

Análisis comparativo de tres modelos de soporte de decisiones espaciales en la selección de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, México

Otoniel Buenrostro Delgado*

Manuel Mendoza**

Erna López Granados***

Recibido: 12 de agosto de 2004

Aceptado en versión final: 10 de junio de 2005

Resumen. En este documento se analizan tres modelos, útiles en la toma de decisiones espaciales que construyen dentro de sistemas de información geográfica (SIG). Con ellos se analizaron diferentes mapas temáticos y variables socioeconómicas para conformar una matriz que combinó los criterios científicos y técnicos para la construcción de rellenos sanitarios. Como estudio de caso se utilizó la región de la cuenca de Cuitzeo en México.

Los resultados de la modelación permitieron reconocer la distribución de áreas potenciales para rellenos sanitarios en la cuenca; al menos 21 municipios de los 26 que la componen tienen áreas clasificadas como muy aptas. De acuerdo con los tres modelos utilizados, la superficie potencial en la clase muy apta está entre el 1.5 y el 5% de la superficie de la cuenca. Las áreas más grandes e importantes se encuentran en el centro de la cuenca y pueden ser compartidas por cinco de los municipios con mayor densidad poblacional.

Con respecto al manejo de la herramienta, el modelo de lógica booleana fue el más sencillo; sin embargo, es más restrictivo en la selección de los sitios, ya que sólo permite evaluar el cabal cumplimiento de las condiciones de un atributo. Los modelos de evidencia binaria y el índice de sobreposición son más complicados en su manejo, pues requieren aplicar técnicas de análisis jerárquico, pero permiten evaluar ponderadamente cada atributo. Estos enfoques son una buena opción para facilitar y abaratar los costos de selección de sitios para la construcción de rellenos sanitarios en países en vías de desarrollo.

Palabras clave: Rellenos sanitarios, intermunicipales, sistema espacial de soporte de decisiones, percepción remota, sistema de información geográfica.

*Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Administración de León Romero No. 413-A, 58190, Morelia, Michoacán. E-mail: otonielb@zeus.umich.mx

**Instituto de Geografía, UNAM, Unidad Académica Morelia, Aquiles Serdán No. 382, Col. Centro, 58000, Morelia, Michoacán. E-mail: mmendoza@igiris.igeograf.unam.mx.

***Laboratorio de Geoeología, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Campus Morelia, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de San José La Huerta, Morelia, Michoacán. E-mail: erna@oikos.unam.mx

Comparative analysis of three spatial decision approaches for the selection of intermunicipal land filling sites in the basin of Cuitzeo, Mexico

Abstract. This paper analyzes three spatial decision support system models that make use of geographic information systems (GIS). Different thematic maps were analyzed and a data matrix was made that combines the biophysical and socioeconomic criteria for the selection of landfill sites and socioeconomic variables. The study was made in the basin of lake Cuitzeo, in Mexico.

The resulting spatial decision support system models aided in recognizing the distribution of potential areas for the localization of landfill sites in the study area; 21 of the 26 municipalities included in the basin have areas that classify as highly suitable. The highly suitable potential areas resulting from the three models used varied between 1.5 and 5% of the surface of the basin. The larger and more important areas are located in the central zone of the basin and may be shared by five of the most densely populated municipalities.

The three analytical tools tested differ in their complexity and restrictiveness in the selection of sites. The Boolean logic model is easier to apply and more restrictive than the other two because it is based on the assessment of single attributes, i.e., conditions that are either satisfied or not. In contrast, the application of the binary data and overlapping index methods is complicated because these models require of hierarchical analyses, but they allow for giving different weight to each attribute. The approaches adopted here constitute a low cost alternative for supporting spatial decision-making processes aimed at the selection of appropriate sites for the operation of sanitary landfills in developing countries.

Key words: Sanitary landfill, intermunicipal, spatial decisions support system, remote sensing, geographic information system.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en la gestión de residuos sólidos municipales (RSM) en México es el establecimiento de rellenos sanitarios que cumplan con los requisitos que contempla la legislación ambiental mexicana. Los rellenos sanitarios disminuyen el impacto ambiental y minimizan los riesgos en la salud pública. En la actualidad, la mayor parte de los 2 443 municipios del país continúan depositando sus residuos sólidos en tiraderos al aire libre, o en el mejor de los casos, en tiraderos controlados. Lo anterior es resultado de las carencias presupuestarias, ya que los municipios se ven incapacitados económica y técnicamente para operar un relleno sanitario por sí mismos (Buenrostro y Bocco, 2003).

Consecuentemente, es apremiante un programa de selección de sitios para rellenos sanitarios, en los que además de cumplir con las condiciones de construcción y funcionamiento especificadas en la normatividad am-

biental mexicana, estén ubicados en puntos en los cuales puedan depositar los residuos sólidos el máximo número de localidades, para que de esta manera puedan ser administrados y financiados por dos o más municipios (intermunicipalidad). La localización de sitios para rellenos sanitarios involucra variables físicas, sociales y económicas, por lo que es importante que los grupos que trabajen en el proceso de selección de los sitios se conformen interdisciplinariamente.

Durante el proceso de selección de sitios para rellenos sanitarios, muchos de los atributos a evaluar tienen una representación espacial, lo que ha favorecido que en los últimos años haya predominado la perspectiva geográfica que permite integrar múltiples atributos con el apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG; Bonham-Carter, 1994). Sin embargo, la predominancia del uso de variables físicas como son el tipo de suelo, la profundidad y la permeabilidad (Batstone *et al.*, 1989) por sobre el uso de variables socio-

económicas como son la tenencia de la tierra, el periodo de vida útil del sitio y el diseño de estrategias para mitigar los impactos ambiental y sobre la economía de los habitantes por la construcción de rellenos; aunado a la escasa difusión y promoción previas entre la población de los beneficios socioambientales han incidido en el creciente rechazo social a la construcción de estas obras (Lober, 1996).

En México, la difusión previa a la toma de decisiones para la construcción de una obra es vital para lograr el consenso social, ya que de lo contrario, el proyecto se puede politizar y limitar seriamente el proceso de construcción de estas obras de ingeniería, contribuyendo aún más a la carencia de sitios adecuados para la disposición final de los RSM.

De acuerdo con Baban y Flanagan (1988), existen básicamente dos métodos para la selección de los sitios para rellenos sanitarios; éstos son el método que se basa en criterios para lograr la aceptación de la población y el método que utiliza protocolos establecidos y técnicas para planificar la construcción de estas obras de ingeniería. El primero tiene dos variantes; una que se basa en criterios sociológicos y políticos para lograr la aceptación por parte de la población a la construcción de los rellenos y la otra, que utiliza las compensaciones económicas para que el público acepte el proyecto. Estas dos variantes pueden ser adecuadas desde el punto de vista político, pero debido a que se basan sólo en criterios para satisfacer a la población, tienden a descuidar otros principios que son trascendentales para el éxito del proyecto, como son los criterios ambientales, técnicos y económicos. Por otro lado, el segundo método le da más importancia a la protección del medio físico, pero aunado a ello incluye criterios para asegurar la viabilidad económica y la aceptación del público.

