

# EXPERIENCIAS METODOLÓGICAS EN TORNO A LA LOCALIZACIÓN DE UN CONFINAMIENTO DE RESIDUOS EN MÉXICO

**Sergio Franco Maass**

Profesor Investigador del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Planeación Territorial  
Facultad de Planeación Urbana y Regional Universidad Autónoma del Estado de México  
*serfm@coatepec.uaemex.mx*

## RESUMEN

Este trabajo describe los esfuerzos de investigación en torno al desarrollo de metodologías para la localización de centros de gestión de residuos peligrosos en México. El primer planteamiento metodológico permitió integrar, dentro del ambiente de un Sistema de Información Geográfica, una serie de procedimientos de evaluación con base en criterios normativos, ambientales y de eficiencia espacial. Dicho planteamiento posibilitó obtener y evaluar un conjunto de soluciones de localización para el Valle de Toluca y, sobre todo, determinar la viabilidad de la metodología propuesta. Tomando esto en consideración, emprendimos un nuevo proyecto de investigación basado en los principales aspectos metodológicos pero incluyendo nuevos procedimientos de análisis relacionados con la equidad espacial. Esto nos permitió determinar alternativas para la localización de instalaciones no deseables en la Zona Poniente del Estado de México. Aunque nuestros esfuerzos de investigación han tenido un importante impacto en el ámbito académico, son casi desconocidos por los tomadores de decisiones. Este es un aspecto que intentamos corregir.

## Palabras Clave:

Modelos de localización-asignación, justicia espacial, residuos.

## ABSTRACT

This paper describes our efforts in developing a methodology for the location of facilities for the management of dangerous wastes in Mexico. The first methodological scope allowed us to integrate, into a Geographical Information System environment, a series of procedures for the evaluation of normative, environmental and efficiency criteria. With the application of the procedures to the region of the valley of Toluca, we could determine a series of solutions and the viability of the proposed methodology. Taking this into consideration, we undertook a new research project based on the main aspects of the methodology but including new procedures related with the evaluation of the spatial equity. This allowed us to determine a series of alternatives for the location of undesirable facilities in the west zone of the State of Mexico. Although our research efforts have had an important impact in the academic field, they are almost unknown by the decision makers. This is an aspect we are trying to correct.

## Keywords:

Location-allocation models, spatial equity, waste management.

---

## ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La generación de residuos industriales peligrosos constituye uno de los principales problemas ambientales de México y, a pesar de los esfuerzos gubernamentales, no ha sido posible construir infraestructuras para su tratamiento y disposición final. Esto se debe, entre otras cosas, a las dificultades implícitas en la localización de este tipo de instalaciones. De acuerdo con Bosque y Franco (1995), la localización de un confinamiento de residuos, al igual que otro tipo de instalaciones no deseables, se puede abordar desde diversos enfoques:

1. instrumentos normativos que establecen restricciones de localización.
2. modelos matemáticos de localización asignación que consideran la distancia/proximidad.
3. modelos de optimización de la eficiencia espacial con base en criterios conflictivos/complementarios de proximidad.
4. modelos de evaluación de rutas que buscan maximizar la eficiencia en el transporte al tiempo que se minimiza el riesgo a la población.
5. procedimientos de localización que buscan lograr soluciones de consenso aceptables para todos los agentes ambientales involucrados.

La localización de instalaciones para el confinamiento de los residuos peligrosos debe considerar tres aspectos fundamentales: la eficiencia espacial, el riesgo a la población y la equidad espacial. La *eficiencia espacial* "...es una cuestión multicriterio que debe buscar una solución de compromiso entre la minimización de las distancias entre generadores de residuos e instalaciones y la maximización de las distancias entre la población y las instalaciones" (Bosque y Franco, 1995: 100). *El riesgo* se refiere a la "frecuencia de efectos indeseables derivada de la exposición a un material peligroso e implica considerar múltiples aspectos relacionados con el transporte y disposición final de los residuos" (Bosque y Franco, 1995: 107). La *equidad espacial*, por su parte, se expresa como "...el grado en que la población de una región determinada comparte los riesgos y molestias

derivados de la disposición final y el transporte de los residuos" (Bosque y Franco, 1995: 100).

Tratar de evaluar el territorio en términos de eficiencia, riesgo y equidad implica, necesariamente, el desarrollo de metodologías que integren la gran variedad de aspectos incidentes. Este fue, en definitiva, el eje rector del trabajo de tesis doctoral "*Metodología para la Localización de Centros Integrales para la Gestión de Desechos Industriales Peligrosos. El caso del valle de Toluca*". Dicho trabajo buscó incorporar la evaluación de la eficiencia y el riesgo en el transporte y localización de los residuos y estuvo encaminado al estudio del Valle de Toluca, una de las zonas de mayor actividad industrial y más densamente pobladas del centro del país (Franco, 1999).

