

Resolución de un Problema de Localización Difuso mediante Sistemas de Información Geográfica

Christopher Expósito-Izquierdo, Airam Expósito-Márquez, Belén Melián-Batista y J. Marcos Moreno-Vega

Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas
Universidad de La Laguna
38271 La Laguna, España
{cexposit, aexposim, mbmelian, jmmoreno}@ull.es

Resumen Los problemas de localización tratan de identificar la mejor ubicación para la instalación de una nueva infraestructura dentro de un contexto particular. En este trabajo se presenta un problema de localización multi-objetivo para la ubicación de una nueva infraestructura en España considerando criterios de sostenibilidad y desde una perspectiva difusa. Para resolver este problema se emplean datos georreferenciados abiertos proporcionados por un Sistema de Información Geográfica y se proponen varias funciones miembro difusas para representar el grado de pertenencia posible de las localizaciones deseadas. Las localizaciones resultantes son combinadas de acuerdo a las preferencias del decisor.

Keywords: Optimización difusa, Teoría de localización, Sistema de información geográfica

1. Introducción

La *Teoría de localización* es la disciplina que trata de descubrir los mejores emplazamientos para un conjunto finito de nuevas instalaciones –escuelas, centros de distribución, hospitales, fábricas, estaciones de bomberos, etc.–. Los problemas de localización han generado un gran interés en la comunidad científica en los últimos años dada su amplia gama de aplicaciones prácticas e interdisciplinariedad. La literatura recoge una gran cantidad de información acerca de la teoría de localización y sus campos de aplicación [5] [6] [11].

La sociedad actual aboga por aspectos ambientales, sociales y económicos en las decisiones de localización [10]. Al mismo tiempo, las políticas gubernamentales promueven la aparición de nuevas iniciativas de desarrollo sostenible. Estos hechos han dado lugar a que los criterios de sostenibilidad en la teoría de localización se han consolidado como una línea de investigación activa en los últimos años [3]. Estos criterios son especialmente relevantes cuando se ubican instalaciones peligrosas –refinerías, plantas de energía nuclear, etc.– o impopulares –cementeros, fábricas, etc.– cerca de áreas naturales [14] y de entornos

habitacionales. El sector empresarial también está preocupado por este nuevo escenario global. En este sentido, las directrices de localización han sufrido un cambio fundamental lejos de los enfoques neoclásicos basados en criterios comerciales hacia enfoques de negocio emergentes en los que se observan los criterios de sostenibilidad como oportunidades destacadas para fortalecer la imagen corporativa, reducir costes y aumentar los beneficios [4].

A pesar de que las decisiones de localización se tratan como problemas de optimización, los criterios y las restricciones suelen estar sujetos a cierto grado de incertidumbre y ambigüedad. La razón se suele encontrar en la forma en que los responsables de las decisiones expresan sus preferencias. En la mayoría de los casos, el conocimiento experto dado por un decisor se expresa a través de términos imprecisos, tales como *tal vez*, *no demasiado lejos*, o *de calidad similar* [1]. A la hora de tomar decisiones de localización en contextos reales, los sitios potenciales para colocar una instalación determinada no suelen verificar una restricción dada en sentido estricto. Por ejemplo, éste es el caso de seleccionar un sitio adecuado para colocar un nuevo generador eléctrico destinado a servir a una población dada. En algunos casos, algunas personas podrían pensar que unos pocos cientos de metros son suficientes para evitar el posible ruido, mientras que otras personas podrían pensar que se requieren al menos varios kilómetros. La lógica difusa [13] surge en estos entornos como una alternativa más útil que la lógica Booleana clásica debido a su cercanía al razonamiento humano y su aptitud para hacer frente a las no linealidades e incertidumbres.

Este trabajo presenta a modo de ejemplo el estudio de un caso de localización de nuevas infraestructuras en España en un entorno competitivo, considerando varios criterios difusos. La solución del problema de localización propuesto se basa en datos georreferenciados abiertos proporcionados por un Sistema de Información Geográfica [9].

El resto del presente trabajo se organiza tal como sigue. La Sección 2 introduce el problema de optimización a abordar. Posteriormente, la Sección 3 presenta un esquema de resolución del problema planteado, mientras que la Sección 4 presenta las principales conclusiones extraídas del trabajo e indica algunas líneas de trabajo futuras.