En los últimos años se han utilizado los SIG con el propósito de facilitar y abaratar el proceso de selección de sitios para rellenos sanitarios (Kao *et al.*, 1997; Siddiqui *et al.*, 1996). Sin embargo, ya que los municipios carecen de

los recursos económicos suficientes que les permitan contratar personal capacitado en la operación de sistemas de aseo público, el servicio proporcionado es deficiente (Buenrostro y Bocco, 2003).

Un proceso de toma de decisiones con una perspectiva integral, requiere de la incorporación de sistemas de soporte de decisión espacial, basados en los SIG y la percepción remota (PR), que permita apoyar a los tomadores de decisiones en la selección de la alternativa técnica más adecuada para el uso de un territorio. Un sistema de soporte de decisiones organiza el poder computacional y mejora el acceso a bases de datos y el uso de modelos para apoyar al tomador de decisiones en la evaluación del problema e incrementar el nivel de entendimiento en relación con la decisión ambiental. Por lo tanto, estos sistemas apoyan en la generación y evaluación de soluciones alternativas con la intención de ganar visión en los problemas, entre los variados objetivos y el apoyo a los procesos de toma de decisiones (Malcezwki, 1999; Sharifi y Van Herwijnen, 2003).

El objetivo principal de esta investigación fue probar tres modelos de análisis de datos espaciales: *a)* lógica booleana, *b)* mapas de evidencia binaria y *c)* índice de sobreposición con mapas multiclase, con intención de elaborar un sistema espacial de soporte de decisiones con base en la definición del modelo más idóneo con respecto a la simplicidad en el manejo y la confiabilidad de los resultados. Como área de estudio para la evaluación de los modelos y selección de áreas susceptibles para la construcción de rellenos sanitarios intermunicipales (RSI), se escogió a la cuenca del lago de Cuitzeo, en México.

El área en estudio

En México, la cuenca del lago de Cuitzeo abarca un área de 4 000 km² y se localiza en los estados de Michoacán y Guanajuato, fisiográficamente se ubica en el Cinturón Volcánico Transmexicano, entre los 19°30' y

Recientemente se ha estimado en los municipios del estado de Michoacán que están dentro de la cuenca, una producción diaria de residuos sólidos municipales de 700 toneladas, y una generación *per capita* de 0.7 kg día-habitante (*Ibid.*). Asimismo, se ha determinado que la composición de los residuos sólidos en estos municipios es similar a los generados en áreas urbanas, ya que alrededor de la mitad de los residuos está compuesta por plásticos y empaques que muestran una gran similitud en los patrones de consumo de estos municipios con los de áreas urbanas (*Ibid.*).

DESARROLLO CONCEPTUAL Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LOS SITIOS PARA LOS RSI

Requisitos ambientales para la selección de los sitios e integración de la información temática

Con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1994 (SEDESOL, 1994), la cual establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios municipales, se elaboró un cuadro que resume a estos criterios y se agregó la condicionante de la intermunicipalidad (Cuadro 1), la cual se re-

Cuadro 1. Criterios de selección para los sitios destinados a rellenos sanitarios municipales

Criterios	Descripción
Profundidad del manto freático	Deberá estar ubicado a una profundidad vertical mayor de 10 m del nivel freático.
Zona de recarga	Deberá estar ubicada a una distancia mayor de un kilómetro y aguas debajo de las zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable.
Zona de fracturación	Deberá ubicarse a una distancia horizontal de 100 metros como mínimo del límite de la zona de fracturación o falla geológica. No se podrá construir un relleno sanitario en una zona fracturada.
Suelo	Deberá reunir condiciones tanto de impermeabilidad como de remoción de contaminantes, representadas éstas por el coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-5} cm/seg. y por la capacidad de intercambio catiónico de 30 meq/100 grs. de suelo.
Material para cobertura	Se deberá contar como mínimo con un 25% de material de cubierta con relación al volumen de los residuos municipales a disponer diariamente.
Vida útil	Vida útil mínima de 7 años.
Cuerpos de agua	Deberá ubicarse a una distancia mayor de 1 km. de las zonas de inundación, cuerpos de agua y corrientes naturales.
Centros de población y vías de acceso	Estará ubicado a una distancia mayor de 500 m del área urbana; a una distancia mayor de 70 m de las vías de comunicación terrestre, a una distancia mayor de 3 Km. de áreas naturales protegidas y aeropuertos, así como respetar el derecho de vía de 20 m de cada lado de líneas de conducción de energía eléctrica, oleoductos, poliductos, gaseoductos y a una distancia mayor de 150 m de áreas de almacenamiento de hidrocarburos.
Drenaje	El sitio deberá permitir la salida de aguas de lluvia naturalmente.
Topografía	La pendiente media en la base del terreno natural del sitio no deberá sobrepasar el 30%.
Preservación	Los rellenos deben estar construidos en áreas que no tengan un valor económico o ecológico importante. En este trabajo se respetaron zonas cubiertas por bosque templado, agricultura de riego y huertas frutícolas.
*Intermunicipalidad	Los rellenos deben localizarse en sitios donde puedan ser útiles a más de un municipio para compartir costos de construcción y de mantenimiento.

Fuente: Norma oficial mexicana NOM-083-ECOL-1994(SEDESOL, 1994).

* Esta variable se incluyó como condicionante a los sitios que después del análisis cumplieron con las condiciones dictadas por la NOM-083-ECOL-1994.

fiere a que los rellenos deberán estar localizados en sitios que sean utilizados por más de un municipio, a fin de compartir costos de construcción y de mantenimiento del relleno sanitario; esta condicionante incluyó a los sitios que después del análisis cubrieron los criterios especificados en la legislación mexicana.

Los insumos principales para construir los modelos, fueron los mapas de la zona de estudio sobre geología (Pasquarè *et al.*, 1991), geomorfología (Mendoza, 2002), Edafología (INEGI, 1971; 1973; 1979; 1982; 1983; 1996), profundidad y permeabilidad del suelo (Mendoza, 2002), cobertura vegetal y uso del suelo (López y Bocco, 2001), localidades urbanas (*Ibid.*), líneas de conducción eléctrica (INEGI, 1996). Los datos cartográficos fueron digitalizados en ta-

bleta digitalizadora con errores de posición menores a los estándares (*p.e.* < 50 m para los productos a escala 1:50 000). Las vías de comunicación (IMT, 2000), y de límites municipales (Instituto de Geografía-UNAM, 1995) fueron transferidos en formato digital (Cuadro 2). Esta información se verificó y actualizó en campo; esta última fase fue importante para disminuir la incertidumbre originada del análisis simultáneo de varias condiciones y de su homogeneización a escala regional de acuerdo con lo indicado por Tran *et al.* (2002).

