

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

LOCALIZACIÓN DE UN SITIO PARA CONSTRUIR UN CENTRO DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS A TRAVÉS DE TRES MÉTODOS

*Adriana Roé-Sosa¹
Ma. Nefthalí Rojas-Valencia¹
Crisóforo Torres-Romero²

LOCATION OF A SITE APPROPRIATE FOR BUILDING A
WASTE MANAGEMENT CENTER URBAN SOLID BY THREE
METHODS

Recibido el 2 de septiembre de 2013; Aceptado el 12 de junio de 2014

Abstract

Milpa Alta, is a section of Mexico City, was studied to determine the location of an area with technical and regulations conditions in order to build a Waste Management Center Urban Solid (WMC), integrated with a compost plant and a plant of waste separation. In the research, technical criteria related to economic indicators, social, public and topographical services were considered. Besides, indicators linked with environmental criteria regulated by normativity were also considered. To select the most suitable place, Methods of Moments (MM), Geographic Information Systems (GIS) and Multi-criteria Analysis (MA) were used. Therefore, with theoretical basis probable places that comply with the demand criteria by the environmental normativity were located. The first two Methods allowed determine the suitable places to build the WMC; such information was corroborated in field by means of the MA which allows determining the best location.

Key words: Geographic Information Systems, Method of Moments, Multi-criteria Analysis, solid waste.

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

*Autor correspondiente: Coordinación de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar S/n, Ciudad Universitaria, 04510 Distrito Federal, México. Email: adriana_roe_sosa@yahoo.com.mx

Resumen

En la Delegación Milpa Alta de la Ciudad de México, se realizó un estudio para determinar la ubicación de un terreno que reuniera las condiciones técnicas y normativas exigidas para la construcción de un Centro de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Urbanos (CAR), integrado este con una planta de separación de residuos y una de composta. En la investigación, se tomaron en cuenta criterios técnicos relacionados con indicadores económicos, sociales, de servicios públicos y topográficos. Además, se consideraron indicadores vinculados con criterios ambientales regulados por la normatividad. Para la selección del sitio ambientalmente factible se utilizaron el Método de Momentos (MM), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Multicriterio (AM). Con estas bases se localizaron teóricamente los sitios probables que cumplieron con los criterios exigidos por la normatividad ambiental. Los primeros dos métodos permitieron determinar los sitios factibles para la construcción del CAR, información que fue corroborada con visitas de campo mediante el AM, lo que permitió establecer la mejor ubicación.

Palabras claves. Análisis multicriterio, Método de momentos, Sistemas de información geográfica, residuos sólidos.

Introducción

La selección de sitios que cumplan con los requerimientos ambientales es muy importante en la construcción de infraestructura relacionada con el manejo y la disposición de los RSU, ya que en el cumplimiento de las disposiciones normativas evita la contaminación en suelos, aire y mantos acuíferos que, además de provocar deterioros en el ambiente, ocasiona molestias e induce riesgos de salud en la población.

En México para la ubicación de lugares destinados a la construcción de estaciones de transferencia (Sánchez et al, 1996) y rellenos sanitarios (Araiza-Aguilar, 2009), se ha utilizado el MM y los SIG en la delimitación de áreas de interés basadas en riesgos ambientales (Benítez, 2006); sin embargo, no se han empleado en la ubicación de sitios ambientalmente factibles para la construcción de un CAR. En lo que se refiere al AM se ha usado en la evaluación y selección de sitios probables para la construcción de rellenos sanitarios.

En el presente trabajo se hizo una recopilación para su estudio, de la mayoría de las restricciones existentes en la normativa mexicana (Leyes, NMX, NOM y reglamentos) para construir infraestructura relacionada con el manejo y disposición final de los RSU, las cuales fueron denominadas criterios ambientales normados. Además, se recopilaron restricciones en cuanto a topografía y a servicios relacionados con agua y energía eléctrica a los que se denominó criterios técnicos.

El objetivo de esta investigación fue seleccionar mediante la aplicación del MM, de los SIG y del AM, un sitio ambientalmente factible para la construcción de un CAR en la Delegación Milpa Alta, de la Ciudad de México. Los análisis mediante el MM y los SIG se elaboraron con datos

oficiales reales proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI), lo que garantizó resultados confiables.

En la realización de este estudio se consideraron criterios ambientales normados y técnicos para la ubicación del CAR; se empleó un software para cada uno de los tres métodos aplicados; *Autocad* para el MM, *Criterium Decision Plus* para el AM y *ArcGis 9.0* para los SIG; asimismo, se utilizó una carta topográfica, clave (Milpa Alta-e14a49) del INEGI (1994), para la elaboración de los mapas.