---

## METODOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN EN EL VALLE DE TOLUCA

La necesidad de considerar múltiples factores de localización implicó definir un marco metodológico flexible que, retomando las restricciones de la normativa mexicana, integrara diversos procedimientos relacionados con la evaluación del riesgo y la eficiencia espacial. En este contexto resultaba de especial interés determinar las posibilidades de aplicación de los modelos de localización asignación y del análisis de rutas para el transporte de residuos peligrosos, recurriendo para ello, a la aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio dentro del ámbito de los sistemas de información geográfica (figura 1).

Como es posible observar en la figura 1, la metodología propuesta comprende cuatro grandes etapas: Definición de un primer conjunto de sitios candidatos para la localización del confinamiento de residuos; Evaluación de los sitios candidatos mediante la aplicación de modelos de localización asignación; Evaluación de los sitios candidatos a partir del análisis de rutas para el transporte de los residuos peligrosos y; Evaluación final de alternativas mediante la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio discreta.

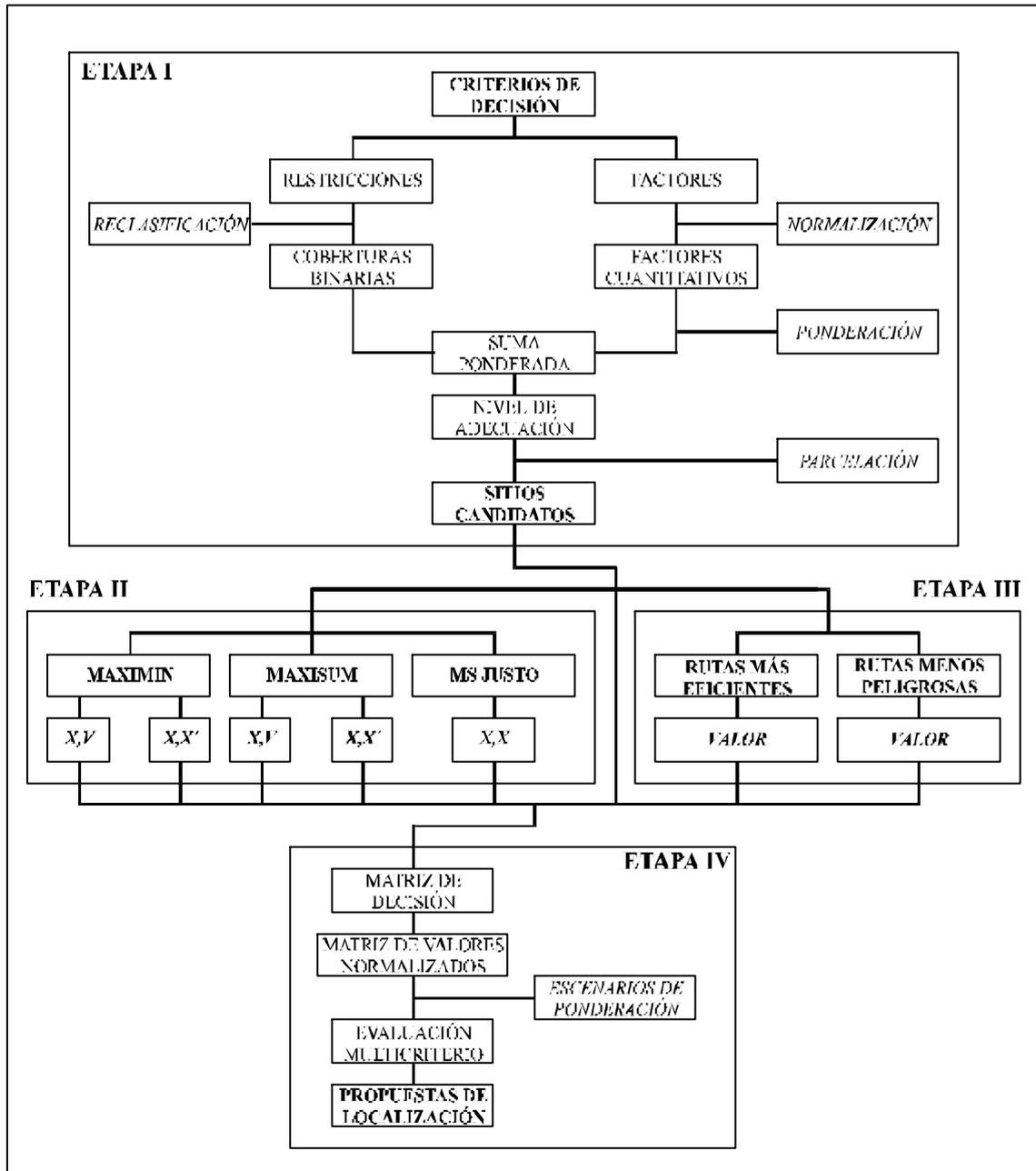


Figura 1. Metodología General para la Localización Asignación de un CIMARI en el Valle de Toluca

## Etapa I. Obtención de sitios candidatos (Valle de Toluca)

Se definieron una serie de factores y restricciones de muy diversa índole.