2. Descripción del Problema

En el presente trabajo, se propone un problema de localización multi-objetivo difuso. El objetivo principal es evaluar la aplicabilidad de las diferentes funciones de pertenencia difusa para satisfacer varios criterios imprecisos en entornos prácticos. Ésto se lleva a cabo a través del uso de datos georreferenciados abiertos proporcionados por un Sistema de Información Geográfica (GIS).

El objetivo del problema bajo análisis es determinar los sitios más adecuados para colocar un número determinado de nuevos centros comerciales. En este caso, las ubicaciones de los centros comerciales están sujetas a varios criterios de sostenibilidad difusos. En concreto, sus ubicaciones deben satisfacer simultáneamente, criterios socioeconómicos y de transporte. Es decir, (i) la ubicación de

los nuevos centros comerciales en un entorno competitivo hace que deban encontrarse lo más lejos posible de los centros comerciales preexistentes. Con el fin de aumentar la cuota de mercado en un entorno en el que ya existe competencia, (ii) la localización de los nuevos centros comerciales tienen que estar también cerca de los principales centros poblacionales a fin de contar con el mayor número de clientes potenciales. Este hecho se basa en considerar que, desde un punto de vista de la *Teoría de juegos*, los clientes prefieren comprar en las instalaciones más cercanas [8]. Finalmente, los lugares deben estar bien comunicados con la población con el objetivo de facilitar su acceso. Por ello, las localizaciones tienen que estar cerca de (iii) las principales autopistas y (iv) vías ferroviarias.

Cabe destacar que cada punto en el mapa bajo análisis podría ser considerado como un lugar viable para un nuevo centro solicitado. Esto significa que el espacio de soluciones factibles del problema de optimización se compone de todos los puntos definidos por el SIG. Este conjunto de puntos en lo sucesivo se denota como \mathcal{L} . Desde un punto de vista general, cada punto $i \in \mathcal{L}$ está definido en este contexto por sus coordenadas geográficas en el mapa, indicadas como (x_i, y_i) . En la práctica, los puntos situados en, por ejemplo, el mar, las regiones con alto valor ecológico, y así sucesivamente, se desechan de manera intuitiva, y por lo tanto deben ser retirados de la solución factible a través de restricciones explícitas. En este caso, el conjunto de los centros comerciales preexistentes se denota como \mathcal{M} . Sus características y ubicaciones están representados a través de datos georreferenciados abiertos. Por otra parte, el conjunto de lugares en los que los nuevos centros comerciales se pueden colocar se denota como $\mathcal{L}' \subseteq \mathcal{L}$. El número de centros comerciales a localizar, denotado como $k > 0$, se selecciona por el decisor. Esto es, $|\mathcal{L}'| = k$. Debe tenerse en cuenta que éste puede ser fácilmente incluido en el modelo matemático correspondiente como una restricción. Sin embargo, este aspecto está fuera del alcance de este estudio.

De acuerdo con la descripción anterior, el problema de optimización propuesto, \mathcal{P} , en un mapa rectangular con un ancho de \mathcal{W} y altura \mathcal{H} , puede ser definido formalmente como sigue:

$$\mathcal{P} : \min_{i \in \mathcal{L}'} (-f_1(i), f_2(i), f_3(i), f_4(i)) \quad (1)$$

sujeta a

$$1 \leq x_i \leq \mathcal{W} \quad (2)$$

$$1 \leq y_i \leq \mathcal{H} \quad (3)$$

En este caso, $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$, $f_3(\cdot)$, y $f_4(\cdot)$ son funciones escalares definidas tales como:

$$f_1(i) = \sum_{j \in \mathcal{M}} d_{ij} \quad (4)$$

$$f_2(i) = \sum_{j \in \mathcal{L}'} d_{ij} \quad (5)$$

$$f_3(i) = \sum_{i \in \mathcal{R}} d_{ij} \quad (6)$$

$$f_4(i) = \sum_{i \in \mathcal{T}} d_{ij} \quad (7)$$

donde $\mathcal{M} \subseteq \mathcal{L}$, $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{L}$, $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{L}$ y $\mathcal{T} \subseteq \mathcal{L}$ son los conjuntos de puntos que componen los centros comerciales preexistentes, los centros de población, autopistas y vías férreas, respectivamente. Además, d_{ij} representa la distancia entre los puntos de $i \in \mathcal{L}$ y $j \in \mathcal{L}$ en el mapa.