Criterios ambientales normados y criterios técnicos

Entre las normas mexicanas que sirvieron de sustento para la ubicación del CAR estuvieron las relacionadas con rellenos sanitarios, NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2003a), con sitios de confinamiento especial para Residuos Peligrosos (RP), NOM-055-SEMARNAT-2003 (DOF, 2003b), con el manual vinculado a las estaciones de transferencia (Sánchez, J *et al*, 1996); con las plantas mejoradoras de suelo, NTEA-006-SMA-RS-2006 (GOB_EDOMEX, 2006) y con los centros de acopio, transferencia, separación y tratamiento de los RSU y residuos de manejo especial (RME), para el Estado de México, NTEA-010-SMA-RS-2008 (GOB_EDOMEX, 2008).

En los criterios ambientales normados se consideró que en el sitio no existieran zonas arqueológicas, traza urbana, ni reserva ecológica y que la distancia de centros de población mayores a 2 500 habitantes, zonas de inundación, pozos de agua, acuíferos, líneas de conductos de combustible, sustancias peligrosas y cuerpos de agua superficiales, fuera de 500 metros o más.

Entre los criterios técnicos se tomaron en cuenta vialidades, servicios públicos, zonas de cultivo y topografía, restringiéndose la ubicación de los tres primeros a una distancia máxima de 500 metros. En la topografía se consideró de manera importante que el terreno permitiera el acceso de los vehículos recolectores (López *et al.*, 2011).

Método de momentos

Este método sugiere un solo punto [Centro de Gravedad (CG)] en los mapas, por lo que el análisis de campo resulta complejo. Por medio del MM se dividió el área de estudio en cuadrantes de un km² y se contabilizaron los porcentajes cubiertos por los criterios en cada uno de los sectores divididos. Con la información obtenida se multiplicaron los resultados por el valor asignado a cada criterio, según su grado de importancia (tabla 1, 2 y 3). Una vez obtenidos los datos de la tabla 1 se calcularon las coordenadas del CG afectado por la población (figura 1); en este caso de la Delegación Milpa Alta (ecuaciones 1 y 2).

Tabla 1. Cálculo del CG de la delegación Milpa Alta afectado por el criterio de población

Sector	Factor de importancia	Porcentaje de llenado	Distancia "x"	Distancia "y"
Número	0 ó 1	%	Coordenada x del C.G.	Coordenada y del C.G.

VARIABLE	X	Y
GEOGRÁFICA (A)	X ₂	Y ₂
POBLACIONAL (B)	X ₃	Y ₂
POR GENERACIÓN DE RESIDUOS (C)	X ₂	Y ₃
POR VIALIDADES (O)	X ₃	Y ₃
POR PENDIENTE DEL TERRENO (E)	X ₃	Y ₃

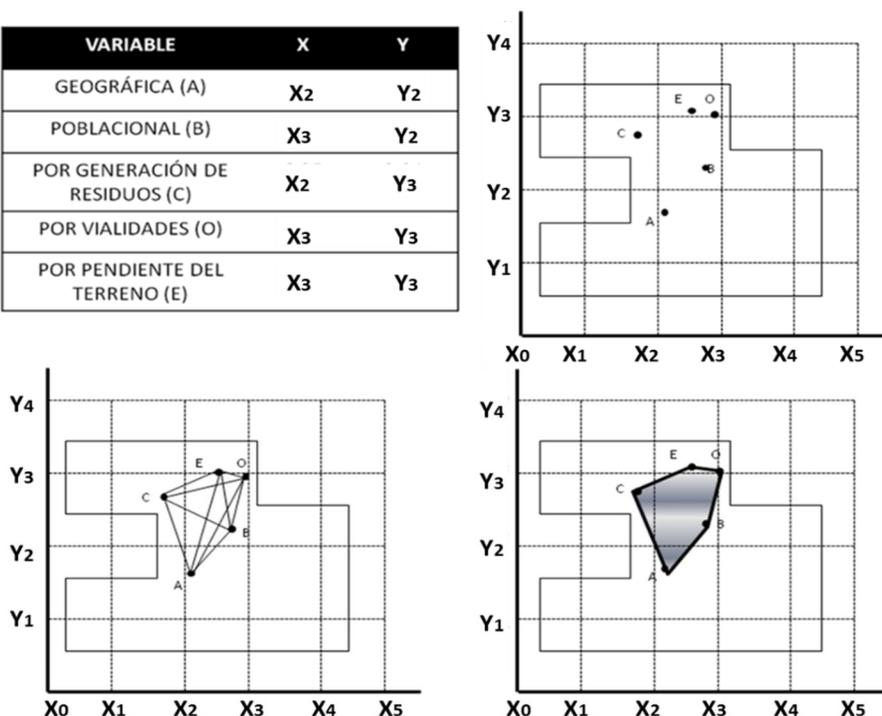


Figura 1. Procedimiento del cálculo de la región factible para ubicar el CAR, mediante el Método de Momentos. Adaptado de: Estaciones de Transferencia (ET), (Sánchez et al, 1996).

