

# UN NUEVO MODELO PARA LOCALIZAR INSTALACIONES NO DESEABLES: VENTAJAS DERIVADAS DE LA INTEGRACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN Y SIG

J. BOSQUE SENDRA\*, M. GÓMEZ DELGADO\*\* y F. PALM ROJAS\*\*\*

Recibido: 1-11-06. Aceptado: 15-01-07. BIBLID [0210-5462 (2006-2); 39: 53-68].

**PALABRAS CLAVE:** Modelos de localización-asignación, SIG, instalaciones no deseables, análisis de punto ideal, LOCALIZA, Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial.

**KEY WORDS:** Location-allocation models, GIS, obnoxious facilities, ideal point, LOCALIZA, Spatial Decision Support Systems.

**MOTS-CLEFS:** Modèles de localisation- assignation, SIG, installations non désirables, analyse de point idéal, LOCALISE, Systèmes d'Aide à la Décision Spatiale.

## RESUMEN

La localización de instalaciones no deseables es una tarea compleja en la que es necesario tener en cuenta varios objetivos. El más habitual es el de la eficiencia espacial, medido usualmente por la distancia existente entre estas instalaciones y la población y mediante el cual se pretende alejar lo máximo posible estas instalaciones de las zonas habitadas. Sin embargo, la consideración exclusiva de esta idea puede generar resultados muy poco convenientes desde otros puntos de vista, por ejemplo el de los potenciales usuarios de estas instalaciones, es decir, los productores que tienen que transportar hasta ellas los residuos. En esta comunicación se presenta un nuevo modelo de localización-asignación que incluye dos criterios para medir la eficiencia espacial de las localizaciones seleccionadas.

## ABSTRACT

Location of obnoxious facilities is a complex task in which several objectives must be taken into account. The most usual objective is the spatial efficiency, usually measured as the distance between facilities and population, looking for moving these facilities away the inhabited regions. However, taking into account this idea solely may generate poor results from other points of view. For instance, the potential users must carry out the residuals to the facilities. This work shows a new location-allocation model that includes two criteria to measure the spatial efficiency of the selected locations.

\* Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá. [Joaquin.bosque@uah.es](mailto:Joaquin.bosque@uah.es)

\*\* Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá.

\*\*\* Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Centro de simulación y modelos, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

## RÉSUMÉ

La localisation d'installations non désirables est une tâche complexe dans laquelle il est nécessaire de tenir compte de plusieurs objectifs. Le plus habituel est de l'efficacité spatiale, mesuré habituellement par la distance existante entre ces installations et la population et au moyen duquel on prétend éloigner le plus maximale possible ces installations des zones habitées. Toutefois, la considération exclusive de cette idée peut produire des résultats très peu nécessaires d'autres points de vue, par exemple celui des potentiels utilisateurs de ces installations, c'est-à-dire, les producteurs qui doivent transporter jusqu'à elles les résidus. Dans cette communication on présente un nouveau modèle d'localisation- assignation qui inclut deux critères pour mesurer l'efficacité spatiale des localisations choisies

## 1. INTRODUCCIÓN

En la vida social y económica moderna es necesario realizar una serie de actividades que no son muy cómodas y atractivas pero que suponen grandes beneficios para el conjunto de la sociedad. Nos referimos, por ejemplo, a la gestión de los residuos y desechos de todo tipo que la sociedad moderna genera en enormes cantidades (los residuos sólidos urbanos, las aguas negras, los residuos industriales —en especial los denominados peligrosos—), la distribución de combustible y energía, o incluso los centros para el tratamiento o atención a personas con distintas clases de problemas.

Para la puesta en práctica de estas actividades es necesario construir una serie de instalaciones y equipamientos como los vertederos de RSU, las depuradoras de aguas, depósitos de seguridad de residuos peligrosos (RP), depósitos de hidrocarburos, gasolineras, centrales nucleares, cárceles, centros de atención a drogodependientes, etc.

Pero junto a los efectos positivos que muchas de estas instalaciones tienen por ofrecer servicios básicos a la sociedad actual, encontramos otros efectos negativos que nos hacen catalogarlas habitualmente como instalaciones no deseables (BOSQUE y FRANCO, 1995; BOSQUE, *et al.*, 1999). La razón principal es que tienen un efecto perjudicial en sus inmediaciones (generan lo que se suele denominar externalidades negativas), que provoca el rechazo sistemático de la población que no desea tenerlas cerca de su domicilio. Esta reacción de la población ante la posibilidad de su proximidad espacial a una de estas instalaciones ha popularizado ciertas expresiones de oposición sintetizadas en varios acrónimos ya populares como NIMBY (*Not In My Back-Yard*), LULU (*Locally Unwanted Land Use*) o BANANA (*Build Absolutely Nothing at All Near Anybody*).

Las externalidades son beneficios o costes que se derivan de la actuación de un agente y que no son pagados o cobrados (MORENO, 1995; IHLANFELDTA y TAYLOR, 2004). Estos efectos pueden ser positivos, es decir beneficiosos para sus vecinos, o perjudiciales para ellos. Así una escuela ejerce un efecto beneficioso en su entorno, en relación, por ejemplo, a los padres que tienen que llevar a sus hijos a la escuela, ya que al tenerla más cerca puede costarles menos el transporte de sus hijos, beneficiándose de manera importante y sin tener que pagar mas por ello, en comparación con la situación de otras familias que residan a una mayor distancia de la escuela.

Por el contrario, los vertederos de RSU pueden producir en sus cercanías malos olores, trasiego de numerosos camiones, y, en general, molestias variadas, lo que determina que nadie quiera tener cerca este tipo de instalaciones ya que tampoco recibe, de manera general, una compensación por recibir ese grado de molestias y perjuicios que no sufren quienes residen a gran distancia del vertedero.