Modelamiento espacial de la información temática

El modelamiento de los datos se implementó en un SIG con el programa ILWIS (Integrated Land and Water Management Informa-

Cuadro 2. Insumos cartográficos

Tema	Escala original	Fuente	Método incorporación
Mapa base	1:50,000	INEGI	Digitalización en tableta de curvas de nivel, rasgos hidrográficos
Geología	1:300,000	Pasquarè <i>et al.</i> , 1991	Digitalización en tableta
Geomorfología	1:50,000	Mendoza <i>et al.</i> 2001	Digitalización en tableta
Edafología	1:50,000	INEGI	Digitalización en tableta
Profundidad y permeabilidad de suelos	1:50,000	Mendoza <i>et al.</i> 2001	Modelamiento espacial con las bases de datos de suelos y geomorfología
Cobertura vegetal y uso del suelo	1:50,000	López y Bocco, 2001	Digitalización en tableta y corrección geométrica
Vías de comunicación	1:50,000	IMT – SCT, 2000	Transferencia en formato digital
Líneas de comunicación	1:50,000	INEGI	Digitalización en tableta
Límites municipales	1:250,000	I.G. UNAM	Transferencia en formato digital

tion System; ILWIS, 2002). Se inició con la ubicación en cada mapa temático (clases) de las áreas potencialmente apropiadas para la construcción de los rellenos sanitarios, asignando valores para el cumplimiento (valor de 1 para muy apta) o incumplimiento (valor de 0 para inapta) de cada una de las condiciones (atributos) especificadas en la norma oficial mexicana NOM-083-ECOL-1994 (SEDESOL, 1994). Este procedimiento permitió derivar una serie de mapas binarios que sirvieron de base para la creación de los modelos de lógica booleana y de los mapas de evidencia binaria. El tercer modelo (índice de sobreposición con mapas multiclase) requirió la asignación de pesos a cada una de las clases de los mapas originales. El diagrama del proceso de apoyo a la toma de decisiones espaciales se presenta en la Figura 2.

a) Modelo de lógica booleana (LB)

En el modelo de lógica booleana todos los mapas binarios tienen asignados pesos iguales, es decir, que todos los atributos se consideran de igual importancia para la delimitación de las áreas óptimas para la construcción de los rellenos sanitarios. La combinación de los atributos se realiza de la siguiente manera:

Mapa de aptitud = Si aptitud geología = 1 y aptitud permeabilidad = 1 y aptitud distancia a cuerpos de agua = 1 y aptitud "n" = 1..., entonces =1, sino = 0

b) Modelo de mapas de evidencia binaria (EB)

Este modelo se basa en un índice de sobreposición para asignar valores diferentes a cada uno de los atributos con base en la importancia de

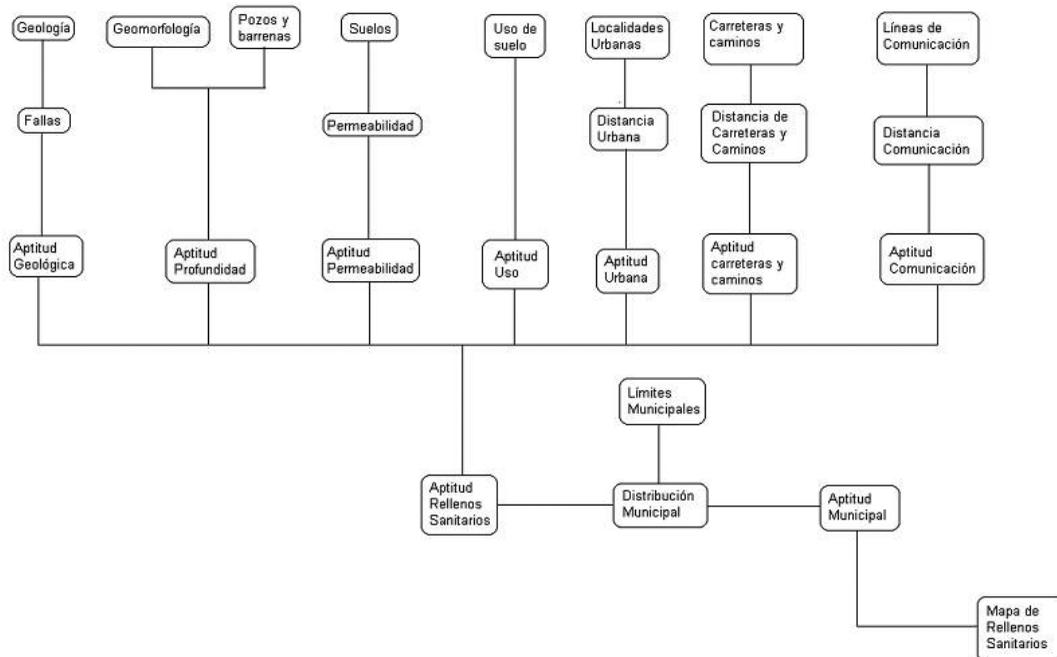


Figura 2. Diagrama del proceso para la selección de áreas para la construcción de rellenos sanitarios municipales.

éstos para la construcción del modelo. Para construir este modelo se utilizan los mapas binarios, los cuales se multiplican cada uno por su factor de importancia previamente asignado. El criterio para otorgar los pesos o valores de importancia se relacionó con la importancia relativa de cada atributo y la factibilidad de modificar con obras de ingeniería las condiciones naturales del terreno, a fin de minimizar el impacto ambiental potencial. Por ejemplo, la distribución de fallas y fracturas es muy importante en la delimitación de áreas susceptibles de ser aprovechadas como rellenos sanitarios; todas aquellas áreas cercanas a este tipo de estructuras geológicas son no aptas para la ubicación de construcción de éstos y, además, no es posible modificar estas condiciones; la distribución de carreteras y vías de comunicación por el contrario, se le asigna un peso relativamente bajo, ya que la distribución de éstas se puede cambiar si ello es conveniente para el proyecto. Los pesos asignados a cada uno de los atributos se presentan en el Cuadro 3.