$$X = \frac{Aa+Bb+Cc\dots}{A+B+C\dots}$$

Ecuación (1)

$$Y = \frac{Aa'+Bb'+Cc'\dots}{A+B+C\dots}$$

Ecuación (2)

Donde:

A, B, C... valores de la población del sector 1 hasta n.

a, b, c, ... valores de las coordenadas X desde el sector 1 hasta n.

a', b', c'... valores de las coordenadas Y desde el sector 1 hasta n.

Tabla 2. Factores de importancia en criterios ambientales normados

Zonas de inundación	Factor de importancia
Área de terreno sujeto a inundación	0
Áreas donde no hay riesgo de inundación	1
Zonas de probables compradores de composta	Factor de importancia
Área de cultivo.	1
Otro tipo de actividad.	0
Zonas protegidas	Factor de importancia
Áreas de vegetación densa	0
Áreas que no tienen vegetación densa.	1
Zonas donde se ubiquen cuerpos de agua superficiales	Factor de importancia
Corriente que desaparece	0
Manantial	0
Corriente de agua intermitente	0
Zonas donde no hay cuerpos de agua superficiales.	1
Zonas arqueológicas y áreas naturales protegidas	Factor de importancia
Zonas arqueológicas	0
Manantiales	0
Humedales	0
Acuíferos	0
Pozos	0
Bosques	0

Tabla 3. Valores de factor de importancia de los criterios técnicos

Tipo de vialidades	Factor de importancia
Calles de primero, segundo, tercero y cuarto orden.	1
Caminos (brechas, veredas)	1
Carretera federal (de uno y dos carriles)	1
Carretera estatal	1
Carretera terracería (uno y dos carriles)	1
Carretera pavimentada.	1
Sin caminos, ni carreteras, ni calles.	0
Topografía (Pendiente)	Factor de importancia
0-5% (óptima)	1
5-8% (crítica)	0.75
8-12% (Poco favorable)	0.5
Mayor de 12% (Nada favorable)	0
Servicios públicos	Factor de importancia
Energía eléctrica	
Líneas de transmisión (postearía y torre)	1
Agua potable	
Acueducto subterráneo	1
Acueducto superficial	1
Estanque	1
Tanque de agua	1
Punto de instalación de bombeo	1
Comunicación telefónica	
Líneas de comunicación telefónica aérea.	1
Líneas de comunicación telefónica subterránea	1
Zonas donde no hay servicios públicos.	0

Sin embargo, es importante la verificación de campo y, en caso de que el sitio no cumpla con las condiciones exigidas, se debe trazar círculos alrededor del primer punto de muestreo seleccionado (centro de gravedad del polígono) y planear nuevas visitas de campo hasta encontrar el terreno apropiado.

La desventaja de este método es que da el inicio de la búsqueda en campo indicando un lugar que puede o no cumplir con todas las restricciones establecidas. En caso de que el sitio cumpla con las exigencias, es necesario continuar con investigaciones de campo hasta encontrar un lugar apropiado, situación que implica inversión de tiempo y costos elevados.

Sistemas de información geográfica

Para el estudio de las áreas se hicieron intersecciones de capas correspondientes a la carta topográfica, clave (e14a49) del INEGI (1994) y con la información obtenida, en primer término, un mapa geográfico con zonas sin traza urbana, ni reserva ecológica, y otros mapas en los que por medio de los llamados *buffers* se señalaron los 500 metros de distancia con relación a manantiales, acuíferos, pozos y ríos. La información anterior permitió localizar las zonas donde por restricciones ambientales, no es recomendable la construcción del CAR.

El software que se utilizó en el desarrollo del SIG fue *ArcGis 9.0* junto con la cartografía del INEGI (1994). Este método tiene la ventaja de que las áreas que cumplen con las restricciones marcadas, con diferente color, pueden estar dispersas y ser de diferente tamaño, lo que permite evaluar y definir los sectores que teóricamente tienen los requisitos, lo que hace que la investigación de campo requiera de menor tiempo y esfuerzo (Roé-Sosa, 2011).

Con relación a vialidades y servicios requeridos por el CAR para su operación, también se señalaron por medio de *buffers*, los espacios de cero a 500 metros en los que resultó factible su ubicación. Una vez que se determinaron las zonas ambientalmente realizables, se analizó la topografía del lugar para valorar el acceso de los vehículos a los sitios preseleccionados.