## 2. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES NO DESEABLES

Teniendo en cuenta esta situación, la localización óptima de las instalaciones no deseables se debe basar en la formulación de una serie de principios y magnitudes generales de eficiencia y equidad que nos guíen en la búsqueda y determinación de los lugares mas adecuados para colocar estas instalaciones (MORRILL y SYMONS, 1977; OGRYCZACK, 2000). Estos principios deberían tener en cuenta los dos aspectos antes mencionados: la necesidad general de que se construyan estas instalaciones por el servicio que ofrecen a la comunidad, y el problema de las molestias y externalidades negativas que generan en sus inmediaciones.

El primer concepto general a utilizar podría ser el de la *Eficiencia Espacial*. Este principio se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones, pero en este contexto se entendería como la búsqueda de localizaciones que, resultando beneficiosas de manera general, perjudiquen lo menos posible a las poblaciones de sus alrededores.

Una primera formulación de este principio sería colocar las instalaciones no deseables lo más alejadas que sea posible de la población residente en la zona de estudio. Para ello basta, desde un punto de vista operativo, maximizar la distancia en línea recta (se supone que las molestias se difunden de este modo) entre las instalaciones y la población. Con esta idea se han formulado modelos como los denominados *MaxiSum* o *MaxiMin*.

No obstante, este planteamiento resulta adecuado cuando se trata de instalaciones verdaderamente peligrosas en cuya localización priman factores de protección a la población y el medio ambiente por encima de los costes de construcción o de transporte generados. Sería el caso, por ejemplo, de la localización de almacenes permanentes de residuos nucleares. Sin embargo, para otro tipo de instalaciones que algunos autores consideran semi-nocivas o semi-deseables (BRIMBERG y JUEL, 1998; FLAHAUT *et al.*, 2002) este planteamiento no resultaría del todo apropiado. Veamos el caso de un depósito de seguridad de residuos peligrosos. Si se aplicase estrictamente la idea anterior, maximizar las distancias entre la población y el depósito, la posición de éste podría resultar muy alejada de la población, pero, al mismo tiempo, podría estar extremadamente lejos de las empresas que producen los residuos peligrosos y que tendrían que pagar grandes cantidades de dinero por el transporte de los residuos hasta allí, lo que podría ser un resultado muy poco conveniente y muy desequilibrado desde el punto de vista de los productores de estos residuos. Otra cuestión, probablemente aún más importante, está en que mayores distancias implican un aumento de las

áreas de exposición al riesgo derivado del traslado de los residuos (de mayor frecuencia que en el caso de los residuos nucleares).

Más adecuado sería adoptar un enfoque multicriterio; la localización óptima debería basarse, como mínimo, en dos elementos: por un lado, la mayor lejanía posible a la población residente y potencialmente afectada, y, por otra parte y simultáneamente la mayor cercanía posible a los productores y usuarios de la instalación.

En este caso, desde un punto de vista operativo, sería necesario considerar dos tipos de distancias, una en línea recta entre población e instalaciones (valor a maximizar), y otra, a través de las vías de comunicación, entre las instalaciones y los usuarios (valor a minimizar).

Junto a este planteamiento sobre la eficiencia espacial cabría añadir otro principio, el de *Justicia Espacial*. Si bien hace referencia al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación entre la población, lo que subyace en este contexto es la idea de que no deben existir concentraciones excesivas de las instalaciones no deseables en una zona de la región de estudio, es decir, que el grado de riesgos y molestias generadas por este tipo de instalaciones deberían distribuirse de manera equitativa entre la población. La justicia espacial es especialmente importante en estos problemas ya que los conflictos sociales relacionados con las instalaciones no deseables se agravan por la percepción por parte de la población de desigualdades muy fuertes en la incidencia de estas instalaciones. En ocasiones, los conflictos derivados de una percepción de fuerte injusticia espacial se hacen insolubles y muy dañinos para la convivencia, por lo que resulta de extrema importancia que las estrategias de localización tengan en cuenta estas circunstancias.

Desde un punto de vista operativo esta idea de justicia espacial se podría medir consiguiendo que las distancias euclidianas que separan la población de la oferta no sean excesivamente diferentes, ya que esto implica grandes diferencias en el posible impacto de la oferta sobre la población y mayor grado de injusticia espacial.

Para la resolución de los problemas de localización óptima de las instalaciones no deseables se han ido desarrollando una serie de modelos de localización-asignación que, de maneras diversas, tienen en cuenta los mencionados principios básicos.

### 3. MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN PARA INSTALACIONES NO DESEABLES

Se trata de modelos binarios de programación matemática (BOSQUE y MORENO, 1990; MORENO, 1999) que intentan establecer la localización óptima de una instalación o servicio, en base a los elementos que influyen en su utilización y considerando también su distribución espacial.

Los modelos de localización-asignación son herramientas para la toma de decisiones que pueden utilizarse de forma prescriptiva (para establecer las acciones a seguir) y descriptivas (para obtener mayor conocimiento de la situación actual). Se relacionan generalmente con los principios básicos mencionados arriba de la siguiente manera:

- i) La *Eficiencia Espacial* se estima mediante la suma de distancias entre la oferta y la demanda.
- ii) Como indicador de la *Justicia Espacial* se utiliza, ya sea el concepto de radio de cobertura o, en otros casos, la desviación típica de las distancias que separan a la población afectada de las instalaciones.