### Restricciones normativas

El principal instrumento para la localización de un CIMARI en la República Mexicana es la norma ecológica NOM-055-ECOL/1993 que

“...establece las características que deben reunir los sitios destinados al confinamiento de residuos peligrosos” (SG, 1993). Dicha normativa define una serie de restricciones ambientales, de proximidad a las vías de comunicación y a las localidades urbanas. A finales de 1996 se presentó el proyecto de reforma NOM-055-ECOL/1996 (SG, 1996), que fue sometido a debate público durante los primeros meses de 1997. Es importante destacar que, aunque el proyecto de reforma no prosperó, los criterios

contemplados en la propuesta si se incluyeron en nuestro trabajo dado que, al momento de realizar la investigación, existían grandes probabilidades de que las reformas serían aprobadas. La tabla 1 presenta una síntesis de los principales criterios contemplados en la norma vigente y en la propuesta de 1996:

Los criterios normativos se pueden expresar como un conjunto de coberturas binarias en las que el valor cero expresa la restricción absoluta a la localización del confinamiento y el valor uno representa la viabilidad de localización. Estas coberturas fueron obtenidas mediante el software de SIG IDRISI para Windows (ver. 2.0).

CONCEPTO	RESTRICCIONES	
	055/1993	055/1996
Proximidad a autopistas y carreteras	500 m	100 m
Proximidad a vías de ferrocarril	S/R	100 m
Proximidad a líneas de conducción eléctrica	S/R	100 m
Proximidad a gasoductos, oleoductos y poliductos	S/R	2.500 m
Proximidad a líneas de tendido telefónico y telegráfico	S/R	100 m
Proximidad a localidades > 10,000 hab	25.000 m	5.000 m
Proximidad a localidades de entre 5,000 y 10,000 hab	15.000 m	5.000 m
Proximidad a localidades < a 5,000 hab	S/R	5.000 m
Zonas permeables (protección al acuífero)	R	R
Zonas inundables	R	R
Proximidad a cuerpos de agua permanentes	500 m	1.000 m
Proximidad a cuerpos de agua intermitentes	500 m	200 m
Proximidad a corrientes permanentes	500 m	1.000 m
Proximidad a corrientes intermitentes	500 m	200 m
Proximidad a acueductos y canales	S/R	500 m
Desnivel respecto a corrientes y cuerpos de agua permanentes	20 m	S/R
Proximidad a fuentes de abastecimiento de agua	350 m	500 m
Dirección de los vientos dominantes	R	R
Zonas sísmicas	R	R
Riesgo de deslizamientos	S/R	R
Pendiente del terreno	<30% y >5%	S/R
Zonas erosionadas	R	S/R
Áreas naturales protegidas	R	R
Proximidad a las áreas naturales protegidas	S/R	2.500 m
Zonas de cultivo	S/R	R
Proximidad a zonas de cultivo	S/R	2.500 m

R *Restringido*

S/R *Sin restricción o no considerado explícitamente en la normativa*

Tabla 1. Restricciones de la norma ecológica de 1993 y del proyecto de reforma de 1996

### **Factores de adecuación**

La aplicación de la normativa mexicana permitió determinar aquellas regiones del Valle de Toluca, libres de toda restricción para la localización del confinamiento. La propuesta metodológica planteada, sin embargo, buscaba caracterizar el territorio de acuerdo a su nivel de adecuación, considerando para ello tres criterios de adecuación:

### **Conexión al acuífero [permeabilidad].**

El mapa de conexión al acuífero se derivó del mapa de unidades litológicas y representa la transformación de una variable nominal en una variable cuantitativa. Esto se realizó mediante la aplicación del método de jerarquías analíticas (MJA), recomendado por Barredo (1996: 126). Una vez definidas las diversas categorías temáticas de la litología regional, se recurrió al consejo de expertos del Departamento de Geografía de la

Universidad de Alcalá (Dra. Ana Camarasa y Dr. Fernando Moreno), para asignar, a cada categoría temática, un valor relativo en función de su permeabilidad (figura 2a).

### **Proximidad a la población.**

Se consideró que el nivel de adecuación del territorio, no solo variaba con la proximidad a las localidades, sino que guardaba relación con el total de habitantes que podrían verse afectados por la presencia cercana de una instalación no deseable. (figura 2b).

### **Accesibilidad a los generadores de residuos.**

Se partió de considerar que la accesibilidad de cada pixel de la imagen dependía de su proximidad al sistema de comunicaciones regional y de la dificultad de desplazamiento a lo largo de la red de carreteras en función de la velocidad, la población afectada y la pendiente (figura 2c).