Varias funciones de pertenencia difusa se aplican para representar la posibilidad de que un sitio determinado sea adecuado para la ubicación de un nuevo centro comercial sobre la base de los criterios anteriormente definidos.

Debido al hecho de que los criterios impuestos por el problema son imprecisos en la práctica, el conjunto de puntos en el mapa son definidos como difusos. Los conjuntos difusos se utilizan en problemas de optimización multi-objetivo, con el objetivo de estandarizar los criterios existentes. Esto se hace mediante la asignación, a cada punto proporcionado por el SIG, de un grado de pertenencia para cada criterio. Un conjunto difuso se denota como $(\tilde{L}, \mu_{\tilde{L}})$, donde \tilde{L} es el conjunto de puntos proporcionados por el SIG desde una perspectiva difusa y $\mu_{\tilde{L}}$ es una función de la forma $\mu_{\tilde{L}} : L \rightarrow [0,1]$. $\mu_{\tilde{L}}(i)$ cuantifica el grado de pertenencia del punto $i \in L$ al conjunto difuso \tilde{L} . En este caso, un valor $\mu_{\tilde{L}}(\cdot) = 1$ representa un miembro con pertenencia total al conjunto, $\mu_{\tilde{L}}(\cdot) = 0$ indica la no pertenencia al conjunto, mientras que los valores intermedios (*i.e.*, $0 < \mu_{\tilde{L}}(\cdot) < 1$) representan la pertenencia parcial al conjunto.

Dada una función continua proporcionada por un SIG, el escenario propuesto se puede plantear como un problema de optimización multi-objetivo que busca determinar las ubicaciones que satisfacen los criterios impuestos. Para cada criterio, los puntos están designados por una función de pertenencia difusa en particular, que indica el grado en que se satisface el criterio pertinente. Por último, estos grados de pertenencia se combinan adecuadamente. La literatura abarca muchas alternativas de combinación en el análisis geoespacial basada en SIGs. Algunos ejemplos se pueden encontrar en [12], [15], y [7]. Sin embargo, en aras de la simplicidad, los puntos en las diferentes funciones de pertenencia difusa son en este trabajo combinados mediante el uso de la combinación lineal ponderada [2] con pesos α_1 , α_2 , α_3 , y α_4 asociados a las funciones individuales $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$, $f_3(\cdot)$ y $f_4(\cdot)$, respectivamente. Los valores de los pesos son seleccionados por el decisor en base a sus preferencias particulares.

3. Experiencia Práctica

El problema de optimización introducido en la Sección 2 es tratado a continuación en el contexto de España, específicamente en la Península Ibérica y las Islas Baleares. Para este propósito, se han empleado datos georeferenciados abiertos disponibles en el proyecto OpenStreetMap project, OSM¹ y gestionados a través del Sistema de Información Geográfica (SIG) llamado ArcGIS².

¹ <https://www.openstreetmap.org>

² <https://www.arcgis.com>

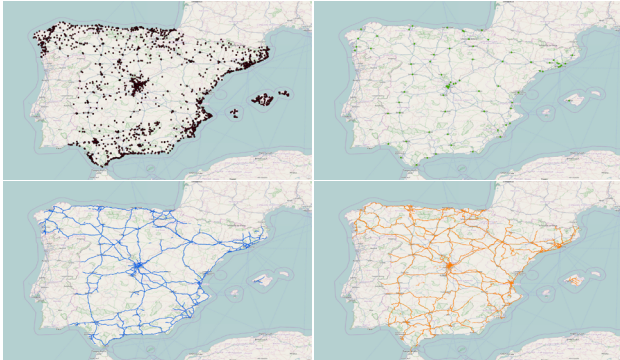


Figura 1: Capas de datos filtrados con información relativa a centros comerciales, ciudades, autopistas y vías de tren, respectivamente.

Los datos georreferenciados se encuentran divididos en cuatro capas. Éstas incluyen información relativa a ubicaciones, puntos de interés, autopistas y vías de tren. Sin embargo, la información proporcionada por OSM involucra una gran cantidad de información irrelevante para el caso de estudio bajo análisis. Consecuentemente, un proceso de filtrado preliminar es llevado a cabo para eliminar la información no deseada de las capas originales. Las capas de datos conteniendo la información filtrada son representada en la Figura 1.