En la literatura sobre el tema (BOSQUE y FRANCO, 1995; DASKIN, 1995; BOSQUE y MORENO, 2004) se pueden encontrar una serie de modelos que en muchos casos parten de otros preexistentes y que han sido modificados en su formulación precisamente para introducir las externalidades negativas derivadas de este tipo de instalaciones:

- a) *Modelo MaxiSum*, o anti-mediano: la solución que encuentra maximiza la distancia, ponderada por la población, entre las instalaciones y los lugares poblados. Una variante de este modelo es el *p-maxisum-sum* o *p-defense* que maximiza la dispersión promedio entre instalaciones. Este modelo más complejo genera una solución distribuida hacia la periferia de la región considerada y tiene la ventaja de considerar todas las distancias y no únicamente las distancias mínimas como el modelo siguiente.
- b) *Modelo MaxiMin*: la solución que obtiene maximiza la distancia mínima entre cualquier centro poblado (ponderada o no por la población residente) y la o las instalaciones no deseables más próximas. Este problema conocido como *p-anti-center*, puede considerarse como la versión maximin del problema *p-center* en los modelos utilizados para la localización de instalaciones deseables. Una segunda variante de este modelo denominado *p-disperse* se resuelve a partir de la maximización de las distancias mínimas de entre cada par de puntos del conjunto de posibles instalaciones, lo que permite una distribución más regular en la disposición final de las instalaciones y, por tanto, de mayor justicia espacial.
- c) *Modelo anti-cobertura*: minimiza la población residente, y por tanto potencialmente afectada, dentro de una distancia determinada en torno a cada instalación. Para ello es preciso establecer un radio de cobertura, que indicaría el área donde las molestias y perjuicios que provoca la instalación son graves (se supone que fuera de este radio estos perjuicios desaparecen o se hacen insignificantes). La solución encontrada en este modelo asegurará que la población residente en ese radio de cobertura sea la mínima posible.
- d) De la combinación de alguno de estos modelos surgen otros más completos y relevantes, pero que no han sido suficientemente desarrollados y aplicados. Sería el caso del modelo *anti-center-maxian* o el *disperse-defense*. El primero maximiza la suma de las distancias ponderadas por el volumen de población residente en los distintos núcleos y minimiza la proximidad entre localidades e instalaciones. El segundo maximiza las distancias mínima y promedio entre las distintas instalaciones.
- e) *Modelo complementario-anticobertura*. Este modelo surge de la preocupación por incluir en su formulación elementos que recojan de alguna forma la per-

cepción del riesgo derivado del funcionamiento de estas instalaciones entre la población (RATICK y WHITE, 1988 Falta). Parte del modelo anticobertura, pero incluyendo un parámetro de riesgo percibido que es proporcional a la escala o magnitud de las instalaciones. Por lo tanto el modelo final busca minimizar tres objetivos: el coste de construcción y operación de una instalación, la compensación a la población y el riesgo agregado derivado del tamaño de la instalación. Saameño y otros (2005) también intentan incluir en este tipo de modelos el problema relacionado con el rechazo a estas instalaciones por parte de la población. Sin embargo en este caso ese parámetro se asigna a cada núcleo de población, considerando que los núcleos menos poblados presentan menos oposición que los más poblados y que este rechazo disminuye con la distancia. Fernández y otros (2000) por su parte, dan un paso más en este sentido y desarrollan un modelo que incluye dos parámetros relacionados tanto con el tipo de instalación como con la intensidad de la repulsión por parte de la población. Este último podría derivarse a partir de la realización de encuestas a la población en los núcleos implicados o bien realizar algún tipo de generalización a partir de diferentes variables como el número de habitantes, su distribución por edad o, incluso, la tasa de paro.

Como se puede apreciar en casi todos los modelos anteriores el único criterio de localización óptima es la distancia en función de la población afectada, no teniéndose en cuenta las necesidades de los posibles usuarios de estas instalaciones.

En este sentido se han realizado diversas aproximaciones a este problema, precisamente partiendo de la idea de que muchas de estas instalaciones podrían considerarse semi-deseables y que, por tanto, deberían situarse lejos de las zonas pobladas para minimizar las molestias derivadas de su funcionamiento, pero al mismo tiempo no demasiado lejos de los potenciales usuarios de las mismas para no aumentar de manera excesiva el coste derivado de su utilización. Así, distintos autores han desarrollado modelos que tuviesen en cuenta de manera simultánea costes sociales y de transporte.

Laurent y otros (1997) desarrollan un modelo discreto «bi-criterio» para la localización de centros de reciclaje. Se trata de una modificación del modelo p-mediano en el que se maximiza la accesibilidad a las instalaciones, pero incluyendo en su formulación las externalidades negativas provocadas por éstas sobre la población a través de un parámetro o coeficiente de difusión de la contaminación (esencialmente acústica o por malos olores). En trabajos posteriores han estudiado cómo de sensibles son los resultados ante la modificación de éste parámetro (FLAHAUT *et al.*, 2002).

Sin embargo, la mayoría de los trabajos desarrollados se basan en modelos de localización continua y para una sola instalación, que en algunos casos resultan demasiado complejos o menos adecuados que los modelos discretos para resolver problemas de planificación reales.

En Carrizosa y Plastria (1999) es posible encontrar una revisión crítica sobre la viabilidad de las distintas alternativas desarrolladas (desde el punto de vista computacional) para medir los costes de transporte y los costes sociales en este tipo de problemas de localización, así como de los distintos métodos de optimización aplicables.

Brimberg y Juel (1998) proponen resolver este problema basado en dos criterios a partir de la minimización de la suma ponderada de ambos. En el caso de los costes de transporte (asociado al movimiento de mercancías desde la instalación a los clientes) aplican el modelo *MiniSum*. Los costes sociales son tratados como una suma ponderada de la función decreciente de la distancia euclidiana entre la instalación y los núcleos poblados (donde se encuentran los potenciales usuarios de las instalaciones) ponderada por la población residente en los mismos.

Melachrinoudis (1999), por su parte, desarrolla un procedimiento basado en la combinación de los modelos *MaxiMin* y *MiniSum*, dividiendo progresivamente el espacio (conjunto) de posibles soluciones y descartando las menos eficientes. Este modelo está basado en el cálculo de distancias rectilíneas, pero posteriormente el autor ha desarrollado un nuevo modelo en el que se utiliza la métrica euclidiana (MELACHRINOUDIS y XANTHOPULOS, 2003).