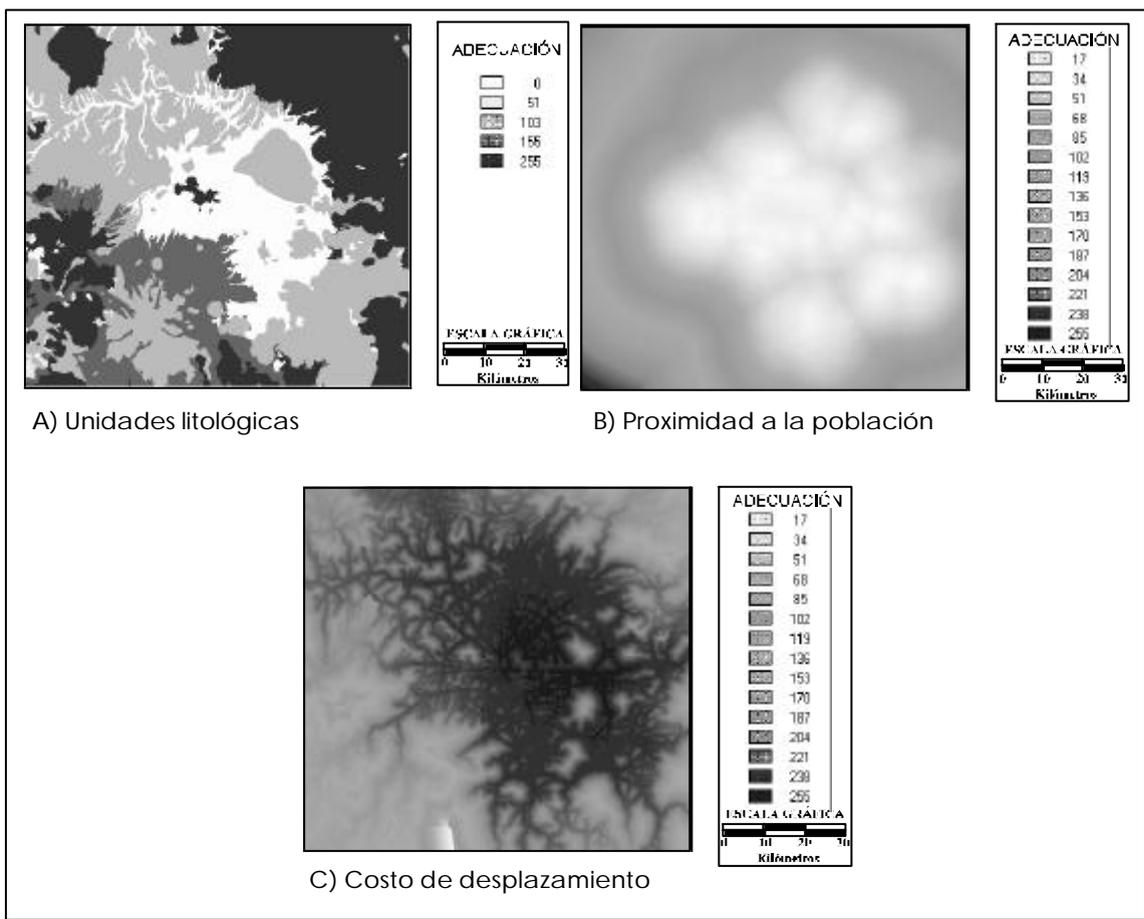


Figura 2. Factores de adecuación para la localización de un CIMARI en el Valle de Toluca

## Determinación de alternativas de localización

Como resultado de aplicar el procedimiento de la suma lineal ponderada (considerando pesos iguales para los tres factores de adecuación) y la sobreposición multiplicativa de las restricciones normativas establecidas en el proyecto de reforma de 1996, fue posible obtener una imagen con 5.899 píxeles (1.474,75 ha), cuyos niveles de adecuación varían entre 79 y 205 (figura 3).

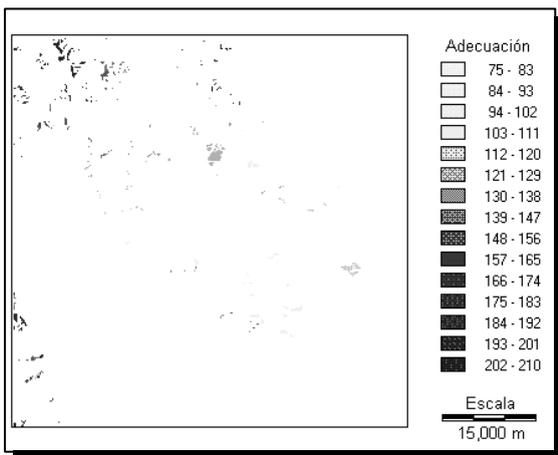


Figura 3. Zonas adecuadas para la localización de un CIMARI en el Valle de Toluca

El análisis cartográfico arrojó una gran cantidad de píxeles independientes, cada uno con un valor específico de adecuación. En este punto fue necesario definir parcelas homogéneas de acuerdo a su valor medio de adecuación. Para ello se aplicó el Procedimiento de Parcelación por Intervalos (PPI) descrito por Franco y Bosque (1999). Se identificaron 15 parcelas o sitios candidatos, con una superficie mayor a 50 ha, cuyo valor medio de adecuación serviría como punto de partida para un análisis más detallado en las etapas subsiguientes (tabla 2a).