Para elegir las áreas de estudio se tomaron en cuenta criterios como la distancia de más de 500 metros que debe existir entre el CAR y centros de población mayores a 2 500 habitantes, zonas de inundación, pozos de agua, acuíferos, líneas de conductos de sustancias peligrosas o combustibles como los de PEMEX y cuerpos de agua superficiales. Asimismo, se tomó en cuenta para la selección del sitio, dejarlo fuera de zonas arqueológicas y de áreas de vegetación densa y protegidas y que las zonas de cultivo, servicios de agua potable y energía eléctrica quedaran en el área de 500 metros.

Otro aspecto que se consideró, desde el punto de vista topográfico, fue que el terreno seleccionado para su construcción tuviera una pendiente comprendida de 0 a 8 %, con el propósito de que los vehículos que transportan los residuos tengan acceso al lugar sin problema, ni peligros de accidentes (López-Atamoros *et al.*, 2011).

Análisis multicriterio

Después de seleccionados los sitios por medio del MM y de los SIG, se llevó a cabo una visita de campo para evaluarlos conforme a lo indicado por el AM y determinar cuál de ellos cumplía con las especificaciones establecidas por la normatividad.

El método, trabajado con el software *Criterion Decision Plus*, permitió determinar los lugares factibles para la construcción del CAR. El proceso de la evaluación de los criterios ambientales, normados y técnicos, se realizó con una escala comprendida del 0 al 10, rango al que se sujetaron los expertos que participaron en el proceso de asignación de puntajes, lo que les permitió obtener un valor para cada lugar analizado. La opinión de los peritos, traducida a valores, se promedió para obtener el valor más alto y consecuentemente el mejor lugar (Roé-Sosa, 2011).

Los criterios que se estudiaron fueron el de la distancia en metros [entre el terreno y] (Figura 2) y el de las características del terreno (Figura 3). Con relación al primero se consideraron los sub-criterios, una vialidad y zonas de cultivo, zonas de acuíferos superficiales y zonas de vegetación densa y de inundación y, con el segundo, topografía, tipo de propiedad, facilidad de acceso y servicios públicos.

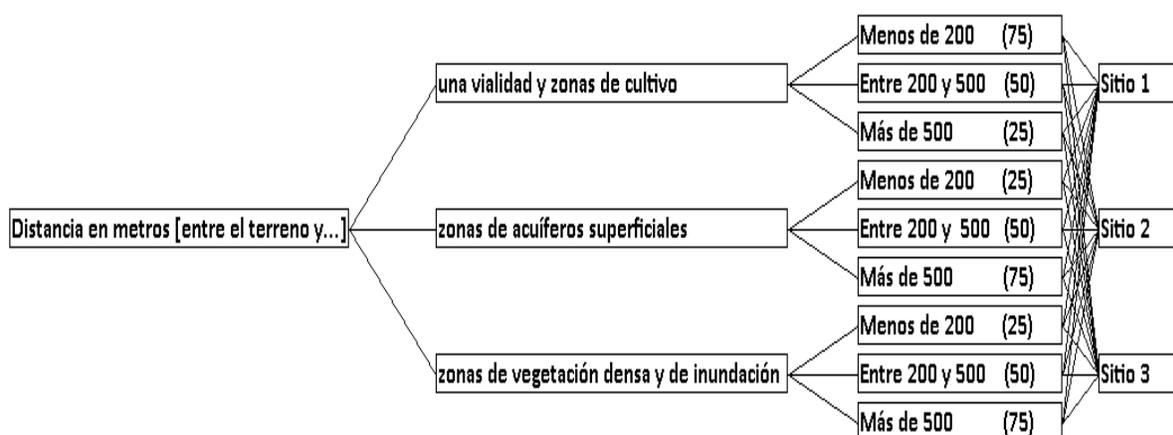


Figura 2. Jerarquía del criterio distancia en metros [entre el terreno y...] y los subcriterios una vialidad y zonas de cultivo, zonas de acuíferos superficiales y zonas de vegetación densa y de inundación

Cada uno de los sub-criterios de distancia en metros [entre el terreno y...] se dividió en tres factores: menos de 200, entre 200 y 500 y más de 500. Para evaluar los factores en el programa, se le dieron valores de 75, 50 y 25 respectivamente, según la distancia a la que se encontraba el sitio en estudio del sub-criterio evaluado (Figura 2).

En el criterio características del terreno, se evaluaron los sub-criterios topografía, tipo de propiedad, facilidad de acceso y servicios públicos; a cada uno de los cuales se le asignaron sus correspondientes factores, con valores de 75, 50 y 25 (Figura 3).

