienzos de una línea de investigación en desarrollo sobre el análisis territorial de las infraestructuras viarias, intentando valorar la influencia generada por la red viaria en la urbanización del territorio gallego en las últimas décadas, caracterizadas por el desarrollo de procesos urbanos difusos. En este proyecto se entiende la red viaria como un elemento fundamental en la ordenación del territorio, y como base esencial en la planificación y gestión del mismo, por lo que se intenta encontrar un modelo para el cálculo de la accesibilidad adaptado a las particularidades de Galicia, y conseguir con él cuantificar la influencia de la calidad del viario sobre el grado de urbanización de los asentamientos urbanos y rurales. Esta incursión en el estudio territorial de las infraestructuras viarias se enmarcará en la utilización de las funcionalidades del tratamiento de los datos geográficos que poseen los SIG, y los análisis espaciales derivados de su uso.

### Las infraestructuras viarias

Las infraestructuras viarias deben entenderse como un conjunto de vías funcionales, complementarias en el espacio, con el objetivo fundamental de facilitar los desplazamientos de la población en el menor tiempo posible y en las mejores condiciones de seguridad y comodidad. (Varela, 2002). La estructura del viario, y sus características, condicionará la accesibilidad a cada una de las unidades territoriales, y por tanto, su potencial grado de desarrollo. Debe garantizarse una adecuada conexión territorial mediante distintos niveles de viario, asegurando un acceso adecuado de la población a los servicios básicos, como garantía de equilibrio territorial y de justicia espacial, proporcionando una correcta comunicación entre todos los asentamientos, y adoptando una ocupación del espacio racional y respetuosa con el medio ambiente.

El trazado debe atender a las necesidades de la demanda de servicios de transporte intentando reducir al máximo los costes de construcción de la infraestructura y los posteriores costes del transporte que utilice ese trayecto. La preferencia será realizar trazados rectilíneos, pero las condiciones naturales del terreno, las características técnicas exigidas en el trazado según los medios de transporte a utilizar, las posibilidades constructivas disponibles, condicionantes ambientales y sociales, factores políticos y el propio presupuesto de la obra, alejarán la traza de la línea recta.

Aunque los vehículos de transporte posibilitan la existencia de flujos de comunicación entre dos puntos, será la infraestructura fija la que condicione el transporte y determine la organización del territorio, dotando de cohesión e integración socioeconómica a la región que sirve con unas condiciones adecuadas. Se puede afirmar que las redes de transporte determinan la accesibilidad de un lugar, lo que condiciona la ubicación de actividades y repercute en el desarrollo de la zona.

Las ciudades son, en la mayor parte de los casos, el origen y el destino del más importante porcentaje de los transportes que se realizan, por lo que son las urbes las que determinan en último término la organización de la red viaria. El funcionamiento del viario determina en cierta manera, y condiciona, el tamaño y la importancia económica de cada núcleo dentro del sistema de poblaciones. Las actividades económicas y el correcto funcionamiento del sistema territorial depende directamente de una adecuada red de infraestructuras que permita canalizar los flujos de transporte entre las ciudades y regiones de mayor influencia.

## **LA ACCESIBILIDAD**

Para analizar la influencia de la red viaria en el desarrollo de una región, es preciso conocer las características de las infraestructuras de transporte viario, y aplicar métodos que determinen las capacidades de comunicación que ofrecen estas infraestructuras sobre el territorio. Los análisis de accesibilidad territorial se consideran un indicador que refleja con gran precisión las potencialidades de desarrollo de las regiones, tanto desde el punto de vista social y de servicios, como desde la visión económica. Como veremos durante el texto, existen diferentes experiencias en las que se calcula la accesibilidad que proporcionan las carreteras, y que aplicando algoritmos más o menos complejos sobre entornos SIG, permiten conocer el grado de utilidad territorial que proporciona este viario.

El presente análisis se centra en los factores funcionales de las vías como estructuradoras del territorio y como servicio de los habitantes de los núcleos que comunica. La red no será un elemento neutro en el territorio sino que generará un valor positivo o negativo sobre el mismo, aunque en última instancia serán los flujos humanos y económicos los que más calificarán de positivo o negativo la presencia de la red viaria.

Un sistema de infraestructura viaria alcanza la máxima funcionalidad en el espacio cuando el tiempo empleado en los desplazamientos a través de él es el menor posible. En ese caso la red tendrá un funcionamiento eficaz que incide positivamente en la mejora del bienestar social, dotando de un adecuado servicio de comunicación a todos los habitantes de la región, aumentando el grado de participación en la comunidad, y favoreciendo el establecimiento de nuevas actividades económicas, todo lo cual repercutirá en el desarrollo de ese lugar.