## Etapa II. Aplicación de Modelos de Localización Asignación (Valle de Toluca)

Una vez definido el conjunto de sitios candidatos, se procedió a la aplicación de modelos matemáticos basados en la maximización de la distancia, mínima o promedio, entre dichos sitios, la población

residente en la región y otras instalaciones no deseables existentes en la zona de estudio. Se definieron tres modelos de localización asignación:

- **El modelo *Maximin*.** Determina la distancia mínima euclidiana existente entre cada sitio candidato y la localidad más cercana.
- **El modelo *Maxisum*.** Determina la suma de las distancias ponderadas por la población, entre cada sitio candidato y el total de localidades existentes en el espacio geográfico considerado.
- **El modelo *Maxisum Justo*.** Es un refinamiento del modelo *Maxisum* que permite buscar una mayor equidad espacial al considerar la localización simultánea de dos instalaciones no deseables. El modelo implica comparar la proximidad entre pares de sitios candidatos y entre cada par con respecto a la población regional (Franco, 2000)

Estas tres funciones objetivo se encuentran implementadas dentro del programa MAXIM\_S, desarrollado en la Universidad de Alcalá por Francesco Dal Pozzo. El programa trabaja en ambiente Windows 95 y permite leer ficheros vectoriales y de valores del software de SIG IDRISI.

Una vez generada la base de datos fue posible aplicar el programa para la obtención de las distancias *maximin* [entre cada sitio candidato y la localidad más cercana (Tabla 2b) y entre cada sitio candidato y la instalación no deseable más cercana (tabla 2g)] y *maxisum* [entre cada sitio candidato y todas las localidades (Tabla 2c) y entre cada sitio candidato y todas las instalaciones no deseables (tabla 2f)].

## Etapa III. Evaluación de Rutas para el Transporte de Residuos Peligrosos (Valle de Toluca)

La evaluación de rutas de transporte de residuos peligrosos partió de considerar dos objetivos en conflicto: minimizar el riesgo impuesto a la población y minimizar los costos de transporte. Ello implicaba que cada sitio candidato debía ser evaluado en

función de la población expuesta y la facilidad de acceso.

Para estimar la población expuesta en cada tramo carretero, se consideraron dos variables relativas a la proximidad a la población: a) intensidad media de tráfico y b) total de población residente en un radio ( $\lambda = 500\text{m}$ ) a partir de cada arista de la red. La facilidad de acceso, por su parte, se estimó en función de la evaluación simultánea de: a) la distancia que es necesario recorrer a lo largo de la ruta y b) el tipo de vía por el que deben circular los vehículos que transportan los residuos.

El programa ROUTE de ARC/INFO permitió determinar el camino de menor resistencia, utilizando como impedancias los valores de fricción a la población expuesta y los valores de fricción por la facilidad de acceso. De esta manera fue posible obtener los valores de impedancia total de las rutas más eficientes (tabla 2d) y menos peligrosas

(tabla 2e) entre el principal sitio generador de residuos (El corredor industrial Toluca-Lerma) y los 15 sitios candidatos.

## Etapa IV. Evaluación Final de Alternativas (Valle de Toluca)

Una vez obtenidas las diversas valoraciones fue posible aplicar las técnicas de Evaluación Multicriterio Discreta (EMD) para la evaluación final de las alternativas de localización. Este procedimiento comprendió tres etapas fundamentales: a) la preparación de la matriz de criterios normalizados, b) la definición de los pesos de los criterios y, c) la aplicación de los métodos de evaluación.

<i>a<sub>i</sub></i>	CRITERIOS DE EVALUACIÓN( <i>j</i> )						
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
1	113	2022,6	39824942700	357,97	87,45	203.395,3	9.051,7
2	89	1178,3	36634549031	664,29	111,82	204.685,5	11.553,6
3	88	1558,7	39503843130	649,50	140,53	225.339,4	15.915,4
4	89	1307,2	35238327663	663,45	115,69	201.390,7	10.792,2
5	79	1293,6	29177741456	767,72	162,94	159.062,8	3.722,2
6	124	1815,3	33102631578	773,96	90,54	147.824,0	8.878,9
7	145	1404,0	72660762734	100,63	237,30	396.328,4	25.677,3
8	159	2014,7	70064838733	1029,01	237,45	379.779,1	26.137,1
9	192	2813,3	71522671251	1029,06	237,45	387.384,6	27.232,6
10	155	1718,9	65219180055	957,20	120,28	335.658,1	18.708,6
11	147	1756,5	59364090755	840,72	122,50	294.180,8	13.435,6
12	201	1232,9	65064433270	983,77	122,11	328.501,2	17.034,1
13	201	1109,9	69667570968	1239,57	139,02	352.642,7	19.956,3
14	203	2113,5	70257975404	1139,46	137,99	356.545,5	20.323,9
15	205	1343,9	73296223031	1189,22	136,06	372.394,7	22.225,8

Tabla 2. Valor de las 15 alternativas de localización (*a<sub>i</sub>*) en función de los 7 criterios

## La matriz de decisión

La evaluación final de los sitios candidatos partió de definir una matriz con la valoración de cada alternativa de acuerdo a los 7 criterios considerados:

### CRITERIOS:

- a Nivel medio de adecuación de la parcela  $a_i$ .
- b Distancia mínima entre  $a_i$  y la localidad más cercana.
- c Suma de distancias ponderadas entre  $a_i$  y el total de localidades de la zona de estudio.
- d Impedancia total de la ruta más eficiente entre  $a_i$  y la zona productora de residuos.
- e Impedancia total de la ruta menos peligrosa entre  $a_i$  y la zona productora de residuos.
- f Suma de distancias entre  $a_i$  y las instalaciones no deseables existentes.
- g Distancia mínima entre  $a_i$  y la instalación no deseable más cercana.