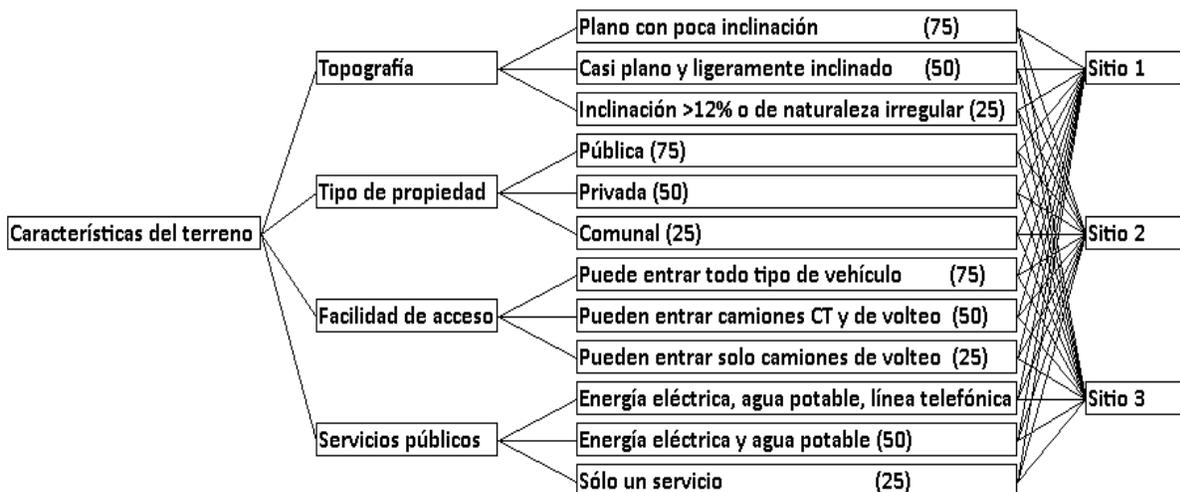


Figura 3. Jerarquía del criterio. Características del terreno y de los sub-criterios topografía, tipo de propiedad, facilidad de acceso y servicios públicos

Resultados

La información obtenida con el trabajo desarrollado determinó que en la Delegación Milpa Alta de la Ciudad de México, sea factible la construcción de un CAR. Los SIG indicaron ocho sitios con áreas mayores de seis hectáreas (las requeridas por el CAR) que cumplieron con todos los criterios normados y técnicos (Figura 4). El MM arrojó un lugar que cumple con todos los criterios, sitio que coincidió con uno de los ocho sitios que dio el SIG (Figura 5). Una vez ubicados los sitios en los mapas se hizo una visita de campo para evaluar los terrenos, lo que

confirmó el cumplimiento de los criterios ambientales normados y técnicos, pero se observó que los aspectos sociales del lugar fueron determinantes para descartar algunos lugares.

La evaluación de campo recomendada por el AM no pudo llevarse a cabo en los sitios 7, 8 y 9, ubicados en la zona sur de la Delegación por encontrarse estos en lugares socialmente peligrosos; tampoco fue posible evaluar los sitios 4, 5 y 6, del centro y sureste, debido a que los residentes del lugar restringieron el acceso a las vialidades, motivo por el cual, en ninguno de los lugares mencionados, se dieron las condiciones propicias para la construcción del CAR. En los sitios 1, 2 y 3 sí pudo llevarse a cabo la evaluación exigida por el AM, valoración que determinó que el mayor puntaje correspondió al sitio 1, que resultó el ambiente más factible para la construcción del CAR (Tabla 4 y figura 6).

Tabla 4. Resultados del análisis multicriterio

Criterios	Distancia en metros [entre el terreno y...]	Características del terreno	Suma	Factibilidad
Sitio uno	0.500	0.417	0.917	Mayor
Sitio dos	0.444	0.292	0.736	Menor
Sitio tres	0.500	0.375	0.875	Mediana

En cuanto a las ventajas y desventajas de los métodos utilizados en la investigación se destaca que los tres permiten localizar sitios factibles para la construcción de un CAR, aunque debe tenerse sumo cuidado en los sesgos que en cuanto a los resultados puede tener el AM, en la posibilidad de altos costos y la utilización de largos tiempos en el MM, y en el dominio puntual del manejo del software *ArcGis*, además de la destreza en el manejo de documentos cartográficos para los SIG.

Aunque en la investigación realizada se utilizaron tres métodos encaminados a determinar el mejor lugar para la construcción del CAR es recomendable utilizar, en principio, el MM o el de los SIG (según convenga respecto al conocimiento y adquisición de los softwares) para, que una vez localizados los sitios en los mapas, estar en posibilidad de aplicar el AM a fin de seleccionar el terreno que mejor cumpla con lo dispuesto en la normatividad ambiental y posteriormente llevar a cabo los estudios geológicos, hidrológicos, topográficos (planimetría y altimetría), geotécnicos y los demás requeridos cuyos resultados garanticen una buena calidad en la construcción de la obra.