Los planteamientos de ordenación del territorio, como propone el Esquema de Desarrollo Territorial Europeo, deben conseguir alcanzar un desarrollo equilibrado y policéntrico, que garantice a todos los ciudadanos la igualdad de acceso a las infraestructuras y a los nuevos avances técnicos, siempre dentro de un marco de respeto y cuidado al medio ambiente y al patrimonio cultural (*Valenzuela, 1998*). Los modelos de accesibilidad se presentan como un importante instrumento para la determinación de las desigualdades existentes en el territorio, y para buscar alternativas que posibiliten una organización territorial donde todos sus habitantes posean las mismas oportunidades para participar en su desarrollo sostenible.

El concepto de accesibilidad aporta un conjunto de técnicas de gran capacidad para abstraer la realidad y sintetizarla en unos resultados numéricos. La accesibilidad de un punto se refiere a la dificultad o al coste, ya sea económico, energético o en tiempo empleado para llegar a él. El concepto de accesibilidad hace referencia al factor de interacción del territorio, en donde las relaciones entre dos puntos aumentan en función de la disminución del coste de desplazamiento entre ellos. Denominaremos accesibilidad territorial de un lugar a aquella que representa la calidad y diversidad de las comunicaciones que dispone un punto del territorio (*Galán, 1999*).

La accesibilidad territorial se relaciona directamente con el concepto de distancia y por lo tanto con el de espacio. La distancia influirá sobre la localización de las actividades en el espacio, como han puesto de manifiesto muchos autores en diversos modelos teóricos de localización (*Weber*, 1909; *Christaller*, 1933; *Lösch*, 1961; *Werner*, 1968; *Bunge*, 1973; etc.), recogidos en parte por *Potrykowski* y *Taylor* (1984). La mayoría de ellos consideran el territorio como isotrópico, donde el coste del transporte es una constante con relación a la distancia, lo que aporta una escasa fiabilidad a su aplicación práctica. El desarrollo de los medios de transporte y la mejora de las redes de infraestructuras ha relativizado la distancia geográfica en función del desarrollo económico y tecnológico en cada época. Las nociones de proximidad y lejanía ya no se pueden referenciar únicamente a la idea de espacio absoluto, sino que también a la de espacio relativo. El tiempo se constituye como parámetro fundamental para entender la distancia. De la distancia espacial que separa dos lugares se pasa a tener en cuenta también su distancia temporal, donde interesa la duración del desplazamiento entre un lugar y otro. Esta idea la recoge *Laarman* (1973) en su definición de accesibilidad como el número de nudos alcanzables en un tiempo dado, al desplazarse por la red a una velocidad constante.

Al hablar de distancia podemos referirnos a la distancia real, absoluta o física entre dos zonas, pero también debemos tener presente la distancia percibida por el individuo. En este caso la accesibilidad deja de ser sólo un factor espacial y aparecen aspectos propios a la persona como son el nivel de renta, la formación, la edad, el modo de transporte, etc. que condicionarán su movilidad según la actividad que acometa en cada momento (laboral, esparcimiento, educativa, residencial, alimenticia, etc.). Este tipo de actividad también determinará el grado de atracción entre los puntos origen y destino, lo que condicionarará el número de viajes que se realicen. Muchos autores miden la accesibilidad mediante el estudio de volumen de actividades y relaciones entre dos lugares, como por ejemplo *Hansen* que la define de la siguiente forma: “la accesibilidad del punto 1 a una actividad del área 2 es directamente proporcional al tamaño de la actividad en el área 2 e inversamente proporcional a alguna función de distancia que separa el punto 1 y el 2”.

Existe una relación directa entre la estructura de la red con el equilibrio territorial a que de lugar. Una excesiva longitud en la estructura de las vías de unión entre los núcleos origina graves fallos en las comunicaciones al obligar a desplazamientos más largos, disminuyendo los potenciales de progreso que tenga la zona, además de repercutir negativamente en aspectos sociales de la población afectada dentro de la sociedad en la que se integra, quedando discriminada y apartada de los nuevos avances y adelantos que se produzcan, y limitando su grado de participación en el desarrollo de la comunidad.

*Bunge* (1973) muestra que la estructura y desarrollo de la red depende del grado de desarrollo técnico y económico de la región en su teoría de la red de longitud mínima. A partir de un estudio de la red se podría tener una idea del grado de desarrollo de la región estudiada, según su distribución, su configuración y la funcionalidad que aporta al territorio. Cada grado de desarrollo precisa de una red de transporte distinta en términos de cohesión, complejidad, jerarquía y accesibilidad. Las redes de transporte, además de repercutir en ese desarrollo, cambian y se transforman en función de la evolución económica de las zonas a las que sirven.

La importancia del grado de equilibrio de la red de un territorio se pone de manifiesto fundamentalmente en la localización de equipamientos y servicios básicos para dotar de las mínimas

condiciones de calidad de vida a una determinada comunidad poblacional. Existen criterios que recomiendan la ubicación de un tipo de equipamiento concreto en función de determinados aspectos sociales o territoriales, como puede ser el número de habitantes de un área, el número de viviendas, distancia máxima a las viviendas, etc. El lugar de emplazamiento de esos servicios debe minimizar las distancias al resto de lugares a los que sirven, atendiendo al mayor número de personas con el mejor nivel de accesibilidad. La cobertura territorial de estos servicios dependerá de la existencia de una red que equilibre el grado de calidad de las comunicaciones.