Así mismo, en los últimos años, y debido al creciente interés y concienciación sobre los distintos problemas ambientales, algunos autores han intentado incluir también criterios medioambientales en la formulación de estos modelos, basándose de nuevo en la distancia entre las instalaciones candidatas y la población (BRIMBERG y JUEL, 1998), en algunos casos utilizando funciones no lineales (ROMERO-MORALES *et al.*, 1997) o introduciendo un parámetro que excluya del cómputo a aquellos candidatos que se encuentren cercanos a lugares «prohibidos» por su importancia desde el punto de vista medioambiental como reservas naturales, embalses, etc. (FERNÁNDEZ *et al.* 2000).

Por otra parte, se pueden encontrar otras formulaciones de modelos en los que se considera la interacción entre las propias instalaciones (un planteamiento conectado con el principio de justicia espacial), que evita la excesiva concentración de los equipamientos no deseables en una misma región (MELACHRINOUDIS y SMITH, 1995).

En cualquier caso, no encontramos en la literatura revisada un enfoque integral del problema desde el punto de vista de los usuarios que permita simultáneamente localizar varias instalaciones, considerar las instalaciones actuales y permitir el uso de un concepto más amplio de las distancias. Justamente como un intento de cubrir este hueco se propone el modelo *MinMaxSum*, que además de permitir la utilización de dos criterios para la resolución del problema de localización, permite utilizar distintos tipos de distancia y ha sido integrado en un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial sobre una plataforma SIG y enfocado a localización de todo tipo de equipamientos.

#### 4. VENTAJAS Y POTENCIAL DE LA INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE LOCALIZACIÓN CON LOS SIG

Los modelos de localización tratan problemas especialmente difíciles de estudiar y resolver que son muy frecuentes en el proceso de toma de decisiones en la planificación urbana y regional. En consecuencia, es lógico pensar que es importante utilizar y desarrollar las herramientas más adecuadas para tratar estos problemas. Por esta razón se han realizado esfuerzos en aprovechar las ventajas de integrar los modelos de

localización y los SIG (BOSQUE, *et al.*, 1999; CHURCH, 1999; CHURCH y SO-RENSSEN, 1999; YEH y CHOW, 1996).

Aunque los modelos de localización tienen una naturaleza geográfica incuestionable, debido a la formulación matemática de los modelos de localización-asignación, y a los problemas que por lo general tienen los SIG para integrarse con diversas fuentes de información y con otros paquetes de software, se ha realizado un gran esfuerzo para prescindir del uso de herramientas propias de la geocomputación y para tratar los factores espaciales mediante formalizaciones matemáticas, esto es especialmente evidente en las referencias sobre modelos de localización para instalaciones semi-nocivas mencionados arriba.

Este intento de llevar todos los aspectos de los modelos de localización al campo de la programación matemática implica importantes limitaciones en el planteamiento, la resolución y el análisis de los modelos. Otra cuestión importante es que no se toma en cuenta el objetivo final de los problemas de localización en un marco más amplio, desde el punto de vista de los actores involucrados en la toma de decisiones. Esto implica el uso de metodologías y herramientas para asistir a la toma de decisiones conjunta y participativa. Si el planteamiento del problema y los resultados son expresados en términos excesivamente sofisticados se crea una barrera para hacer llegar esta información a la administración pública de una manera práctica y útil.

Estas dificultades se han intentado resolver mediante los Sistemas de Ayuda a la Decisión espacial (SADE). En estos sistemas se integran herramientas de análisis y bases de datos geográficas para generar informes y evaluaciones que son requeridos por los decisores (BOSQUE y MORENO, 1993; BOSQUE, 2001; DENSHAM, 1991). El sistema LOCALIZA es la propuesta específica de un SADE aplicado a la Localización de Equipamientos (PALM, 2001), y ha sido aplicado a varios problemas piloto en España, Argentina y Colombia (BOSQUE, y MORENO, 2004; RAMÍREZ, 2000).

LOCALIZA integra módulos propios para la evaluación y búsqueda de nuevas soluciones de problemas de localización de equipamientos con el software Idrisi. Partiendo del enfoque principalmente Raster de Idrisi se ha diseñado una metodología singular para el tratamiento de las distancias. Las matrices de distancias requeridas por los distintos módulos del sistema pueden determinarse a partir de superficies de fricción (Eastman, 1989). Aunque este procedimiento puede ser muy lento y exigente desde el punto computacional, permite considerar, por ejemplo, aspectos como las redes de transporte, la percepción de la distancia o el impacto ambiental, o combinaciones de todos estos factores utilizando el modelado cartográfico (GÓMEZ, *et al.*, 1995; TOMLIN, 1990) y medidas difusas en evaluación multicriterio (EASTMAN y JIANG, 2000).

Además de las grandes ventajas en flexibilidad y poder de expresión que le proporciona el análisis raster de las distancias, LOCALIZA permite localizar varias instalaciones simultáneamente, y considerar las instalaciones actuales. Todo esto para diversos tipos de modelos de localización-asignación y para instalaciones tanto deseables como no deseables. Estas características que parecen triviales lo diferencian de otras herramientas similares integradas también en un SIG tales como ArcInfo o Spring. El diseño orientado a objetos utilizado en la implantación de los modelos de localiza-



ción-asignación de LOCALIZA permite reutilizar el software para incluir con facilidad nuevos modelos y técnicas de análisis. El modelo MinMaxSum es un ejemplo de como utilizar estas posibilidades al combinar un modelo MiniSum con otro MaxiSum

## 5. MODELO MINMAXSUM

El objetivo general es obtener las mejores localizaciones que nos aseguren el mínimo impacto posible sobre la población y que, por otra parte, satisfagan los requerimientos de los demandantes de los servicios que prestan este tipo de instalaciones, como lo son, por ejemplo, los establecimientos industriales y similares.