El mapa final con las áreas potenciales se obtiene de la sumatoria normalizada del resultado de la multiplicación de los valores asignados a cada uno de los atributos. La aptitud de un área es definida por s (ecuación 1):

$$S = \frac{\sum_i^n w_i \text{Atributo}(\text{Mapa}_i)}{\sum_i^n w_i} \quad (1)$$

Donde: w_i es el peso del mapa i -ésimo, y $\text{Atributo}(\text{Mapa}_i)$ es 1 para la presencia y 0 para la ausencia de la condición binaria. El resultado de la ecuación varía en valores de 0 (no apta) a 1 (muy apta), los cuales se ordenaron en intervalos y se nombraron de acuerdo con su aptitud para la construcción de rellenos sanitarios (Cuadro 4). El criterio para delimitar los intervalos se encuentra en función de los requisitos especificados por la NOM-083-ECOL-1994 para la selección de sitios para rellenos sanitarios.

c) Modelo de índice de sobreposición con mapas multiclase (ISMM)

A diferencia de los dos modelos anteriores, para este modelo se utilizaron los mapas temáticos y la ecuación 2 para asignar un peso diferenciado a cada clase, de acuerdo con la importancia relativa del atributo. Estos pesos discrepan de los asignados en los dos modelos anteriores, ya que en este caso a los píxeles que

Cuadro 3. Pesos asignados a cada atributo en el modelo de evidencia binaria

Atributo	Peso
Localización de lagos y presas	0.7
Localización de ciudades	0.8
Localización del aeropuerto	0.9
Distribución de cobertura vegetal y uso del suelo	0.5
Localización de vías de comunicación	0.3
Localización de la planta de almacenamiento de combustibles	0.7
Distribución de fallas y fracturas	1
Distribución de la profundidad de suelos	1
Distribución de la permeabilidad de suelos	0.8
Distribución de las pendientes	0.7
Distribución de carreteras	0.4

Cuadro 4. Criterios de reclasificación para la ubicación de rellenos sanitarios en el modelo de evidencia binaria

Clave	Aptitud	Valor
1	No apta	< 0.8
2	Moderadamente apta	0.8 - 0.87
3	Apta	0.87 - 0.94
4	Muy apta	≤ 1

correspondieron a zonas no aptas se les asignaron pesos cercanos a 0, en caso contrario se asignaron pesos cercanos a 1.

$$\bar{s} = \frac{\sum_i^n S_{ij} w_i}{\sum_i^n w_i} \quad (2)$$

donde: \bar{s} es el valor ponderado de la aptitud; w_i es el peso para los i -ésimo mapas de entrada, y s_{ij} es el valor para las j -th clases de los i -ésimo mapas, el valor de j depende del total de las clases que intervienen en la evaluación de un área para la construcción de un relleno sanitario.

De manera similar al caso del modelo de evidencia binaria, se generó un mapa de zonas con diferentes valores de acuerdo con su idoneidad, los cuales se clasificaron dentro de los intervalos especificados en el Cuadro 4.

d) Aptitud por distancia a municipios (intermunicipalidad)

Para aplicar el criterio de intermunicipalidad, cada uno de los mapas de valores resultante de cada modelo de evaluación de la aptitud potencial de áreas para la construcción de rellenos sanitarios fue clasificado (ecuación 3) en función de las estadísticas derivadas de los mapas de valores (Sharifi y Van Herwijnen, 2003). Todas las superficies por debajo del valor medio ponderado más una desviación estándar de cada mapa se consideró no apta, mientras que aquellas áreas con valores de

píxel superiores a la media más una desviación estándar se agruparon en cinco intervalos (Cuadro 5).

$$IA = \frac{X - (\bar{x} + \sigma)}{5} \quad (3)$$

donde: IA es la magnitud de los intervalos, X es el valor máximo del mapa, \bar{x} es el valor de la media ponderada del mapa, σ es la desviación estándar y 5 es el número de intervalos seleccionados.

Los mapas elaborados por medio de los tres modelos aplicados fueron reclasificados considerando la distancia a los límites municipales por medio de una matriz de doble entrada (Cuadro 6).

RESULTADOS

En la construcción de los tres modelos, los mapas de geología, geomorfología, suelos y datos tabulares asociados, se utilizaron para estimar la capacidad de filtración de los sitios propensos a lixiviación (Bonham-Carter, 1994); sobre esta base se conocieron propiedades generales del suelo para establecer la posible migración de contaminantes hacia los sistemas de agua subterránea. Los datos de cobertura vegetal y uso del suelo, de localidades urbanas, vías de comunicación, líneas de conducción eléctrica y municipios, fueron atributos auxiliares para la selección de las áreas que afectarían al mínimo a la población, pero al mismo tiempo sirvieran a la mayor población posible.

Cuadro 5. Clases de aptitud según la distancia de los sitios a límites municipales de la cuenca de Cuitzeo

Clave	Distancia en metros	Descripción aptitud
1	< 2500	Muy apta
2	2500 – 5000	Apta
3	5000 – 7000	Moderadamente apta
4	7000 – 15000	Poco apta
5	> 15000	No apta

Cuadro 6. Criterios de reclasificación del mapa final, sitios potencialmente aptos para la colocación de rellenos

Aptitud distancia a municipios	Aptitud rellenos sanitarios			
Muy apta	No apta	Moderadamente apta	Apta	Muy apta
Apta	No apta	Moderadamente apta	Apta	Muy apta
Moderadamente apta	No apta	Moderadamente apta	Apta	Apta
Poco apta	No apta	Poco apta	Moderadamente apta	Moderadamente apta
No apta	No apta	No apta	Poco apta	Poco apta
			No apta	No apta

En el Cuadro 7 se presentan los resultados de la aplicación de los tres modelos citados. Para el caso del modelo de lógica booleana indica que alrededor del 5% de la superficie de la cuenca es muy apta para la construcción de rellenos sanitarios (Figura 3). En este modelo, 24 municipios tienen áreas clasificadas como muy aptas; ninguno de los municipios presentó áreas clasificadas como aptas, nueve municipios presentaron áreas clasificadas como moderadamente aptas, tres municipios tienen áreas poco aptas y los 28 presentaron áreas que no son aptas, de los cuales seis municipios no tienen superficies con ningún grado de aptitud para la colocación de rellenos, ya que se encuentran cerca del parteaguas de la cuenca y ocupan una porción reducida de la misma. Este modelo es el más restrictivo, ya que el 94% del área total de la cuenca resulta no apta para construir un relleno sanitario; sin embargo, es notorio que los dos modelos restantes también tienen más de la mitad de la superficie en la categoría de no apta.

El modelo de evidencia binaria (Figura 4) indica también que un 5% de la superficie de la

cuenca es muy apta, el 22% como apta, el 15% moderadamente apta, alrededor del 3% es poco apta y el 54% de la cuenca es no apta para la colocación de rellenos sanitarios. Este modelo indica que 23 de los 28 municipios de la cuenca tienen sitios considerados muy aptos para la construcción de rellenos sanitarios; no obstante, a diferencia del modelo anterior, en este modelo, los 28 municipios de la cuenca tienen sitios aptos y moderadamente aptos para la colocación de rellenos sanitarios; tres municipios tienen poca aptitud y aunque en este modelo baja el porcentaje de superficie no apta con respecto al modelo de lógica booleana, todos resultaron con superficies no aptas para la construcción de rellenos sanitarios (Cuadro 7).