## INDICADORES DE ACCESIBILIDAD

Desde que *Von Thünen* publicó en 1826 un sencillo análisis sobre la localización agrícola, expresando la accesibilidad en costes del transporte de los productos del campo a la ciudad en un espacio isotrópico, este concepto se estudió desde muy diversos puntos de vista como el físico, el temporal, el económico, etc., desde perspectivas individuales o asociando distintos aspectos como los comentados anteriormente. Aparecen diversidad de métodos e indicadores de accesibilidad que responde a una serie de variables como es la morfología de la red en el territorio, la conectividad entre núcleos, el grado de cohesión existente, etc. recogidas mediante una serie de índices. A partir de ellos se puede determinar la coherencia de la red y su nivel de desarrollo desde el punto de vista jerárquico y de accesibilidad, lo que nos ayudan a evaluar la articulación territorial provocada por los ejes de transporte y la calidad de las comunicaciones que estos generan.

En la evolución de estas investigaciones, la complejidad de la red dificulta su descripción y el análisis de sus características, por lo que se introducen ciertas simplificaciones. *Garrison* (1960) publica un estudio sobre la estructura espacial de la red aplicando por primera vez métodos gráficos basados en las propiedades topológicas de los grafos, que ya estudiara *Euler* en el siglo XVIII. El requisito fundamental del análisis topológico es la representación de la red mediante una configuración abstracta de un conjunto de puntos (nudos, nodos o vértices) unidos por un conjunto de líneas (segmentos, aristas o arcos). La aplicación de la teoría de los grafos en el análisis de la red de comunicaciones tiene especial importancia en la medida que caracterizan la cohesión y la accesibilidad que confiere la estructura viaria, además de la jerarquía de los nudos y arcos.

El desarrollo de las comunicaciones depende de la calidad de la red de carreteras que hace posible la conexión y las relaciones entre los nodos. El grado de cohesión en las comunicaciones de la red constituye una medida que permite valorar la complejidad de las conexiones socioeconómicas de la región, estableciendo relaciones entre el nivel de desarrollo del sistema de transporte y el sistema socioeconómico. El significado de cohesión tendrá más valor cuando se comparen distintas redes o se estudie la evolución de una determinada a lo largo del tiempo. Entre los indicadores que caracterizan la cohesión destacan los de densidad, que se obtienen mediante la relación entre un valor que describe la red viaria y un valor que hace referencia a una característica del territorio. Entre los índices de densidad más utilizados se pueden citar el grado de cohesión de la red de *Prihar* (1956); el número ciclomático o índice de *Betti*; los índices de cohesión de *Kansky* (1963); el grado de desarrollo del grafo  $G_p$  presentado por *Zagozdzon* (1970); etc.

La sencillez que aportan estos índices es una ventaja muy importante para su utilización, pero también va a ser la causa de sus defectos. Uno de los más importantes es que no reflejan la

distinta configuración de varias redes con idénticos índices, o no distingue los cambios que se producen en una misma red al aumentar vértices y aristas. Esto dio lugar a la búsqueda de un método que diferenciase claramente los grafos de estructuras distintas, y que además introduzca un índice sintético que reaccione simultáneamente a todas las propiedades del grafo. *James* (1979) presenta un método con esas características, basado en el trabajo estadístico realizado por *Ord* tres años antes, y que permite recoger todos los nodos y aristas que los unen, en la denominada matriz de conectividad o de accesibilidad ( $A_{ij} = [a_{ij}]$ ).

A partir de la matriz de accesibilidad se obtienen diferentes medidas topológicas, como por ejemplo las que propone *Shimbel*, donde la accesibilidad topológica se considera la suma de las distancias entre un nodo y el resto de nodos de la red ( $A_y = \sum d_{xy}$ ). El nudo más accesible será el de menor valor de  $A_y$ . A partir del valor de  $A_y$  se obtienen nuevos indicadores como el índice de longitud media de *Reed* (1970) y el índice omega de accesibilidad relativa de *Stutz* (1973). Otro índice muy empleado es el índice de *Koning* o de centralidad de un nudo. Mediante él se determina para cada nudo el número de arcos que es preciso recorrer hasta llegar al nudo más alejado, empleando el camino más corto. Menor índice implica mayor centralidad. También se conoce como número asociado.