La formulación del modelo *MinMaxSum* se ha realizado de la siguiente manera:

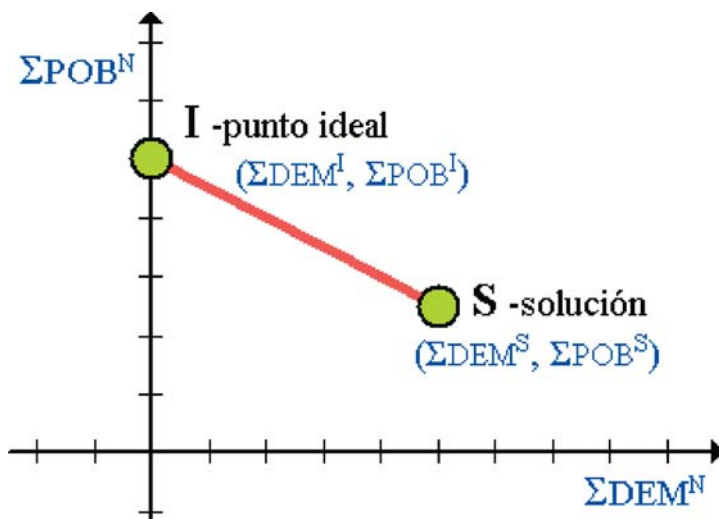
Se debe buscar una solución compromiso entre dos objetivos, que pueden ser contradictorios: aumentar tanto como sea posible la distancia en línea recta entre las instalaciones y los núcleos donde reside la población afectada, y disminuir la distancia sobre la red de transporte entre las instalaciones y los centros de demanda (normalmente los centros productores de residuos) que deben ser llevados a las instalaciones para su tratamiento.

Una manera de obtener la solución compromiso puede ser utilizar el mecanismo del cálculo del punto ideal (GÓMEZ y BARREDO, 2005; MALCZEWSKI, 1999). Se define el punto ideal como la solución ideal, imposible por otra parte, en que la distancia total a los productores sea mínima y la distancia a la población sea máxima. Seleccionada la solución óptima podemos valorar cualquier otra solución por su distancia a la óptima, tal y como se muestra en la figura 1. En ella se representa el espacio matemático de las posibles soluciones al problema que estudiamos; en el eje vertical se representan la suma de las distancias entre cualquier solución y las poblaciones afectadas, en el eje horizontal se muestran la suma de las distancias entre cualquier solución y los productores. De ese modo el punto I es la solución ideal, en él la suma de las distancias a la población es la máxima posible y la suma de las distancias a los productores es la mínima, es decir, cero. Cualquier otra solución S se puede valorar obteniendo la distancia en línea recta, dentro de este espacio matemático de soluciones, respecto al punto ideal.

A partir de esta idea se puede ir probando entre las soluciones posibles y determinar cual es la separación existente con la ideal en busca de la solución más próxima a éste.

Este mecanismo de encontrar la mejor solución tropieza con una grave dificultad: la explosión combinatoria que produce un gran crecimiento del espacio de soluciones por aumentos relativamente pequeños en las dimensiones del problema. Para tratar de manejar este problema se han desarrollado distintos algoritmos de resolución, siendo uno de los más eficaces y conocidos el de Teitz y Bart (TEITZ y BART, 1968; MORENO, 1996). Por lo tanto, se puede hallar la solución al modelo MinMaxSum empleando el procedimiento del Punto Ideal junto con el algoritmo de Teitz y Bart para intentar obtener la mejor solución al problema. No obstante, esta combinación tiene otra complicación: las distancias en línea recta y a través de la red de transporte

Figura 1. Diferencia entre una solución al problema MinMaxSum (S) y el Punto Ideal (I)



FUENTE: Elaboración propia.

se calculan con unidades de medida distinta, ya que sobre un mapa raster la red de transporte se calcula utilizando medidas de fricción. Los dos indicadores utilizados: distancia a la población y distancia a los productores, se tienen que expresar en una escala similar, de manera que ambas variables se consideren de forma similar en la evaluación. Por ello es necesario realizar una normalización de cada uno de los factores involucrados para hacerlos comparables.

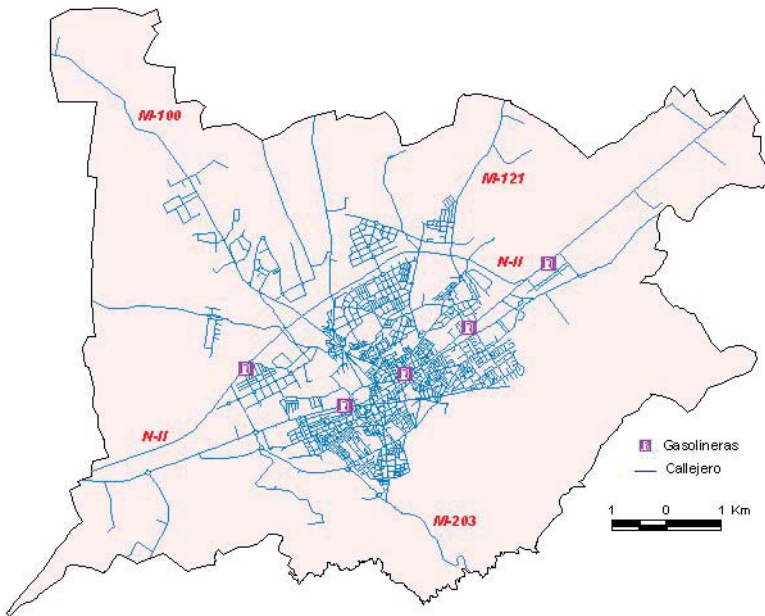
## 6. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL MODELO MINMAXSUM

Para mostrar las potencialidades y debilidades del modelo propuesto se describe a continuación una aplicación a un caso real en la ciudad de Alcalá de Henares (Madrid, España).