Una vez homogeneizada la dirección de los criterios [a maximizar], fue posible transformar el vector  $a_{ij}$  en el vector normalizado  $v_{ij}$ , en una escala entre 0 y 1, mediante la ecuación:  $v_i = a_i / \max a_j$  (Barba-Romero y Pomerol, 1997: 67). De esta manera se obtuvo la matriz de decisión con valores normalizados ( $v_j$ ).

## Definición de pesos

La aplicación de los métodos de evaluación multicriterio discreta implicó definir un vector de pesos. Para ello se aplicó el método de tasación simple en función de la importancia relativa que guardan los criterios entre sí. De esta manera se definió una serie de pesos cardinales que suman la unidad: ( $w_a=0.2$ ); ( $w_b=0.2$ ); ( $w_c=0.2$ ); ( $w_d=0.05$ ); ( $w_e=0.05$ ); ( $w_f=0.15$ ); ( $w_g=0.15$ ). Asimismo se realizó un análisis de sensibilidad de pesos mediante el procedimiento descrito por Jankowski y Richard (1994), basado en la definición de diversos escenarios con pesos ligeramente diferentes.

## Aplicación de los métodos de evaluación EMD

Se aplicaron tres métodos compensatorios de evaluación multicriterio: la suma ponderada, el análisis de distancia al punto ideal y el método TOPSIS (técnica para el orden de las preferencias por similitud a la solución ideal). Una descripción detallada de estos métodos se puede consultar en Barba-Romero y Pomerol (1997). El manejo automatizado de la información y la posibilidad de utilizar programas macro, nos permitió realizar el análisis de la sensibilidad de los pesos, tarea ciertamente laboriosa que tiende a omitirse en la aplicación de la EMD, pero que permite controlar mejor los aspectos subjetivos de la evaluación.

Una vez obtenido el orden de las alternativas mediante la aplicación de los distintos procedimientos, fue necesario definir un «conjunto de soluciones de compromiso», es decir, el "...conjunto de mejores alternativas

$a_i$	$O_1^*$	$O_2^{**}$	$O_3^{***}$
1	10	10	10
2	13	13	13
3	11	11	11
4	14	14	14
5	15	15	15
6	12	12	12
7	5	6	5
8	3	3	3
9	1	1	1
10	7	4	6
11	9	9	9
12	8	7	8
13	6	8	7
14	2	2	2
15	4	5	4
* Ordenación de la suma ponderada dado que $\min d_1^M(a_i) = \max S_j w_j a_{ij}$			
** Ordenación de la distancia euclidiana al ideal ( $d_2^M(v_i)$ )			
*** Ordenación TOPSIS con métrica euclidiana ( $D_2(v_i)$ )			

Tabla 3: Orden de las alternativas de acuerdo a las métricas 1 y 2

obtenidas por distancia al ideal o por TOPSIS, utilizando las combinaciones posibles de métricas en la medición de las distancias” (Barba-Romero y Pomerol, 1997: 249). De esta manera, considerando que tanto el método TOPSIS como la maximización de la distancia al anti-ideal o la minimización de la distancia al ideal, con la métrica 1, producen los mismos resultados de ordenación que la suma ponderada, hemos podido definir la tabla de ordenación de acuerdo a las métricas 1 y 2 (tabla 3).

### ***Selección de alternativas de localización***

Una vez obtenido el orden de las alternativas de localización, fue posible elegir los tres sitios candidatos mejor calificados y cuyo orden no varía en los tres métodos de evaluación utilizados: La parcela 9, con una superficie de 74 ha y un nivel medio de adecuación relativamente alto (191.65), es la mejor calificada pero presenta algunos problemas relacionados con su proximidad al Parque Nacional Nevado de Toluca. Le siguen, en orden de importancia la parcela 14 y la parcela 8 que, aunque adecuadas, también presentan algunas restricciones.

A partir de este conjunto reducido de alternativas es posible elegir, de forma más objetiva, aquella que mejor satisfaga los objetivos planteados. No debemos olvidar, sin embargo, que la toma de decisiones para la gestión ambiental es un proceso complejo en el que intervienen diversos agentes con objetivos particulares, frecuentemente en conflicto.

## **Principales problemas de la investigación en el Valle de Toluca**

La metodología de localización propuesta en el trabajo de tesis doctoral representa un aporte importante que contribuye a la evaluación objetiva del territorio y que, al incluir el análisis de algunos criterios socioeconómicos en el ambiente de un SIG, permite la búsqueda de soluciones más acordes con los intereses de los diversos agentes ambientales. La implementación metodológica, sin embargo, presentó algunos problemas.