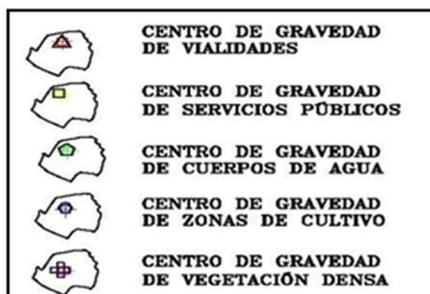
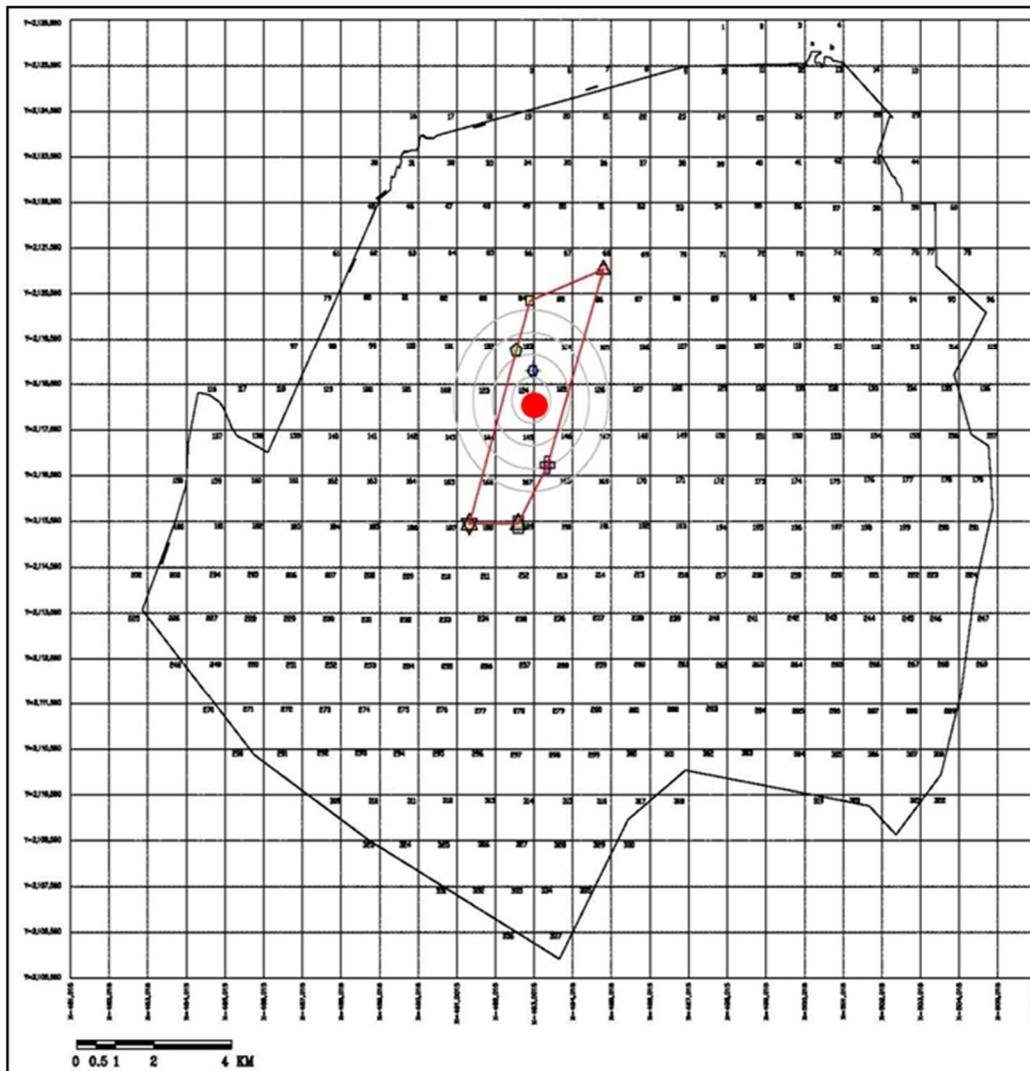