Una vez la información proporcionada por OSM ha sido adecuadamente filtrada, se definen cuatro funciones miembro escalares asociadas a la distancia entre pares de puntos. Estas funciones indican el grado de adecuación de cada punto en el mapa a la hora de satisfacer los criterios impuestos sobre la base de los centros comerciales existentes, ciudades, autopistas y vías de tren, respectivamente. Con este objetivo en mente, se han generado nuevas capas de datos conteniendo información relativa a la distancia Euclídea entre cada par de puntos. Las nuevas capas contienen la distancia Euclídea desde cada punto del mapa hasta el elemento de interés más próximo (*i.e.*, centros comerciales existentes, ciudades, autopistas o vías de tren, respectivamente). De esta forma, se obtiene una capa de datos por cada tipo de elemento de interés, en la cual una escala de colores es empleada para representar la distancia gradual entre los elementos relevantes para el problema de optimización y los restantes puntos. Estas capas son las mostradas en la Figura 2.

Una función miembro difusa es empleada a continuación para cada capa con las distancias Euclídeas. De esta manera, un cierto grado de adecuación se puede definir para cada punto en el mapa bajo cada criterio de optimización.

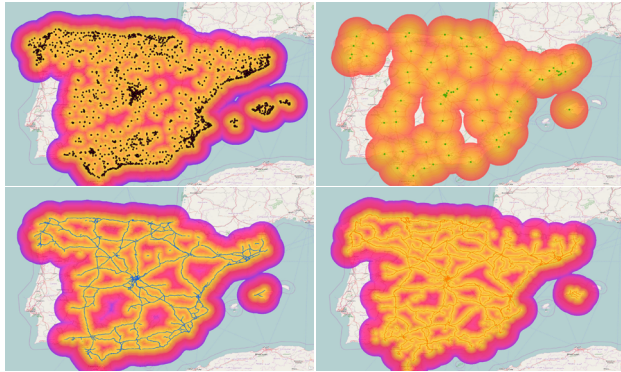


Figura 2: Capas de datos conteniendo información referente a distancias a centros comerciales existentes, ciudades, autopistas y vías de tren, respectivamente.

Sin pérdida de generalidad y con el fin de ilustrar el proceso, diferentes funciones miembro difusas han sido empleadas. Específicamente, funciones Gaussianas han sido empleadas en el caso de las capas relativas a ciudades, autopistas y vías de tren. En este caso, el centro de los picos de las funciones Gaussianas se han establecido a cero. Esto indica que aquellos puntos localizados exactamente sobre los elementos de interés tienen el máximo nivel de adecuación y, a medida que la distancia aumenta, esta adecuación decae progresivamente. Por su parte, el ancho de las campanas se establece a 0.1. En el caso de los centros comerciales existentes, se emplea un función de pertenencia difusa lineal. De esta forma, a medida que la distancia se incrementa, el grado de adecuación de los puntos incrementa progresivamente en el rango $[0..1]$. Las capas obtenidas al aplicar las funciones miembro difusas son las mostradas en la Figura 3.

Las capas de datos previas únicamente contienen información relativa a los puntos bajo los criterios de optimización individuales. Sin embargo, con el fin de identificar los mejores sitios para establecer nuevos centros comerciales desde una perspectiva multi-criterio, se debe generar una nueva capa de datos que contenga información combinada de las capas previas. En este caso, se aplica una combinación lineal pesada de las capas de origen. El resultado es una nueva capa de datos en donde la adecuación individual de los puntos del mapa es combinada. El grado de pertenencia resultante asociado con un punto del mapa es una combinación lineal de los valores de adecuación individuales del problema. Aquellos puntos con un grado de pertenencia igual a cero son completamente inapropiados para ubicar nuevos centros comerciales, mientras que aquellos pun-