En el modelo de índice de sobreposición con mapas multiclase (Figura 5) se indica que el 1.5% de la superficie de la cuenca, repartida en 25 municipios, se encuentra en la categoría muy apta, alrededor del 8% en los 28 municipios es apta, el 16% en los 28 municipios tienen superficies en la categoría moderadamente apta, tres municipios con alrededor del 2% están en la categoría poco apta y el 72% de la superficie de

Cuadro 7. Superficie cubierta por las distintas clases de aptitud del terreno para la colocación de rellenos sanitarios en los tres modelos utilizados

Aptitud	MODELO					
	LB		EB		ISMM	
	Área en km ²	Área %	Área km ²	Área %	Área km ²	Área %
Muy apta	197.0	4.9	204.3	5.1	60.3	1.5
Apta	0.0	0.00	880.2	22.0	310.5	7.8
Moderadamente apta	17.6	0.4	607.9	15.2	652.5	16.3
Poco apta	17.9	0.4	110.2	2.8	79.7	2.0
No apta	3771.3	94.2	2190.7	54.9	2890.7	72.4

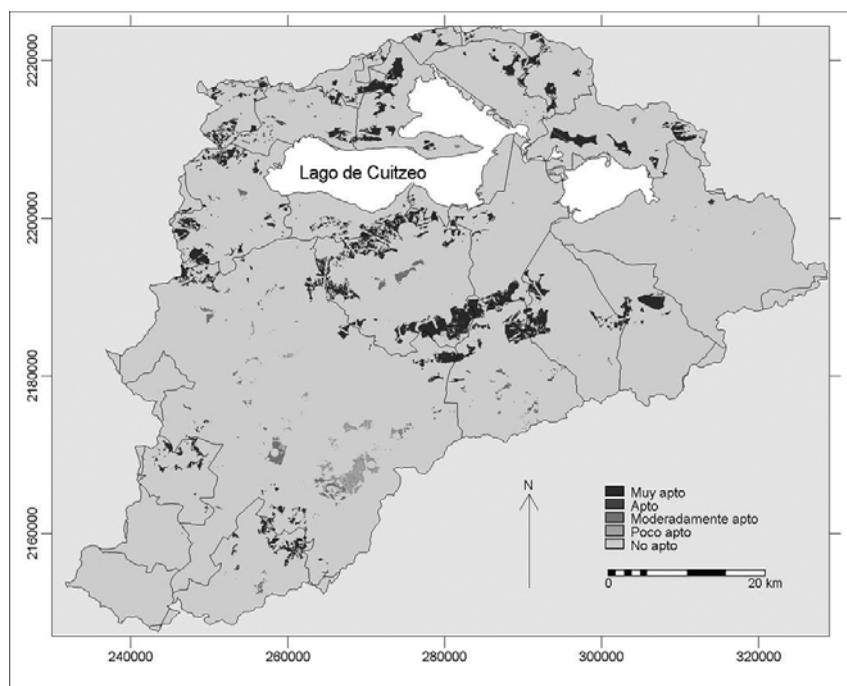


Figura 3. Distribución potencial de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, modelo de lógica booleana.

los 28 municipios es no apta para la construcción de rellenos sanitarios.

Por último, en el Cuadro 8 se presenta una síntesis de la evaluación realizada a los tres modelos a partir del estudio de caso. Se consideró importante incluir tres aspectos para la evaluación: la accesibilidad, que se refiere no sólo al costo económico del programa, sino a la disponibilidad y el soporte técnico disponible. El segundo aspecto fue el nivel de complejidad que se refiere al grado de dificultad en la operación de los programas, pero también al nivel

de abstracción de los modelos y, por último, la confiabilidad de los resultados de los modelos con referencia a la toma de decisiones para la construcción de los rellenos sanitarios.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En México, la creciente generación de los residuos sólidos municipales es uno de los principales retos que las autoridades tienen que enfrentar al responder a las demandas de la sociedad por un mayor y mejor servicio de reco-

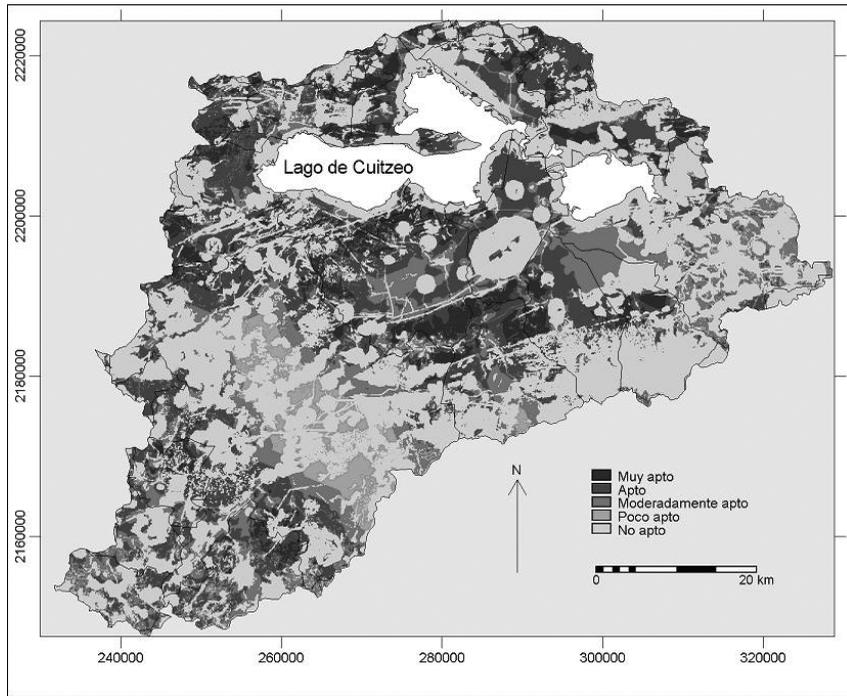


Figura 4. Distribución potencial de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, modelo de evidencia binaria.