Figura 4. Zona indicada por el método de momentos

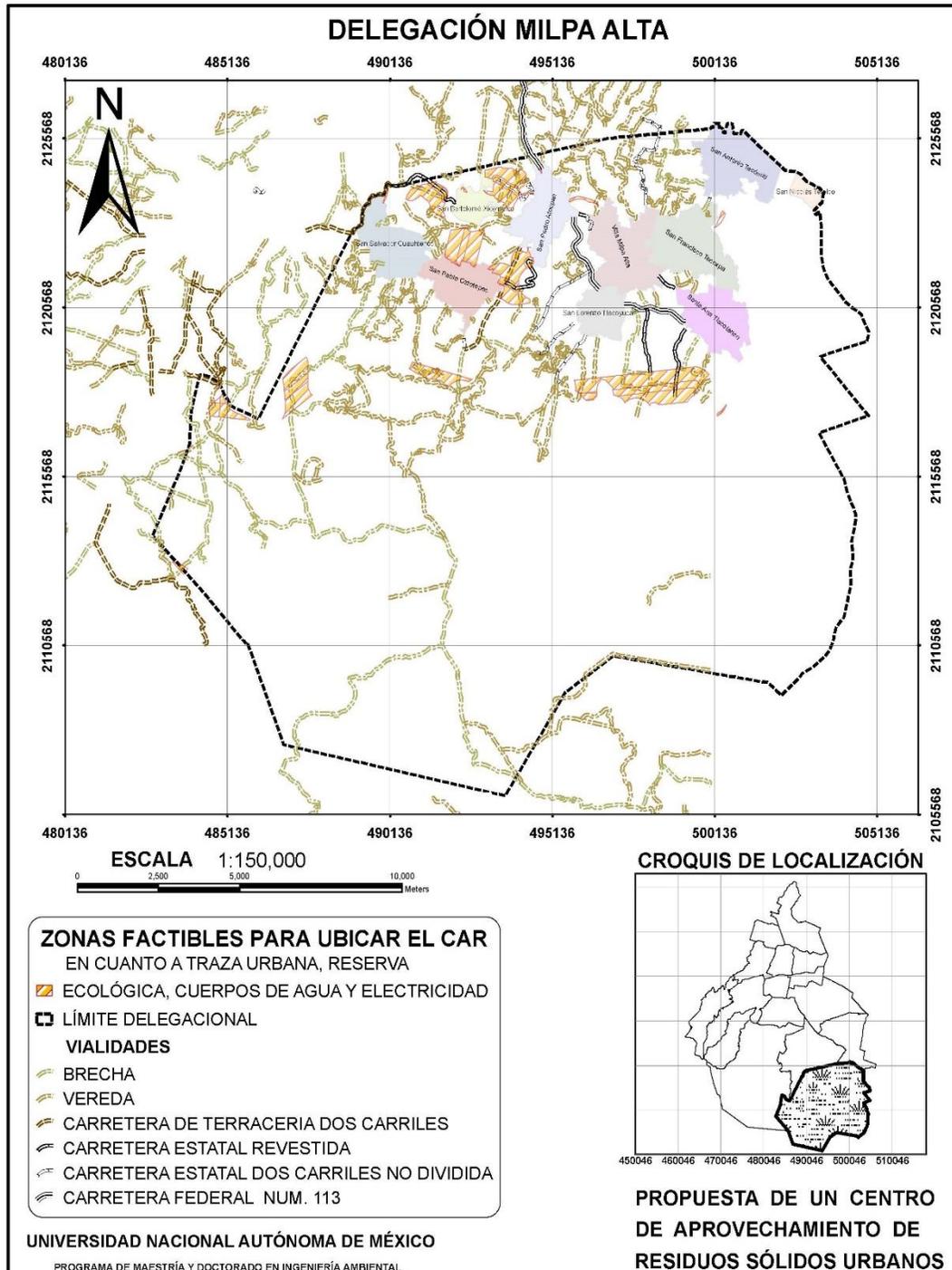


Figura 5. Mapa final del método SIG. Las áreas de color anaranjado indican los sitios factibles para la construcción del CAR