Se trata de resolver el problema de encontrar la localización más adecuada para un conjunto de estaciones de servicio (gasolineras) en la ciudad de Alcalá de Henares. Es evidente que este tipo de instalaciones tienen una utilidad general muy importante pero resultan una fuente de inconvenientes y peligros para la población residente en sus cercanías.

En Alcalá de Henares existen cinco instalaciones de este tipo situadas dentro de la ciudad, y, por lo tanto, muy próximas a la población. La figura 2 muestra su posición concreta en la ciudad.

Figura 2. Localización de las gasolineras en la ciudad de Alcalá de Henares

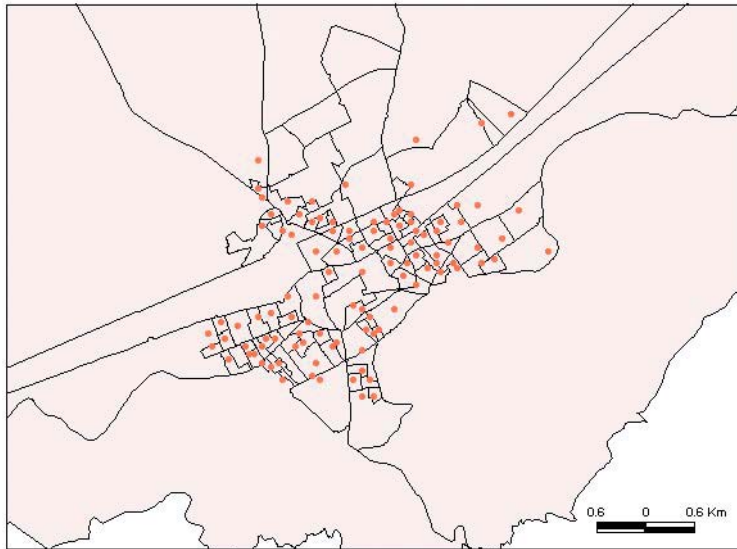


FUENTE: Elaboración propia.

Para este estudio se ha supuesto que la población potencialmente afectada se sitúa en los centroides de las secciones censales de la ciudad (ver figura 3). Por lo tanto, la solución óptima que estamos buscando debería situar la posición de las instalaciones lo más alejado posible de estos puntos. Pero esto podría llevar a colocar las gasolineras fuera de la ciudad, con los inconvenientes que se podrían generar para los automovilistas complutenses a la hora de obtener el combustible para sus vehículos. Es necesario considerar otro aspecto del problema, la localización más frecuente de los usuarios de estas gasolineras, es decir la posición de la demanda, de los usuarios. Nosotros hemos supuesto que esta demanda se realiza espacialmente en las zonas de la ciudad más transitadas por los automóviles, por ello se han señalado una serie de lugares que son representativos de la demanda de uso de las gasolineras (ver figura 4).

Ahora podemos evaluar cual es la posición actual de las cinco estaciones de servicio existentes. Para ello calculamos la distancia total que separa a las cinco gasolineras de la población y los recorridos que los automóviles tienen que realizar, desde los puntos de demanda, hasta las actuales gasolineras y que se muestran en la tabla 1. Igualmente en dicha tabla se incluyen las personas que viven a menos de 200 o de 500 metros de una gasolinera, y que, por lo tanto, se supone están expuestos a sufrir accidentes o molestias por la actividad de esta instalación. Además, se incluyen las soluciones propuestas para los

Figura 3. Localización de los centroides de las secciones censales



FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 1. Comparación de de los modelos y la situación actual

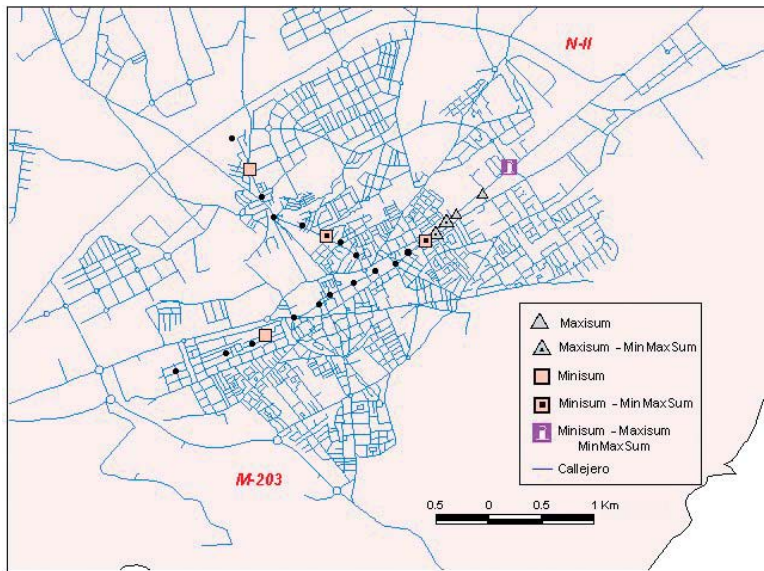
<i>Caso</i>	<i>Población &lt; 200 m</i>	<i>Población &lt; 500 m</i>	<i>Suma de los costos a la demanda</i>	<i>Suma de distancias a la población (m)</i>
Actual	4,9%	33,5%	1.124	64.629
MiniSum	11,9%	50,1%	156	54.002
MaxiSum	2,4%	18,2%	1.150	130.513
MinMaxSum	7,8%	29,6%	324	90.684

FUENTE: Elaboración propia.

modelos MiniSum, MaxiSum y MinMaxSum considerando los puntos de demanda como lugares candidatos para la reubicación de las 5 gasolineras actuales.