Un indicador topológico que analiza la calidad de las comunicaciones es el llamado factor de ruta o índice de trazado. Relaciona la distancia del menor camino, con unas características determinadas, existente entre dos puntos ( $d_{ij}$ ) con la distancia geográfica de la línea recta que los une, conocida también como distancia a vuelo de pájaro ( $dg_{ij}$ ). El valor asociado entre dos puntos será:

$$r_{ij} = d_{ij} / dg_{ij}$$

El valor integral de un punto se obtiene respecto a todos los demás de la red, y se expresa como:

$$I_{tri} = 1/n \sum [d_{ij} / dg_{ij}]$$

donde  $n$  hace referencia al número total de nodos menos uno. Este indicador fue usado en el Plan General de Carreteras 1984-1991, viniéndose empleando desde entonces en diferentes trabajos y estudios. Cuanto más se aproxime este indicador a la unidad, mejor será la calidad de comunicación entre dos núcleos.

Este índice puede aplicarse con otros factores en lugar de la distancia, como podrían ser el tiempo o el coste de un recorrido. Si se emplea el tiempo del desplazamiento, tenemos el índice de trazado-velocidad, donde el tiempo real es el numerador y el tiempo ideal el denominador.

$$I_{trvi} = 1/n \sum [t_{ij} / t_{ij}^o]$$

Con este índice de trazado podemos representar la accesibilidad a través de las curvas de isoaccesibilidad, que son las curvas que unen los puntos con el mismo valor del indicador de accesibilidad, y representan expresivamente la accesibilidad sobre un territorio. Según estas curvas se refieran a la distancia, al tiempo o incluso al coste, se habla de curvas de isodistancia, isocronas o isocostes, respectivamente.

Sobre estos índices de accesibilidad basados en el factor de ruta pueden realizarse modificaciones, como las que propone el profesor *Calvo Palacios* y su equipo de la Universidad de Zaragoza en 1993, ponderando los indicadores en función del peso poblacional ( $P$ ) de los núcleos utilizados como nodos.

$$C_{ci} = \Sigma (d_{ij} \cdot P_j) / \Sigma (d_{gij} \cdot P_j)$$

Al margen de la visión topológica encontramos otros tipos de índices para medir la accesibilidad, y que se pueden clasificar en dos grandes grupos: los indicadores agregados y los desagregados.

Entre los indicadores agregados destaca el basado en la teoría de la atracción universal de Newton. Estos índices analizan un nudo con el resto en función del grado de relaciones que se producen entre ellos según una serie de factores y actividades que se determinen para cada estudio en concreto. El indicador de accesibilidad de gravedad tiene la siguiente expresión:

$$A_{ij} = O_i S_j / T_{xij}$$

Donde

$A_{ij}$  : es la accesibilidad relativa de un punto (o de una actividad concreta en un lugar)

$O_i$  : es el factor que determina la capacidad de la zona  $i$  para generar viajes al nodo  $j$ .

$S_j$  : indica el tamaño de la actividad en la zona  $j$ .

$T_{xij}$  : indica el coste de desplazamiento ponderado en función de la atracción del viaje de  $i$  a  $j$ .

Este indicador, con sus diversas variantes, está indicado para medir la accesibilidad a servicios en los cuales es importante tener en cuenta el tamaño de la oferta que se realiza en cada punto, además de la distancia a la demanda (*Bosque, 1997*).

Los indicadores desagregados determinan la capacidad de movilidad de un determinado nodo de la red con respecto a los demás. Entre ellos, el más conocido sin duda es el Método Life-Path desarrollado por *Hagërstrand* y *Thrift* en los años 60. En él se establece la manera en la que se realizan los viajes desde un origen hacia los distintos destinos, tanto en el espacio como en el tiempo, lo que añade el término de velocidad. Suele emplearse en estudios de comportamiento de transporte de familias, obteniéndose comportamientos similares en función del nivel de renta.

## EL MODELO DE ACCESIBILIDAD EN UN SIG

Sobre los diferentes indicadores de accesibilidad existentes, se han establecido diferentes algoritmos informáticos que aplicados a sistemas de información geográfica ofrecen resultados más o menos satisfactorios para este tipo de análisis. Algunos programas de SIG comerciales presentan variantes de alguno de los modelos planteados, y prácticamente todos cuentan con funcionalidades espaciales que permiten realizar análisis de accesibilidad con estos u otros indicadores. A lo largo de esta comunicación se presentan algunas de las experiencias sobre la aplicación de modelos de accesibilidad en entornos SIG, que evidentemente no son las únicas existentes, pero que ofrecen una idea de las potencialidades y las posibles aplicaciones de estos métodos de cálculo.

Al llevar las expresiones matemáticas de cálculo de accesibilidad al ámbito geométrico, se ha permitido desarrollar modelos de la realidad que, adecuadamente adaptados a los SIG, establecen áreas con accesibilidad diferencial en un territorio determinado. Entre las mejoras que se producen en el cálculo de accesibilidad mediante SIG, que iremos viendo durante este texto, se encuentra el hecho de que trabajando en este entorno la representación de los arcos y los nodos es mucho más real que usando las simplificaciones los grafos. Además se pueden utilizar dife-

rentes características tanto de los arcos como de los nodos, para representar con mayor exactitud la calidad de las comunicaciones entre lugares.