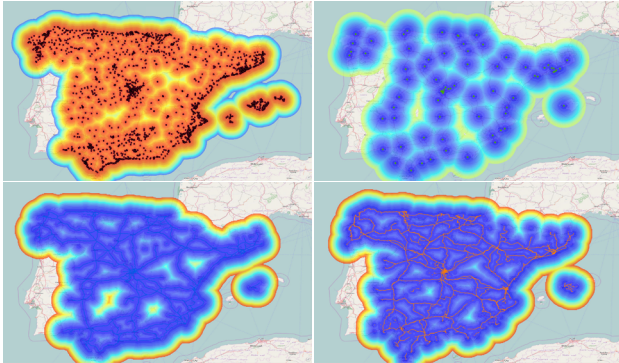


Figura 3: Capas de datos conteniendo información relativa a los grados individuales de adecuación de los puntos bajo los criterios relacionados con los centros comerciales existentes, las ciudades, las autopistas y las vías de tren, respectivamente.

tos con un grado igual a uno representan aquellos puntos en que nuevos centros comerciales deben estar ubicados.

Las capas de datos originales son combinadas linealmente de manera que todos los criterios de optimización tengan el mismo impacto en la capa resultante. Esto significa que $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1$ (ver Sección 2). Una representación gráfica de la capa resultante se muestra en Figura 4. Tal como se puede comprobar, esta capa permite identificar los mejores sitios para ubicar nuevos centros comerciales bajo los criterios de optimización definidos. En este caso, se emplea una escala de colores que va desde el blanco hasta el azul. Concretamente, las áreas blancas indican las ubicaciones más adecuadas, mientras que las áreas azules indican las ubicaciones menos adecuadas. La Figura 5 muestra en mayor detalle una región concreta del mapa previo en la que se puede visualizar claramente las zonas de mayor atractivo para la ubicación de nuevos centros comerciales.

4. Conclusiones y Líneas de Trabajo Futuras

La Teoría de localización abarca una amplia gama de problemas prácticos de optimización. Este campo de investigación cubre específicamente aquellos contextos en los cuales se realiza el estudio y selección del emplazamiento más adecuado para localizar una instalación teniendo en cuenta los requisitos particulares del tipo de problema en cuestión. Algunos ejemplos representativos en

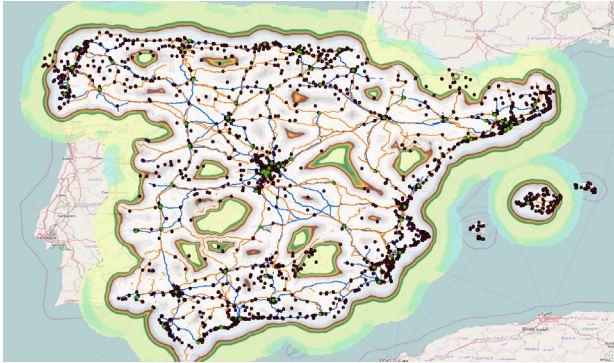


Figura 4: Capa de datos resultante con la combinación pesada de las capas individuales bajo los criterios difusos.

diferentes ámbitos pueden ser la localización de nuevos hospitales, estaciones de bomberos, centros de distribución, fábricas, y así sucesivamente. En este contexto, los criterios de sostenibilidad han tomado un papel cada vez más destacado en los últimos años. En particular, los aspectos económicos, ambientales y sociales tienen cada vez un mayor peso en el proceso de toma de decisiones en la sociedad actual, en parte apoyado por las medidas gubernamentales que se toman en esta línea.

Este trabajo, se presenta un problema de optimización difusa multi-objetivo que persigue determinar los mejores sitios para localizar un número determinado de nuevos centros comerciales en España. Los criterios establecidos en el problema en cuestión implican colocar los nuevos centros comerciales lo más lejos posible de la competencia preexistente y cerca de los principales centros de población, autopistas y vías férreas.

El problema estudiado se ha orientado desde el punto de vista práctico haciendo uso de datos abiertos georreferenciados extraídos del proyecto OpenStreetMap y manejados por un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los SIG son poderosas y esenciales herramientas en la toma de decisiones cuando la información geoespacial sobre la que se trabaja está disponible. En general, estas herramientas permiten al usuario almacenar, visualizar y analizar la información geoespacial existente. Adicionalmente, estas herramientas permiten extraer y analizar patrones y tendencias sobre la información.