En esta tabla comparativa es posible apreciar varios hechos. La situación actual de las cinco gasolineras es intermedia entre las obtenidas de usar los modelos de localización óptima: *MiniSum* o *MaxiSum*. *MiniSum* mejora muy notablemente la proximidad de las gasolineras a los puntos de demanda (156 unidades de costo de recorrido

Figura 4. Localización de los puntos de demanda a las gasolineras y soluciones propuestas



FUENTE: Elaboración propia.

en relación a 1124 en el caso actual), pero eso lo consigue aproximando su situación a la población (solo 54 Km de separación total con la población y mas del 50% de la población habitando a menos de 500 m de una gasolinera). Por su parte, el modelo *MaxiSum* está en la posición inversa, ha alejado las gasolineras de la población (a 130 Km) pero también de la demanda (a 1150 unidades de costo de recorrido), igualmente solo un 18% de la población se halla expuesta, a menos de 500 m de una gasolinera.

Por lo tanto, como se puede comprobar los dos modelos ofrecen soluciones contrapuestas y, en cierto sentido, inadecuadas. Una por el peligro que puede conllevar para la población, la otra por las distancias que tienen que recorrer los automovilistas para hacer uso de las gasolineras.

Cuando existen varios criterios de decisión, se dice que una alternativa domina a otra cuando tiene una mejor valoración para cada uno de estos criterios. El modelo propuesto, *MinMaxsum*, se puede considerar mejor desde los dos puntos de vista: por un lado disminuye la distancia a la demanda (324 unidades de costo de recorrido en relación a 1124 en el caso actual) y por el otro aumenta la suma de las distancias a la población (de 65 Km a 91 Km). Aunque disminuye un poco la cantidad de población dentro del radio de seguridad de 500 m (de 33,5% a 29,5%), aumenta casi el doble la población a menos de 200 m (7,8% en relación al 4,9% de la situación actual). En este caso sería necesario estudiar con más detalle el riesgo que generan las estaciones de gasolina para definir con mayor precisión los radios de seguridad.

## 7. CONCLUSIONES

Modelos del tipo de *MinMaxSum* son una primera aproximación para introducir en términos formales la negociación entre los intereses de los distintos actores involucrados en problemas complejos y con soluciones difíciles. Parece conveniente insistir en la conveniencia de la utilización conjunta de diversos tipos de análisis (por ejemplo, modelos *MaxiSum* y *MinMaxSum*) y en especial para problemas de localización de unas instalaciones que, habitualmente, cuentan con un rechazo frontal por parte de la población. En este punto enlazaríamos con esa corriente de autores que abogan por el establecimiento de sistemas de información participativos, que ayuden a establecer ese eslabón de conexión entre las autoridades y la población afectada por actuaciones de este tipo. Probablemente, decisiones bien justificadas desde el punto de vista del empleo de las variables y modelos más adecuados, contribuirían de manera muy positiva a conseguir un cierto consenso.

Es posible realizar variaciones del modelo *MinMaxSum* y esto abre un campo de investigaciones a futuro. En este sentido, sería especialmente interesante la consideración del principio de Justicia Espacial ya que los dos criterios involucrados en *MinMaxSum* son mediciones del principio de Eficiencia Espacial. Se podría formular, por ejemplo, un modelo que maximice la cobertura de los centros de gestión sobre los demandantes (por ejemplo, los productores de residuos) y minimice la cobertura de la población: es decir un modelo *CobeMaxMin*.

LOCALIZA propone una metodología integral para resolver diferentes aspectos de los problemas de localización óptima, en concreto los que se refieren a los aspectos espaciales y su implicación en el cálculo de las distancias que son tratadas a partir de las herramientas disponibles en un SIG. De esta manera, no es necesario establecer estas cuestiones directamente en el modelo de Programación Matemática, lo que conduce a modelos mucho más simples y más fáciles de resolver. Además, se aumentan enormemente las posibilidades de adaptar los modelos a diversos tipos de situaciones desde diversos enfoques.

El sistema LOCALIZA ha sido diseñado para tener la flexibilidad de implantar con relativa facilidad una gran diversidad de modelos de localización a los que puedan aplicarse distintos métodos de resolución. El interés fundamental es lograr que puedan ser aplicadas en diversos problemas a los que la administración pública ha de hacer frente y en los cuales se considera que el análisis espacial puede ser muy útil. El desarrollo futuro de LOCALIZA apunta a convertirse en una librería y diversos productos finales de software libre multiplataforma.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- BOSQUE, J. (2001): «Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE)». *El Campo de las Ciencias y las Artes*, 138, págs.137-174.
- BOSQUE, J. y FRANCO, S. (1995): «Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables». *Serie Geográfica*, 5, 97-112.