Los SIG de tipo vectorial se han utilizado en las últimas décadas como herramientas para evaluar y valorar la accesibilidad de la población a determinados bienes, especialmente mediante el uso del análisis de redes, entendiendo la red como un conjunto interconectado de entidades lineales que forman una estructura espacial por la cual se desplazan recursos, sean vehículos, personas, bienes o información. Las redes se representan sobre la base de segmentos y nudos que corresponden a cruces de segmentos, en sintonía con la teoría matemática de los grafos (Comas y Ruiz, 1993), pero su adaptación a la realidad territorial es mucho más adecuada para los cálculos de accesibilidad que las simplificaciones aplicadas en la teoría de grafos. Además, siguiendo las ideas de *Loughlin* (1971), creemos que los mapas son un instrumento inmejorable para describir la geometría de la red viaria y su funcionalidad sobre el territorio, por lo que las potencialidades de representación de los SIG permiten que los resultados de estos cálculos puedan visualizarse gráficamente mediante mapas geográficos, consiguiendo mayor profundidad y precisión en los análisis que se efectúen.

Un ejemplo de utilización de formatos vectoriales para el cálculo de la accesibilidad lo encontramos en el trabajo de *Ramírez* sobre la accesibilidad a los hospitales públicos en la provincia del Chaco en Argentina (2003). Defiende que en un entorno SIG la accesibilidad espacial o geográfica puede ser entendida como el total de distancias recorridas por la demanda potencial que hace uso de un bien o servicio, y que se puede traducir como un producto entre la distancia que separa dos puntos (uno de oferta y otro de demanda) por la cantidad de población o usuarios que requieren ese bien o servicio. Si consideramos la posibilidad de que los arcos o red vial que los separa presenta características diferentes como puede ser un camino de tierra y otro pavimentado, la velocidad de desplazamiento será diferente y, en consecuencia, idénticas distancias geográficas no necesariamente significan iguales tiempos de llegada. Así, es posible calcular la accesibilidad temporal, entendida como el total de tiempo que emplean los usuarios que requieren un servicio. De la misma forma se podría calcular los costes económicos de los desplazamientos.

$$\text{Accesibilidad espacial} = d_{ij} \cdot P_i \text{ (distancia por población demanda)}$$

$$\text{Accesibilidad temporal} = t_{ij} \cdot P_i \text{ (tiempo por población demanda)}$$

Experiencias sobre la accesibilidad en España y en Europa utilizando entornos vectoriales de los SIG tienen como referente a *Gutiérrez Puebla*, en colaboración con otros autores, tanto para el transporte por carretera como por ferrocarril (1993, 1994, 1995), en donde utiliza indicadores en función de la impedancia de viaje en la red de comunicación y en el peso asociado a cada nodo que se comunica, como se indica en la siguiente fórmula.

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n (I_{ij} \cdot M_j)}{\sum_{j=1}^n M_j}$$

*Skov-Petersen* (2001) utiliza una formulación de funciones de impedancia siguiendo los principios defendidos por *Tobler* (1970) en los que formula como la primera ley de la geografía que aunque todo está relacionado, lo más cercano tiene más relación que lo distante.



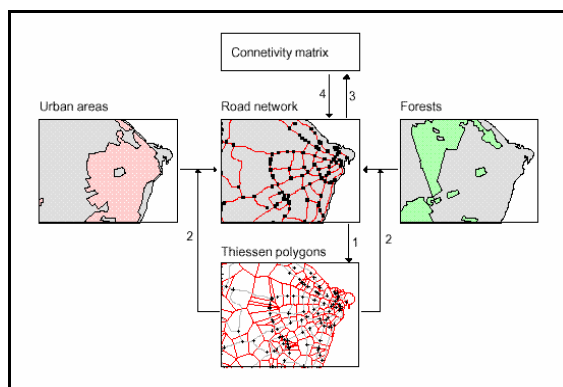


Fig. 1 Método de agregación de datos de polígonos a los nodos de la red viaria. (Skov-Petersen, 2001)

En esta caso también se utiliza el modelo vectorial, creado polígonos de Thiessen para los nodos de la red de carreteras como se aprecia en la Figura 1, y a través de él se le superponen las áreas forestales y se calcula la accesibilidad en Dinamarca a los espacios verdes desde las ciudades utilizando diferentes formulaciones como por ejemplo:

$$\text{Accesibilidad potencial: } P_i = \sum_{j=1}^n M_j \cdot f(d_{ij})$$

$P_i$  es la accesibilidad potencial del lugar  $i$

$M_j$  es la masa del lugar  $j$  (pe la población)

$f$  es la función de impedancia

$d_{ij}$  es la distancia o el coste entre el objetivo  $i$  y el origen  $j$

Pueden usarse umbrales para simplificar los cálculos, por ejemplo  $f(d_{ij})=1$  si  $d_{ij} \leq 30$  min y es cero si es  $>30$  min. Obviamente es importante el valor que se utiliza como umbral en estos análisis, y debería ser resultado de un trabajo empírico previo.

$$\text{Modelo gravitatorio: } P_i = \sum_{j=1}^n \frac{M_j}{d_{ij}^{\lambda}}$$

$P_i$  es el número potencial, pe las personas atraídas al nodo  $i$ .