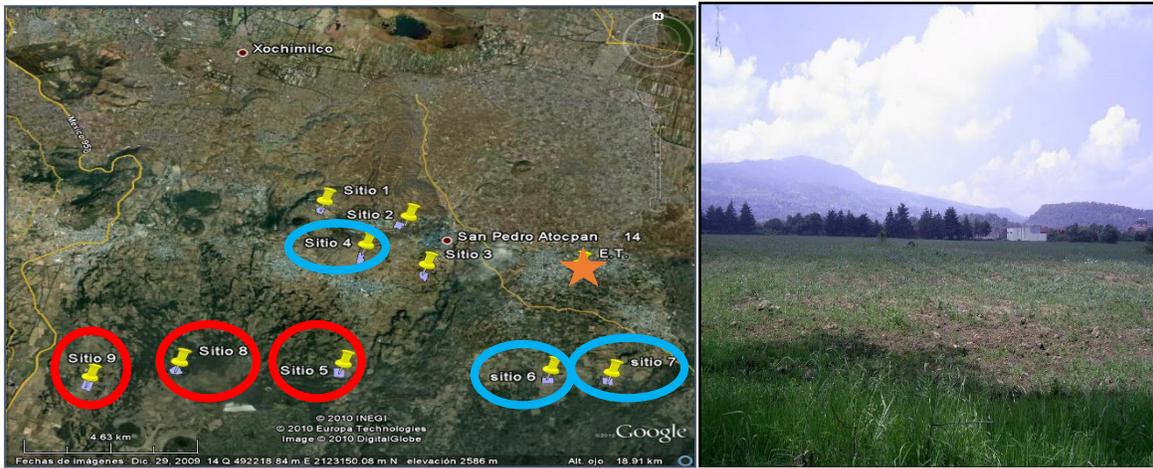


Figura 6. a) Ubicación de los sitios que se visitaron en campo. Los señalados de color rojo son los considerados socialmente peligrosos; los señalados en azul son los cerrados en las calles. Los sitios 1, 2 y 3, se analizaron por AM. El sitio 1 fue el que obtuvo mejor puntaje. b) Terreno perteneciente al sitio 1, que obtuvo el mayor puntaje mediante el AM

Conclusiones

El MM y los SIG son recursos que permiten señalar en mapas sitios tentativos para la construcción de CAR mientras que el AM precisa el sitio ambientalmente factible para la construcción del CAR, por medio de estudios de campo y con base en los lugares señalados dentro de los mapas. Los estudios realizados en la Delegación Milpa Alta, con tres métodos citados, arrojaron como resultado que existe un sitio ambientalmente factible para la construcción de un CAR, que cumple con todos los requerimientos ambientales exigidos por la normatividad. La implementación de varios métodos para la ubicación de un sitio, hace posible la selección de sitios que cumplan con la mayoría de los criterios ambientales normados, técnicos y sociales. El resultado de estos métodos variará dependiendo del número de criterios que se incluyan en el análisis; por ello, es importante considerar la mayor cantidad de normas posibles, tomando en cuenta que si se aumentan los criterios, la confiabilidad del resultado se incrementa, pero también la complejidad en el análisis.

Agradecimientos

El primer autor agradece a CONACYT por la beca que se le otorgó para llevar a cabo sus estudios de Maestría en Ingeniería y, al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades otorgadas para este estudio; al M. en I. Juan Araiza Aguilar, por compartir sus conocimientos sobre el Método de Momentos y el software Autocad y, al Profesor Eduardo Roé Farías por su asesoría en la redacción del documento.

Referencias

- Araiza, J.A. (2009) Diseño de infraestructura para el manejo de los residuos sólidos y líquidos en comunidades rurales del municipio de Atoyac de Álvarez, Guerrero. *Tesis. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México D.F. México. 180 pp.*
- ArcGis Arcview. (2006) "ArcGIS 9.2". Copyright© (1999-2006). Environmental Systems Research Institute, Inc. Contracts and Legal Services Manager, ESRI, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA.
- DOF. (2003a) Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México
- DOF. (2003b) Norma Oficial Mexicana NOM-055-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México
- DOF. (2002) Norma Oficial Mexicana. NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.
- GOBEDOMEX. (2008) Norma Técnica Estatal Ambiental. NTEA-010-SMA-RS-2008. Establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, para el Estado de México. Gobierno Constitucional del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.
- GOBEDOMEX. (2006) Norma Técnica Estatal Ambiental. NTEA-006-SMA-RS-2006, que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos. Gobierno Constitucional del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.
- INEGI (1994) Conjunto de Datos Vectoriales E14A49 de la Carta Topográfica Escala 1:50,000 (MILPA ALTA). Primera edición. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- López, L.G., Fernández, G., Cruz, M.J., Durán-de-Bazúa, C. (2011) Development of a Relative Ranking Risk Index for Risk Assessment in the Transportation of Liquefied Petroleum Gas in Mexico City's Metropolitan Area, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **17**(6), 1193-1209.
- Rodríguez, P. (2010) Entrevista como ingeniero encargado de las plantas de composta de la Delegación Milpa Alta. [Realizada el 10 de enero de 2010]. México D.F. México.
- Roé-Sosa, A. (2011) Diseño de un centro de aprovechamiento de residuos para la Delegación de Milpa Alta. *Tesis. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México D.F., México, 164 pp.*
- Sánchez, J., Estrada, R., Ramos, C., Carmona, R., Cano, P, Semadeni, I. (1996). Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas (en línea). *Publicación conjunta del Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Asociación Mexicana para el control de residuos sólidos y peligrosos, A.C., Serie: Cuadernos de Trabajo 5.* Consultado en junio de 2009, desde <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/download/105.pdf>