Para abordar el problema de optimización propuesto, se han propuesto varias funciones de pertenencia difusa para ser analizadas de manera individual. La razón de su uso se centra en modelar la imprecisión de los criterios e in-

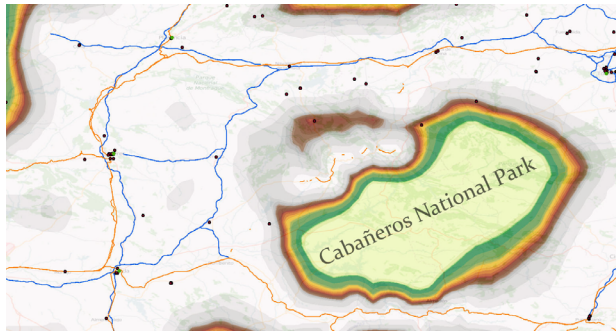


Figura 5: Región de estudio en el mapa conteniendo información relativa a la combinación lineal pesada de las capas individuales bajo los criterios difusos.

formación en entornos reales. De esta manera, cada punto provisto por el SIG recibe un cierto grado de pertenencia para cada criterio, el cual indica el grado en que satisfacen el criterio pertinente. Con el objetivo de tomar una decisión sobre el problema abordado, las diferentes funciones de pertenencia difusas para cada criterio se combinan mediante el uso de una función lineal ponderada, esto permite que el tomador de decisiones pueda seleccionar el emplazamiento más adecuado para situar los nuevos centros comerciales.

Por último, señalar que varias se están considerando varias prometedoras líneas de trabajo para futuras investigaciones. En este trabajo se aborda un problema de localización, no obstante existen multitud de problemas de optimización pertenecientes a otros campos de investigación que dada su naturaleza pueden ser resueltos de manera similar desde un enfoque difuso aprovechando la funcionalidad de los SIG y la disponibilidad de datos georreferenciados abiertos. Además, se plantean tener en cuenta otras funciones de pertenencia difusa para modelar el grado de satisfacción de cada uno de los criterios particulares que se plantean en el problema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (proyectos TIN2012-32608 y TIN2015-70226-R). Christopher Expósito-Izquierdo y Airam Expósito-Márquez agradecen al Gobierno de Canarias el apoyo financiero que reciben a través de sus becas de doctorado.

Referencias

1. Mahdi Bashiri and SeyedJavad Hosseinezhad. A fuzzy group decision support system for multifacility location problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(5-6):533–543, 2009.
2. Ni-Bin Chang, G. Parvathinathan, and Jeff B. Breeden. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, 87(1):139 – 153, 2008.
3. Lujie Chen, Jan Olhager, and Ou Tang. Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 149:154 – 163, 2014. The Economics of Industrial Production.
4. Uwe Dombrowski, Christoph Riechel, and Hannes Döring. Sustainability in manufacturing facility location decisions: Comparison of existing approaches. In Bernard Grabot, Bruno Vallespir, Samuel Gomes, Abdelaziz Bouras, and Dimitris Kiritsis, editors, *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*, volume 439 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 246–253. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
5. Z. Drezner and H. Hamacher. *Facility location. Applications and Theory*. Springer, Berlin, 2002.
6. H. A. Eiselt and Vladimir Marianov, editors. *Foundations of Location Analysis*, volume 232 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer International Publishing, Berlin, 2015.
7. Bakhtiar Feizizadeh, Majid Shadman Roodposhti, Piotr Jankowski, and Thomas Blaschke. A gis-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 73:208 – 221, 2014.
8. Harold Hotelling. Stability in competition. *The Economic Journal*, 39(153):pp. 41–57, 1929.
9. Sungsoo Hwang and Jean-Claude Thill. Modeling localities with fuzzy sets and GIS. In FrederickE. Petry, VincentB. Robinson, and MariaA. Cobb, editors, *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems*, pages 71–104. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
10. Congjun Rao, Mark Goh, Yong Zhao, and Junjun Zheng. Location selection of city logistics centers under sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36:29 – 44, 2015.
11. C.S. ReVelle and H.A. Eiselt. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165(1):1 – 19, 2005.
12. Tahsin A. Yanar and Zuhal Akyürek. The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176(8):1067 – 1085, 2006.
13. L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338 – 353, 1965.
14. Jiahong Zhao and Vedat Verter. A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 62:157 – 168, 2015.
15. A-Xing Zhu, Feng Qi, Amanda Moore, and James E. Burt. Prediction of soil properties using fuzzy membership values. *Geoderma*, 158(3–4):199 – 206, 2010.