$M_j$  es la masa del lugar  $j$  (pe la población)

$d_{ij}$  es la distancia o el coste entre el objetivo  $i$  y el origen  $j$

$\lambda$  es el exponente de la función potencial

$$\text{Función exponencial: } P_i = \sum_{j=1}^n M_j \cdot \exp(-\lambda \cdot d_{ij})$$

La estimación del parámetro  $\lambda$  es crucial, y cuanto más cercano a cero es, mayor es el radio de desplazamiento. Se tendrá parámetros diferentes según las regiones, la actividad a desarrollos, la unidad de costes de desplazamiento, etc.

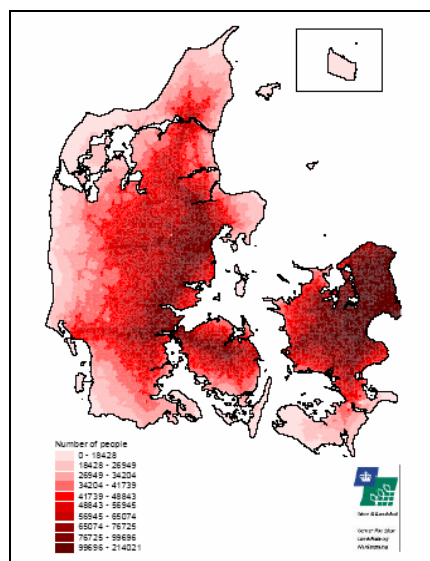


Fig.2 Ejemplo de los resultados de emplear un indicador exponencial (con  $\lambda = -0,049281$ ) para el cálculo de la accesibilidad en Dinamarca (Skov-Petersen, 2001).

La estimación empírica de estos parámetros puede verse en diferentes autores (Hansen, 1959; Fortheringham, 1981), y para el caso de Dinamarca se utilizaron datos de encuestas de movilidad a los que se realizaron regresiones no lineales, y se ajustaron los resultados a una función de distribución gaussiana.

Rosero-Bixby (2003) se decanta en su estudio sobre la accesibilidad a los servicios de salud en Costa Rica, por la utilización de un método que relacione mediante una función la menor distancia entre un origen y un destino caracterizado por la calidad de su servicio (tamaño, horario, especialidades, etc.), siguiendo los modelos de gravedad anteriormente comentados.

Sin embargo la mayor parte de estos trabajos no considera todo el territorio, sino que lo aísla en modelos arco/nodo de la teoría de grafos ya analizada por Garrison en 1960, mediante la localización de la población y de los servicios, y el trazado de la red viaria que los comunica. Se obtienen en estos casos valores de accesibilidad para los nodos comunicados, pero no para cada punto del territorio (aunque se extrapolen los valores de los nodos al resto de la región, los valores obtenidos en los puntos no reflejan realmente la accesibilidad de ese lugar). Para conseguir un modelo continuo se recurre a los modelos ráster, que aunque reduce la precisión geométrica de los elementos (dependiendo del tamaño de celda) ofrece unas capacidades analíticas mucho mayores, fundamentalmente a través del Álgebra de Mapas.

Experiencias con este modelo las encontramos en los trabajos de Juliao (1999) sobre Lisboa y la región del Valle del Tajo, Farrow y Nelson (2001) en Honduras, Pablo et al. (2002) sobre la red viaria de alta capacidad en España, donde se utilizan modelos de cálculo que permiten determinar el coste acumulado existente en el desplazamiento desde uno o varios puntos tomados como origen, al resto de puntos de una región.

En este tipo de métodos se precisa dividir todo el territorio a estudiar en celdas de tamaño homogéneo. A estas celdas se les asigna el coste que supone cruzarlas en función de las características territoriales que presenten (carreteras, ríos, áreas urbanas, pendiente del terreno, etc.). La

asignación de estos costes, así como el cálculo de la accesibilidad, se pueden calcular por medio de la operatividad del Álgebra de Mapas existente en la mayor parte de los programas SIG. Para cada celda se determina el valor del menor coste acumulado en los desplazamientos desde un origen a través de una superficie de costes previamente definida. Esta función permite además obtener otros dos valores para cada celda, uno que determina la dirección seguida desde cada origen a cada uno de los puntos empleando el menor coste acumulado, y otra que asigna cada punto del territorio al origen más próximo, entendiendo proximidad como el menor coste necesario para llegar a él.