### ***Sobre la zona de estudio***

La aplicación de la normativa mexicana vigente no permitió encontrar zonas adecuadas para la localización del confinamiento controlado de residuos en el Valle de Toluca. La posibilidad de afectar los recursos hidrológicos regionales y la presencia de una gran cantidad de población, limitan cualquier posibilidad de localización. Evidentemente, la búsqueda de soluciones óptimas de localización quedaba condicionada a la posibilidad de ampliar la zona de estudio.

### ***Sobre la normativa aplicada***

La definición de sitios candidatos partió de asumir que el proyecto de reforma NOM-055-ECOL/1996, sería aprobado sin mayores contratiempos. Dado que el proyecto no prosperó es evidente la necesidad de retomaren el análisis los criterios establecidos en la norma NOM-055-ECOL/1993.

### ***Sobre la disponibilidad de información***

Un aspecto que limita seriamente la aplicación de la metodología, sobre todo en lo referente a los criterios normativos, es la falta de información geográfica, lo suficientemente detallada y actualizada, que permita caracterizar correctamente todos los criterios restrictivos. Esta situación resultaba especialmente crítica dado que la investigación se realizó en España (en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá) y no existía la posibilidad de verificar y enriquecer las bases de datos geográficos disponibles.

### ***Sobre la equidad espacial***

Los modelos de localización asignación utilizados en el planteamiento metodológico no permitieron valorar la equidad espacial. En este sentido se planteó la necesidad de buscar soluciones más equitativas incluyendo el análisis del volumen de generación de residuos peligrosos por zona industrial.

## APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN A LA ZONA PONIENTE DEL ESTADO DE MÉXICO

Una vez concluido el trabajo de tesis doctoral se planteó la posibilidad de continuar explorando en torno a la metodología de localización de un CIMARI en México. Así se desarrolló el proyecto de investigación *"Sistema de Información Geográfica para la Localización y Gestión de Residuos Peligrosos"*<sup>1</sup>. Dicho proyecto

buscaba resolver algunos problemas metodológicos, sobre todo en lo relacionado con la aplicabilidad de la normativa vigente (Franco, 2000). Para ello se definió una zona de estudio más amplia que comprende los 65 municipios de la Zona Poniente del Estado de México (figura 4).

La Zona Poniente del Estado de México se localiza al oeste de la Ciudad de México, se extiende sobre casi 19 mil km<sup>2</sup> y presenta una importante actividad manufacturera lo que repercute significativamente en la generación de residuos industriales peligrosos.

La localización asignación de un CIMARI en la ZPEM partió de considerar las mismas