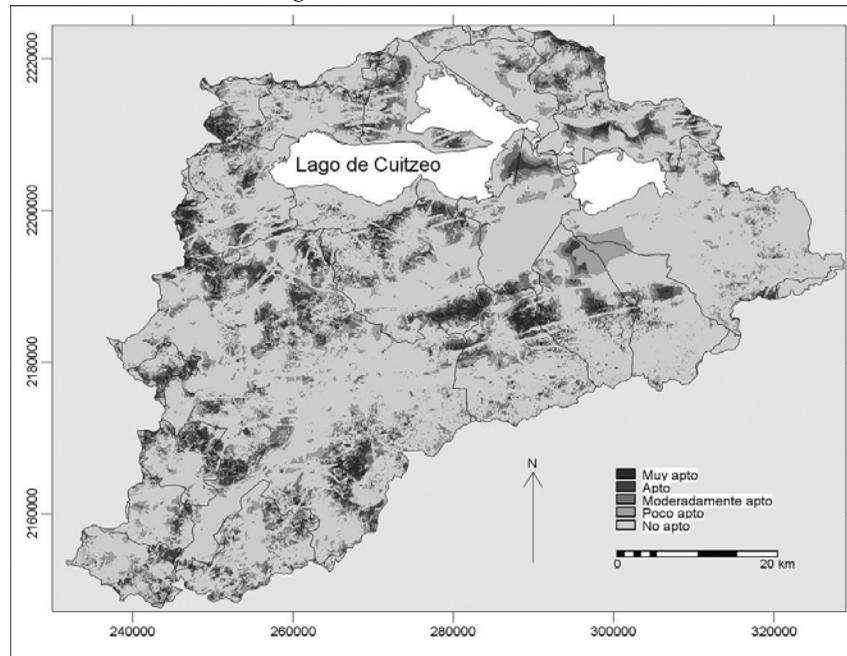


Figura 5. Distribución potencial de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, modelo de índice de sobreposición con mapas multiclase.

Cuadro 8. Matriz de comparación de los niveles de restricción de cada modelo con vista al tomador de decisiones

CARACTERÍSTICAS	LÓGICA BOOLEANA	MODELO EVIDENCIA BINARIA	ÍNDICE DE SOBREPOSICIÓN
Accesibilidad:			
Por el costo de adquisición	Alta	Alta	Alta
Por la capacitación requerida	Baja	Moderada	Alta
Complejidad:			
Para la implementación	Alta	Alta	Alta
Para su manejo	Alta	Moderada	Baja
Nivel de abstracción de los modelos	Moderado	Moderado	Alto
Información requerida para correr los modelos	Moderada	Moderada	Alta
Confiabilidad de los resultados	Alta	Alta	Alta

lección y de disposición final de residuos sólidos, que disminuya los impactos ambientales y a la salud pública, lo que hace que en la actualidad, las decisiones respecto al manejo y disposición final de los residuos sólidos deban tomarse con celeridad. Sin embargo, la prontitud en la toma de decisiones ha ocasionado que no siempre se tomen las decisiones adecuadas, ya que los estudios técnicos para ello requieren de grandes recursos económicos y técnicos que muchas veces sobrepasan la capacidad de los municipios.

Las modificaciones recientes a la normatividad mexicana para mejorar la disposición final de los residuos sólidos, han favorecido la realización de "estudios integrales", "diagnósticos" y "proyectos ejecutivos", entre otros estudios y cuyo objetivo es la ubicación de sitios para rellenos sanitarios. Derivado de lo anterior, han surgido empresas y consultorías que no cuentan con la experiencia, ni con los cuadros profesionales capacitados para la realización de estos estudios, lo cual ha incidido en que frecuentemente los resultados de éstos se hayan limitado a cumplimentar y conformar expedientes a manera de "receta". Por otro lado, la mayor parte de estas empresas se encuentra geográfica y socialmente alejada de la

realidad que enfrentan los municipios para los que se realizan estos estudios. Todo esto, además de incidir en el encarecimiento de los costos económicos para la elaboración de estos estudios, repercute en que sólo se efectúen visitas de "reconocimiento" y que la investigación se limite a trabajo de escritorio para conformar legajos con muy buena presentación, pero con un contenido ajeno a la realidad, imprecisos y sin ninguna propuesta clara, además de que los montos económicos planteados para su ejecución escapan a toda posibilidad de financiamiento por parte de los municipios.

En la actualidad, la mayoría de estos estudios no se han ejecutado, ya que además de no haber destinado el financiamiento requerido, tampoco han tomado en cuenta variables tan elementales como es la viabilidad de adquirir el terreno propuesto que se requiere, por lo que todos esos "estudios" se han quedado a ese nivel y sólo forman parte de los archivos de algunas dependencias gubernamentales. Por ello es importante que en los procesos de planeación del uso del territorio, así como en la toma de decisiones y en el diseño de las políticas públicas para la selección de sitios y construcción de los rellenos sanitarios, se

incluyan los factores sociales, económicos, ecológicos, paisajísticos y sobre todo geomorfológicos, ya que estas obras involucran la creación de nuevas formas de relieve y, por ende, la modificación del paisaje (Gray, 2002).

Otro gran problema de los estudios para selección de sitios en México, es que la decisión final recae en administradores que nunca son expertos en gestión de residuos sólidos, por lo cual, es importante desarrollar metodologías para la toma de decisiones que disminuyan la incertidumbre y mejoren la capacidad de decisión de estos administradores. Este trabajo evalúa tres modelos de selección de áreas potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios, porque se considera que el tomador de decisiones debe contar con la mayor cantidad de información para seleccionar la opción que ellos consideren más adecuada, en función de la complejidad del territorio, tanto desde el punto de vista social como biofísico y de la factibilidad financiera de los sectores interesados en una obra de ingeniería sanitaria. De esta manera, el tomador de decisiones cuenta con más opciones para elegir entre tres escenarios factibles para la ubicación de los rellenos sanitarios.

Los criterios que se utilizaron para la construcción de estos tres modelos se tomaron de las especificaciones indicadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1994 (SEDESOL, 1994) pero, además, se incluyó en los modelos información sobre los límites territoriales y la de infraestructura carretera; la primera para delimitar sitios que además de cubrir con todos los requisitos técnicos, estuviesen ubicados en sitios que brindaran servicio a más de un municipio; la segunda para asegurar la viabilidad financiera de la ejecución del proyecto, ya que la construcción de carreteras de acceso ha sido uno de los principales obstáculos para la construcción de los rellenos en México.

Los SIG son herramientas técnicas que permiten el abaratamiento económico de la realización de los estudios para la delimitación

de sitios para la construcción de rellenos sanitarios, al permitir una disminución de los tiempos y el margen de error en la interpretación de las variables físicas y biológicas. No obstante, el uso de esta herramienta se ve limitada a la disponibilidad de información cartográfica de una región; sobre todo, por las limitaciones en cuanto a la resolución espacial de los datos, ya que muchos de éstos sólo están disponibles a escalas medianas y pequeñas (1:250 000, 1:1 000 000), por lo que con esta información, los SIG son útiles sólo para la identificación preliminar de las áreas potenciales (Siddiqui *et al.*, 1996), pero no de sitios específicos. Por ello, es importante que una vez identificadas aquellas áreas potenciales se requiere realizar un análisis de sitio con el cual evaluar en detalle las características biofísicas del terreno y las condiciones socioeconómicas de los pobladores, así como de la factibilidad financiera para la ejecución de la obra.