Para simplificar el algoritmo del modelo a utilizar, se considera que en el centro de cada celda existe un nodo al que se le asigna el coste íntegro de la celda, y que está conectado con las celdas adyacentes mediante enlaces. Sobre estos nodos se aplica un algoritmo de costo-distancia, calculando el coste acumulado en la ruta seguida desde una celda a otra. Este coste acumulado de pasar del nodo de una celda al de una de las celdas contiguas, tendrá en consideración las distancias entre los nodos a comunicar, y por supuesto, los costes de desplazamiento dentro de cada una de estas celdas. Con los costes acumulados del viaje, y mediante un método iterativo, se determina la ruta que minimiza el coste de desplazamiento entre el origen y el destino.

Por ser una función predefinida en uno algunos de los programas SIG más utilizados en el mundo, su presencia en publicaciones sobre trabajos de accesibilidad es mayor que otros métodos. Sin embargo, que se use no significa que se emplee adecuadamente, y de hecho se puede constatar resultados erróneos, o cuanto menos discutibles, en algunas de las referencias analizadas. Y aquí nos encontramos con la parte fundamental de cualquier proyecto de SIG: la calidad de los datos de partida. En este tipo de métodos, debemos definir una superficie de costes de desplazamiento, que va a ser determinante en el desarrollo de del cálculo posterior, y en la que hay que introducir un gran número de parámetros que pueden condicionar completamente el análisis. La correcta definición de estos parámetros, y la adecuada asignación de valores para los mismos, será el punto crítico para conseguir unos resultados que reflejen con fiabilidad la realidad existente.

En un estudio en el que se intenta analizar determinadas realidades territoriales, es absolutamente imprescindible disponer de datos fiables con los que poder realizar los cálculos precisos, y obtener así la mayor calidad posible en los resultados y las conclusiones que se alcancen. En el caso de los cálculos de accesibilidad realizados para la provincia de La Coruña, la mayor parte de los datos a utilizar provienen de los obtenidos en la Fase IV de la Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales de la provincia de La Coruña (EIEL). Este proyecto se desarrolló entre 2000 y 2002, mediante un convenio de la Excm. Diputación Provincial con la Universidad de La Coruña, en donde se constituyó un equipo multidisciplinar que elaboró un SIG de esta provincia gallega, a partir de cartografía digital a escala 1/5.000 y un extraordinario trabajo de campo (*Varela, 2003*). Aunque podría ser de interés explicar con detenimiento los objetivos, las particularidades y el proceso de elaboración de esta EIEL, entrar en estas cuestiones desbordaría los límites máximos de esta comunicación. Sin embargo, se quiere dejar constancia del control ejercido sobre los datos a manejar, del grado de detalle de los mismos, y de su fiabilidad para poder establecer a partir de ellos análisis y conclusiones que pudiesen ser relevantes.

Como apunte de esta investigación se muestran una serie de mapas en los que se presentan alguno de los resultados que se han obtenido en los trabajos de investigación realizados hasta este momento. El cálculo de accesibilidad se ha realizado desde cada uno de los ayuntamientos

de los 94 municipios al resto de lugares de la provincia, dividiendo todo el territorio provincial en celdas de un tamaño de 10 m, hasta completar una matriz de 14.161 x 13.173 celdas. Los resultados de accesibilidad obtenidos se analizaron con respecto a la localización del conjunto de las entidades de población (más de 11.000) y de determinados equipamientos de servicio público.

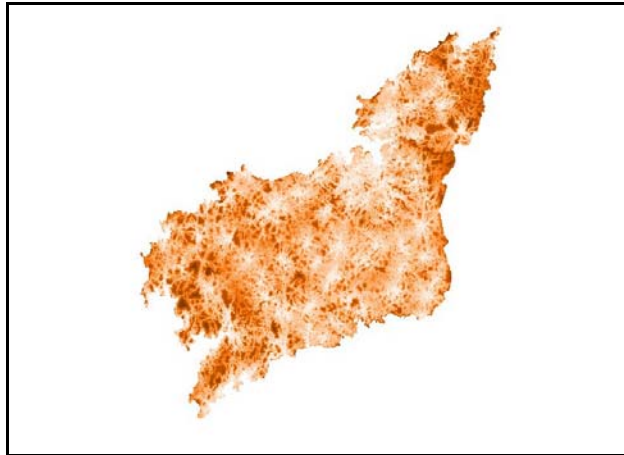


Fig. 3 Mapa de los tiempos de viaje desde cada punto de la provincia al ayuntamiento más accesible, entendido como el que presenta un menor coste de desplazamiento. Elaboración propia (2004)