- BOSQUE, J., GÓMEZ, M., RODRÍGUEZ V., DÍAZ M. A., RODRÍGUEZ, A. E. y VELA A. (1999): «Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en SIG», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, págs. 295-323.
- BOSQUE SENDRA, J. y MORENO JIMÉNEZ, A. (1990): «Facility location analysis and planning: a GIS approach». *EGIS'90. First European Conference on Geographical Information Systems*. Utrecht, EGIS Foundation, págs. 87-94.
- , (1993): «Diseño de un sistema de información geográfica para la gestión de equipamientos sociales». *Asociación española de SIG. 2º Congreso. Madrid*, AESIG/Estudio gráfico, págs. 213-222.
- , (2004): *Sistemas de Información Geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos*, Paracuellos de Jarama, Editorial RA-MA.
- BRIMBERG, J. y JUEL, H. (1998). «A bicriteria model for locating a semi-desirable facility in the plane», *European Journal of Operational Research*, 106, págs. 144-151.
- CARRIZOSA, E. y PLASTRIA, F. (1999): «Location of semi-obnoxious facilities», *Studies in Locational Analysis*, 12, págs. 1-27.
- CHURCH, R. L. (1999). «Location Modelling and GIS», en LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., y RHIND, D. W., (Eds.): *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications and Management*, New York, John Wiley and Sons, págs. 293-303.
- CHURCH, R. L. y SORENSEN, P., (1999): «Integrating normative location models into GIS: problems and prospects with the p-median model», en LONGLEY, P. A. y BATTY, M., (Eds.): *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, New York, John Wiley and Sons, págs. 167-183.
- DASKIN, M. (1995): *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, New York, John Wiley and Sons.
- DENSHAM, P. J. (1991): «Spatial Decision Support Systems» en GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., y RHIND, D. W., (Eds.): *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, New York, Longman Group Ltd., págs. 403-412.
- EASTMAN, J. R., (1989): «Pushbroom Algorithms for Calculating Distances in Raster Grids», *Proceedings, AUTOCARTO*, 9, págs. 288-297.
- EASTMAN, J. R. y JIANG, H. (2000), «Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS», *International Journal of Geographical Information Science*, 14 (2), págs. 173-184.
- FERNÁNDEZ, J.; FERNÁNDEZ, B. y PELEGRÍN, B. (2000): «A continuous location model for siting a non-noxious undesirable facility within a geographical region», *European Journal of Operational Research*, 121, págs. 259-274.
- FLAHAUT, B.; LAURENT, M. y THOMAS, I. (2002) : «Locating a community recycling center within a residential area : a Belgian case study», *The professional Geographer*, 54, 1, págs. 67-82.
- GÓMEZ DELGADO, M. y BARREDO CANO, J. I. (2005): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Paracuellos de Jarama, Ed. Ra-Ma.
- GÓMEZ, M., RODRÍGUEZ V., RODRÍGUEZ, A., CHUVIECO, J. y CHUVIECO, E. (1995): «Diseño de carreteras mediante un sistema de información geográfica: costes de construcción y costes ambientales», *CIUDAD Y TERRITORIO. Estudios Territoriales III*, 104, págs. 361-376.
- IHLANFELDTA, K. y TAYLOR, L. (2004): «Externality effects of small-scale hazardous waste sites: evidence from urban commercial property markets», *Journal of Environmental Economics and Management*, 47, págs. 117-139.
- LAURENT, M.; PEETERS, D. y THOMAS, I. (1997): «Spatial externalities and optimal locations: simulations on a theoretical network», *Studies in Locational Analysis*, 11, págs.193-210.
- Malczewski J. (1999): *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York, John Wiley & Sons, Inc.

- MELACHRINOUDIS, E. y SMITH, J. M. (1995): «An O(mn<sup>2</sup>) algorithm for the Maximin problem in E<sup>2</sup>», *Operations Research Letters*, 18, págs. 25-30.
- MELACHRINOUDIS, E. (1999): «Bicriteria location of a semi-obnoxious facility». *Computers & Industrial Engineering*, 37, págs. 581-593.
- MELACHRINOUDIS, E. y XANTHOPULOS, Z. (2003). «Semi-obnoxious single facility location in Euclidean space». *Computers and Operations Research*, 30 (14), págs. 2191-2209.
- MORENO, A. (1995): «La medición de las externalidades ambientales: un enfoque espacio-temporal». *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 27, págs. 485-496.
- MORENO PÉREZ, J. A. (1996). «Heurísticas de búsqueda para problemas discretos de localización-asignación», en PUERTO ALBANDOZ, J., MUÑOZ MÁRQUEZ, M., CONDE SÁNCHEZ E. y CARRIZOSA PRIEGO, E. (Eds.): *Lecturas en teoría de localización*, Sevilla, Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla, págs. 107-134.
- MORENO, A. (1999): «En busca de la localización óptima para instalaciones perjudiciales: Propuesta de modelos y resolución con sistema de información geográfica». *Boletín de la A.G.E.*, 27, págs. 99-115.
- MORRILL, R. L. y SYMONS J., (1977): «Efficiency and Equity Aspects of Optimum Location», *Geographical Analysis*, 9, págs. 215-225.
- OGRYCZAK W. (2000): «Inequality measures and equitable approaches to location problems», *European Journal of Operational Research*, 122, págs. 374-391.
- PALM, F. J. (2001). «Diseño de Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial para la Localización de Equipamientos: LOCALIZA». *Trabajo de Investigación Tutelado, Doctorado en Cartografía S.I.G. y Teledetección*, Universidad de Alcalá.
- RAMÍREZ, M. L. (2000): «Evaluación y diagnóstico de la situación hospitalaria en la Provincia del Chaco (Argentina): aplicación de modelos de localización-asignación óptima mediante S.I.G., para posibles nuevos hospitales». *Trabajo de Investigación Tutelado, Doctorado en Cartografía S.I.G. y Teledetección*, Universidad de Alcalá.
- RATICK, S. y WHITE A. (1988): «A risk-sharing model for locating noxious facilities», *Environment and Planning B: Planning and Design*, 15, págs. 165-179.
- ROMERO-MORALES, D., CARRIZOSA, E. y CONDE, E. (1997): «Semi-obnoxious location models: A global optimization approach», *European Journal of Operational Research*, 102, págs. 295-301.
- SAAMEÑO RODRÍGUEZ, J. J.; Guerrero García, C.; Muñoz Pérez, J. y Mérida Casermeiro, E. (2006): «A general model for the undesirable single facility location problem», *Operations Research Letters*, en prensa.
- TEITZ, M. y BART, P. (1968): «Heuristic Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted Graph», *Operations Research*, 16 (5), págs. 955-961.
- THOMAS, P., CHAN, Y., LEHMKUHL, L. y NIXON, W. (2002). «Obnoxious-facility location and data-envelopment analysis: A combined distance-based formulation». *European Journal of Operational Research*, 141, págs. 495-514.
- TOMLIN, D. (1990): *Geographic information systems and cartographic modelling*, Prentice Hall.
- YEH, A. G.-O. y CHOW, M. H. (1996): «An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning: an example of open space planning», *Computers, Environment and Urban Systems*, 20, (4-5), págs. 339-350.