Durante el proceso de toma de decisiones uno debe reconocer las fuentes de error o imprecisión y manejarlo adecuadamente en el análisis y representación cartográfica. En este trabajo, la escala de análisis correspondió a la escala de las bases de datos cartográficas con menor detalle, es decir, Geología; como se recomienda en la bibliografía del tema (Weir, 1991; Burrough, 1986; Drummond, 1987), por lo tanto, este análisis tiene un carácter regional, útil para reconocer las áreas potenciales. Sin embargo, esta cartografía, levantada originalmente a escala 1:50 000, por ser de carácter académico es altamente confiable. No obstante, que los resultados de los tres modelos utilizados son importantes para tomar decisiones con respecto a la ubicación de los sitios, esta gran cantidad de información supone un amplio nivel de complejidad para los administradores que se ven en la disyuntiva de tener que tomar la decisión para un sitio, pero además, también tener que decidir entre la herramienta de decisión. La accesibilidad derivada de los costos para comprar los programas y la capacitación al personal

técnico se limita ostensiblemente en los países en vías de desarrollo, ya que en éstos se tiene que importar; además, la complejidad derivada del manejo de la herramienta y del nivel de capacitación técnica para su manejo son cuestiones importantes, pero no siempre se toman en cuenta, lo cual influye en la adquisición de equipos y programas inadecuados u obsoletos, con la consecuente dilapidación de recursos económicos tan escasos en estos países. Por último, es extremadamente importante conocer el grado de confiabilidad de los resultados de la aplicación de los diferentes modelos que se refleje en un conocimiento de la exactitud del dato cartográfico y la precisión dada por la escala de los insumos y las herramientas de medición, ya que de ello dependerá el éxito de la decisión adoptada.

El criterio de intermunicipalidad en la selección de los sitios es imprescindible y se constituye en la única opción para asegurar la viabilidad financiera de la operación de un relleno sanitario. En México, al igual que en la mayoría de los países en vías de desarrollo, la polarización geopolítica del territorio, aunado a la desigual distribución de la población, que se encuentra excesivamente concentrada en unas pocas regiones, conlleva a que alrededor de 2 400 municipios, con una población de 30 millones, tengan severas limitaciones económicas para construir y operar rellenos sanitarios. No obstante, es frecuente la dificultad para compaginar ciertas variables con los criterios de intermunicipalidad y de construcción de rellenos sanitarios, ya que algunas veces éstos se contraponen para su aplicación. Tal es el caso de la cercanía de los sitios a los centros de población, lo cual, por un lado, es una de las principales limitantes establecidas por la legislación ambiental en la selección de los sitios para rellenos sanitarios, a efecto de minimizar el impacto y los riesgos a la salud de la población; pero, por el otro lado, la cobertura al máximo número de localidades es el requisito indispensable para asegurar la participación de varios municipios y con ello lograr la

viabilidad económica del relleno sanitario, pues de ello dependerá su construcción y operación adecuada en el mediano plazo. Por esto, en este estudio la total compaginación de estos dos criterios excluyó una gran cantidad de sitios potenciales, por lo cual el área determinada en cada uno de los modelos se redujo aún más; sin embargo, las unidades delimitadas por los tres modelos utilizados en este trabajo coinciden en relación con la distribución potencial y que cumplen exactamente con los requerimientos especificados en la normatividad para la construcción de los rellenos sanitarios.

El primer modelo fue el más sencillo desde el punto de vista del modelamiento; los modelos segundo y tercero, al requerir de una ponderación de cada una de las clases de los mapas de acuerdo con el orden de importancia establecido para la delimitación de los sitios, resultaron en un mayor nivel de complejidad para su modelamiento. Sin embargo, el modelo de lógica booleana es más restrictivo en la interpretación de los datos, ya que sólo permite evaluar el cabal cumplimiento de un atributo; esto es que si se cumple, el modelo lo toma en cuenta, mientras que si el atributo no cumple con las condiciones al 100% lo rechaza, sin importar si el atributo cumple parcialmente con las condiciones. Por el contrario, el modelo de evidencia binaria permite desagregar cada uno de los atributos en diferentes intervalos intermedios entre el 0 y el 100% de cumplimiento, lo cual permite valorar e incluir a un atributo, aunque éste sólo se cumpla parcialmente. El inconveniente de este modelo es que la asignación de los pesos a cada uno de los criterios es subjetiva e incide mucho en los resultados, ya que ello agrega una gran parcialidad en la evaluación de la importancia de cada atributo, lo cual dependerá del criterio y nivel de conocimiento técnico del evaluador y especialistas en la legislación ambiental.

La integración de datos temáticos en el marco de un SIG conforma una herramienta de soporte de decisiones espaciales, que permite

ubicar y determinar sitios potenciales para la construcción de rellenos sanitarios, con un alto grado de confiabilidad a escala regional. La implementación de esta técnica permite abatir el impacto ambiental de la disposición inadecuada de los residuos sólidos, ya que disminuye los costos económicos y el tiempo de ejecución en la realización de estudios técnicos para la selección de sitios, los cuales deben ser ejecutados en aquellas áreas con alto potencial para la construcción de rellenos sanitarios. El uso de las técnicas de modelamiento espacial para la ubicación de sitios para la construcción de rellenos sanitarios, son herramientas que pueden ser aplicadas con la misma finalidad a otras regiones similares.

CONCLUSIONES

Esta investigación se basa en un enfoque interdisciplinario que integra tecnologías de SIG y PR, y sistemas de soporte de decisión, con el propósito de ubicar en una zona de México, sitios para rellenos sanitarios intermunicipales (RSI). De esto último, se especifica a los RSI, como las obras para disposición final de residuos sólidos municipales (RSM), que cumplen con las condiciones de construcción y funcionamiento especificadas en la normatividad ambiental mexicana y que por su ubicación brindan el servicio y están administrados y financiados por dos o más municipios.

La investigación presupone que el modelamiento espacial representa la alternativa que permite incluir todas las variables ambientales y socioeconómicas mencionadas, con datos temáticos existentes o generados específicamente, a fin de evaluar grandes áreas y optimizar el proceso de selección de sitios; para esto se realizaron diversos modelos: modelos de lógica booleana, mapas de evidencia binaria e índice de sobreposición con mapas multiclase, a fin de determinar el mejor para la zona en estudio. Además, la inclusión del criterio de intermunicipalidad en los modelos para seleccionar sitios para rellenos sanitarios es una opción

que hace apta económicamente su construcción y operación bajo los requisitos especificados en la normatividad para proteger el medio ambiente y la salud pública.