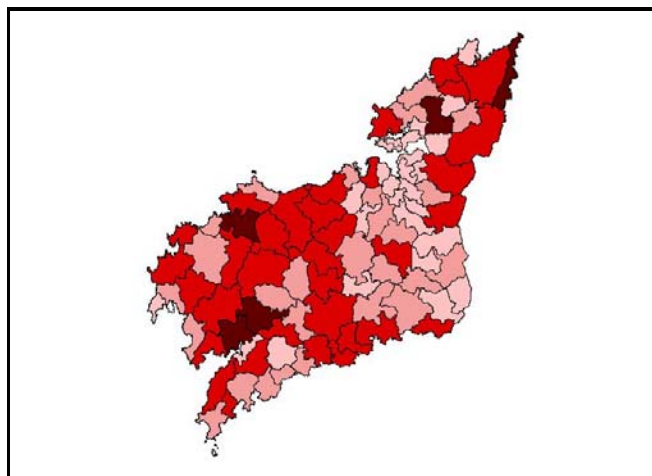


Fig. 5 Índice de localización de equipamientos por municipio. Los colores más oscuros representan los peores valores. Elaboración propia (2004)

También podemos encontrar modelos más complejos, como el de *Liu y Kam* (1999), en los que se trabaja con celdas hexagonales, sobre las que se calcula la distancia más corta desde cada celda hasta llegar a la red viaria, y a partir de ahí al destino siguiendo el camino más corto, y a estos datos se les aplica un modelo potencial en el que se tiene en cuenta las características de los puntos origen y destino.

Encontramos modelos que determinan el camino diario potencial en función del tipo de persona y sus hábitos cotidianos, como podemos encontrar en *Dijst y Kwan* (2003). En este modelo se analizan los lugares fijos del viaje de la persona, así como lugares de oportunidad o potencia-

les en los que podría parar según su recorrido obligado, determinando áreas de camino potencial entre actividades consecutivas, siguiendo la línea del Método Life-Path.

En definitiva se observa que el entorno SIG ha adoptado o permite adoptar la mayor parte de los indicadores de accesibilidad que se han desarrollado a lo largo de la historia, vistos en parte en el apartado anterior, reduciendo drásticamente los tiempos de cálculo y análisis de estos métodos, y consiguiendo un tratamiento geográfico más adecuado para los datos y para los resultados que se obtengan. Pero además las herramientas SIG permiten aplicar otros modelos de accesibilidad y afrontar nuevos métodos gracias a las funcionalidades de análisis espacial que presentan estos sistemas.

## REFERENCIAS

- BOSQUE SENDRA, Joaquín *Sistemas de información geográfica*. Rialp. 1997
- CALVO PALACIOS, José Luis; JOVER, J.M.; PUEYO, Ángel y ALONSO, Pilar. *Matizaciones de los valores cartográficos de accesibilidad por carretera de la España peninsular en función de la variable demográfica*. IV Jornadas de la Población Española. Santa Cruz de Tenerife 1993.
- DIJST, M; KWAN, M. *Accessibility and Quality of Life*. 2003
- FARROW, A.; NELSON, A. *Modelación de la accesibilidad en ArcView 3*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 2001
- GALÁN BUENO, Pedro. *La red local y la accesibilidad como instrumentos del desarrollo territorial*. II Congreso Nacional de Carreteras Locales. Asociación Española de la Carretera. Torremolinos, Marzo 1999.
- GUTIÉRREZ PUEBLA, J.; González Aguayo, R. *TRANSPORT IN EUROPE: A Study of Train Accessibility Using GIS*. 1993
- JULIAO, R. P. *Measuring accessibility using GIS*. 1998
- LIU, S.; Kam, T.S. *Designing and implementing models of accessibility potencial in a GIS environment*. 1999
- PABLO, Federico; MUÑOZ, Carlos y MYRO, Rafael. *Un análisis del efecto de la inversión en infraestructuras sobre la accesibilidad del territorio a la red viaria de alta capacidad*. XXIX Reunión de Estudios Regionales. 2002
- POTRYKOWSKI, Marek y TAYLOR, Zbigniew. *Geografía del Transporte*. Editorial Ariel. 1984.
- RAMÍREZ, Mirta Liliana. *Cálculo de medidas de accesibilidad geográfica, temporal y económica generadas mediante sistemas de información geográfica*. I Congreso de la Ciencia Cartográfica. Buenos Aires. 2003
- ROSERO-BIXBY, L. *Spatial access to health care in Costa Rica and its equity: a GIS-based study*. 2003
- SKOV-PETERSEN, H *Estimation of distance-decay parameters – GIS-based indicators of recreational accessibility*. 2001
- VALENZUELA MONTES, Luis Miguel. *El marco territorial de las infraestructuras de transporte: accesibilidad, planificación y efectos*. CEMCI. 1998.
- VARELA GARCÍA, Fco. Alberto. *Estudio de la accesibilidad viaria en las comarcas de la provincia de La Coruña. Reflexiones sobre el modelo de ocupación territorial actual*. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Madrid 2002
- VARELA GARCÍA, Fco. Alberto *Los sistemas de información geográfica aplicados a la gestión de las infraestructuras*. Ponencia del Congreso Internacional de Ordenación del Territorio en Zaragoza. 2003