La información resultante de un modelamiento regional permite reducir tiempos de ejecución y costos económicos de los estudios detallados requeridos para la identificación de sitios basados en análisis de datos puntuales, por lo que debe explorarse a más detalle en los países en vías de desarrollo; sin embargo, es importante capacitar cuadros técnicos en manejo de SIG y PR, además de apresurar los estudios para cartografiar a escalas más grandes las variables físicas y biológicas que se requieren como insumos para la selección de los sitios para rellenos sanitarios. Es importante también que al modelamiento espacial le preceda un exhaustivo trabajo que incluya: *a)* generación e integración de los datos espaciales; *b)* validación en terreno de los datos espaciales; *c)* aplicación de los modelos para la identificación de áreas potenciales; *d)* trabajo de campo para corroborar los sitios resultantes del modelamiento, y *e)* consensar con los diferentes actores las opciones para tomar la decisión final con respecto al sitio para construir el relleno sanitario.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a través del proyecto No. 5.9. Se agradece la cesión de los datos de carreteras al IMT-SC y de los límites municipales al Instituto de Geografía de la UNAM. El manuscrito fue enriquecido con los comentarios de los árbitros. Los autores agradecen a Luis M. Morales los comentarios emitidos al manuscrito.

REFERENCIAS

Acosta Villegas, A. (2002), *Cambio en los patrones de consumo de agua y cambio de uso del suelo. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo*, tesis de, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.

- Batstone, R., J. E. Smith, Jr. and D. Wilson (1989), *The safe disposal of hazardous wastes. The special needs of developing countries*, The World Bank Technical Paper Number 93, vol. 3, Washington.
- Baban, S. M. J. and J. Flannagan (1988), "Developing and implementing GIS-assisted constraints criteria for selecting potential landfill sites in the UK", *Planning Practice and Research Journal*, 13, (12), pp. 139-151.
- Bonham-Carter, G. F. (1994), *Geographic information systems for geoscientists. Modelling with GIS*, Tarrytown, N. Y., Pergamon, Elsevier Science Ltd., Computer Methods in the Geosciences, vol. 13.
- Buenrostro, O. e I. Israde (2003), "La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca de Cuitzeo, México", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 19(4), pp. 161-169.
- Buenrostro, O. and G. Bocco (2003), "Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives", *Resources, Conservation and Recycling*, 39, pp. 251-263.
- Burrough, P. A. (1986), *Principles of Geographical Information Systems*, Clarendon Press, Oxford.
- Drummond, J. E. (1987), "A framework for handling error in geographic data manipulation", *ITC Journal*, 4, pp. 73-82.
- Gray, J. M. (2002), "Landraising of waste in England, 1990-2000: a survey of the geomorphological issues raised by planning applications", *Applied Geography*, 22(3), pp. 209-234.
- ILWIS 3.1 (2002), *Integrated Land and Water Management Information System*, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands.
- IMT (2000), *Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte*, Instituto Mexicano del Transporte, México, fecha de consulta: 2003.
- INE/SEMARNAP (1995), Norma Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-1995. *Diario Oficial de la Federación*, martes 7 de noviembre de 1995, Instituto Nacional de Ecología/Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, México.
- INEGI (1971), *Carta de edafología*, Puruándiro F14C82, escala 1:50 000.
- INEGI (1973), *Carta de edafología*, Acámbaro F14C84, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Moroleón F14C83, escala 1:50 000.
- INEGI (1979), *Carta de edafología*, Cuitzeo E14A13, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Morelia E14A23, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Pátzcuaro E14A22, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Tzitzio E14A24, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Villa Escalante E14A32, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Zinapécuaro E14A14, escala 1:50 000.
- INEGI (1982), *Carta de edafología*, Coeneo de la Libertad E14A12, escala 1:50 000; *Carta de edafología*, Villa Madero E14A33, escala 1:50 000.
- INEGI (1983), *Carta de edafología*, Maravatío E14A15, escala 1:50 000.
- INEGI (1996), *Carta topográfica*, Acámbaro F14C84, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Moroleón F14C83, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Cuitzeo E14A13, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Morelia E14A23, escala 1:50 000; *Carta edafología*, Pátzcuaro E14A22, escala 1:50,000; *Carta topográfica*, Tzitzio E14A24, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Villa Escalante E14A32, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Zinapécuaro E14A14, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Coeneo de la Libertad E14A12, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Villa Madero E14A33, escala 1:50 000; *Carta topográfica*, Maravatío E14A15, escala 1:50 000.
- Instituto de Geografía (1995), *Límites Municipales y Estatales*, UNAM, México, fecha de consulta: 2003.
- Kao, J., H. Lin and W. Chen (1997), "Network Geographic Information System for Landfill Siting", *Waste Management & Research*, 15, pp. 239-253.
- Lober, D. J. (1996), "Why not here: the importance of context, process and outcome on public attitudes towards the siting of waste facilities", *Society and Natural Resources*, 9, pp. 375-394.

- López, G. E. y G. Bocco (2001), "Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo", en Mendoza, M., E. López y G. Bocco (2001), *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial*, Informe Final presentado al Programa SIMORELOS-CONACYT, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, México.
- Malcezwki, J. (1999), "Spatial multicriteria decision analysis", en Thill, J. C., *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis*, Ashgate, Hamshire.
- Matsuto, T. and R. K. Ham (1990), "Residential solid waste generation and recycling in the USA and Japan", *Waste Management & Research*, 8, pp. 229-242.
- Mendoza, M., E. López y G Bocco (2001), *Regionalización Ecológica, Conservación de Recursos Naturales y Ordenamiento Territorial en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán*, Informe final presentado al SIMORELOS-CONACyT (Proyecto 98306024), Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, México.
- Mendoza, M. E. (2002), *Implicaciones hidrológicas del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo a nivel regional. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo*, tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Siddiqui, M. Z., J. W. Everett and B. E. Vieux (1996), "Landfill siting using Geographic Information Systems: a demonstration", *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), pp. 515-523.
- Pasquare, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Bibaldi and L. Vezzoli (1991), *Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*, Map and Chart Series MCH072, Geological Society of America.
- SEDESOL (1994), Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1994, *Diario Oficial de la Federación*, Secretaría de Desarrollo Social, México.
- Sharifi A. and M. Van Herwijnen (2003), *Spatial Decision Support System*, ITC, Enschede.
- Tran, T. L. G. C. Knight, V.R. O'Neill, H. K. Riitters and J. Wickham (2002), "Fuzzy decision analysis for Integrated Environmental Vulnerability Assessment of the Mid-Atlantic Region", *Environmental Management*, 29(6), pp. 845-859.
- Weir, M. J. C. (1991), "Errors in geographic information systems", en Valenzuela C. R. (ed.), *Introduction to Geographical Information Systems*, ITC, Enschede, The Netherlands.