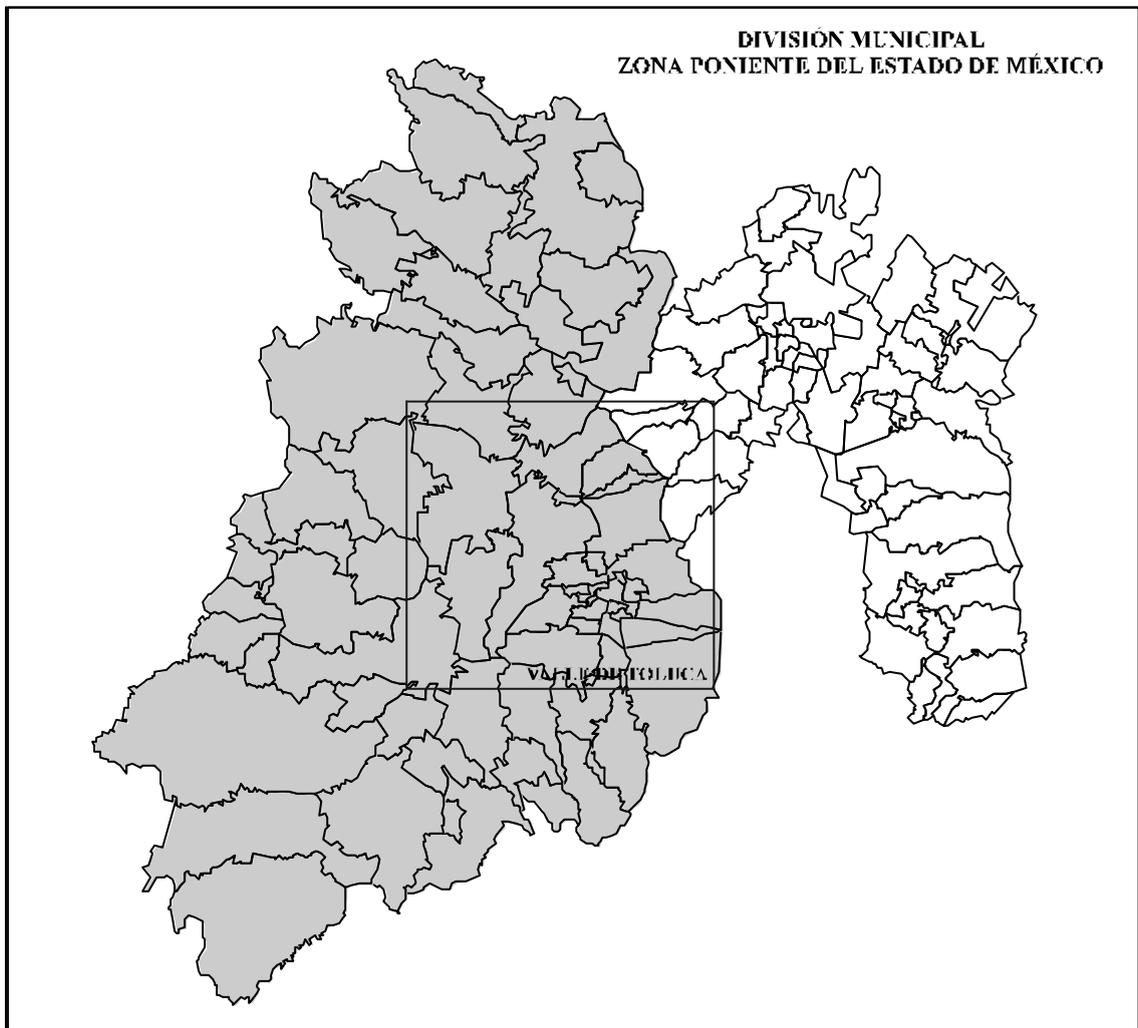


Figura 4. Zona Poniente del Estado de México

1 El proyecto *"Sistema de Información Geográfica para la Localización y Gestión de Residuos Peligrosos"*, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), fue realizado como parte de las actividades como Investigador del Centro de investigación y Estudios en Planeación Territorial (CEPlaT) de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la UAEM.

etapas de la metodología utilizadas en el Valle de Toluca (figura 1). Se trataba, sin embargo, de enriquecer la evaluación incorporando nuevas variables y procedimientos de análisis. Dentro de los principales ajustes realizados al planteamiento original destacan:

## **Etapas I. Obtención de sitios candidatos (ZPEM)**

### **Restricciones normativas**

Se retomaron las principales restricciones establecidas en la norma ecológica NOM-055-ECOL/1993 que, como se ha mencionado previamente, mantienen su vigencia en materia de localización de confinamientos de residuos en México. Dada la disponibilidad de información más detallada y actualizada, fue posible mejorar sustancialmente la caracterización de los criterios restrictivos, sobre todo en lo referente a la distribución de la infraestructura regional y a la proximidad a las localidades urbanas.

### **Factores de adecuación**

La obtención del nivel de adecuación de los sitios candidatos partió de considerar cinco factores. Así, además de incluir los factores de permeabilidad, proximidad a la población y accesibilidad a generadores de residuos, se incluyeron dos factores adicionales: textura del suelo [que incide en la capacidad portante del suelo] y ocupación del suelo.

El mapa factor de textura del suelo, se obtuvo a partir del mapa edafológico estatal mediante la asesoría de la Mtra. Patricia Mireles, profesora de edafología de la Facultad de Geografía de la UAEM. El mapa factor de ocupación del suelo se obtuvo mediante la construcción de una matriz de comparación entre pares considerando 10 categorías de ocupación. En este caso se recurrió al consejo experto de la Mtra. Ma. Eugenia Valdez, profesora de cartografía de la Facultad de Geografía de la UAEM.

## **Determinación de alternativas de localización**

La determinación de sitios candidatos se realizó mediante la aplicación de la sumatoria lineal, considerando cinco factores de adecuación y nueve restricciones normativas. Se optó por un escenario con pesos iguales para los cinco factores, es decir,  $W_a = W_b = W_c = W_d = W_e = 0.2$ .

La aplicación del procedimiento de parcelación por intervalos permitió obtener un conjunto de 16 parcelas adecuadas, con una superficie superior a 400 ha y con un nivel de adecuación superior a 90.

## **Etapas II. Aplicación de Modelos de Localización Asignación (ZPEM)**

Como se ha mencionado previamente, la equidad espacial es uno de los aspectos fundamentales a considerar en la localización de un CIMARI. Así, se planteó la posibilidad de aplicar modelos de localización-asignación que consideraran la generación de residuos peligrosos en las principales zonas industriales como una forma de encontrar soluciones más equitativas.

Dada la carencia de información sobre la cantidad y el tipo de residuos peligrosos que se derivan de la actividad industrial en la región, se aplicó una metodología de estimación basada en el personal ocupado por rama de actividad. Con base en algunos reportes semestrales de generación de residuos peligrosos y a partir de información estadística sobre la actividad manufacturera regional, se obtuvo el índice de generación de residuos peligrosos por empleado y rama de actividad. Dicho índice fue entonces aplicado al total de establecimientos de las principales zonas industriales de la región, con lo que se estimó el estimado total de residuos peligrosos por zona industrial y subsector de actividad.

La aplicación de los modelos de localización-asignación tomó como punto de partida los 16 sitios candidatos para la construcción del CIMARI y las ocho zonas industriales más importantes de la ZPEM (figura 5).

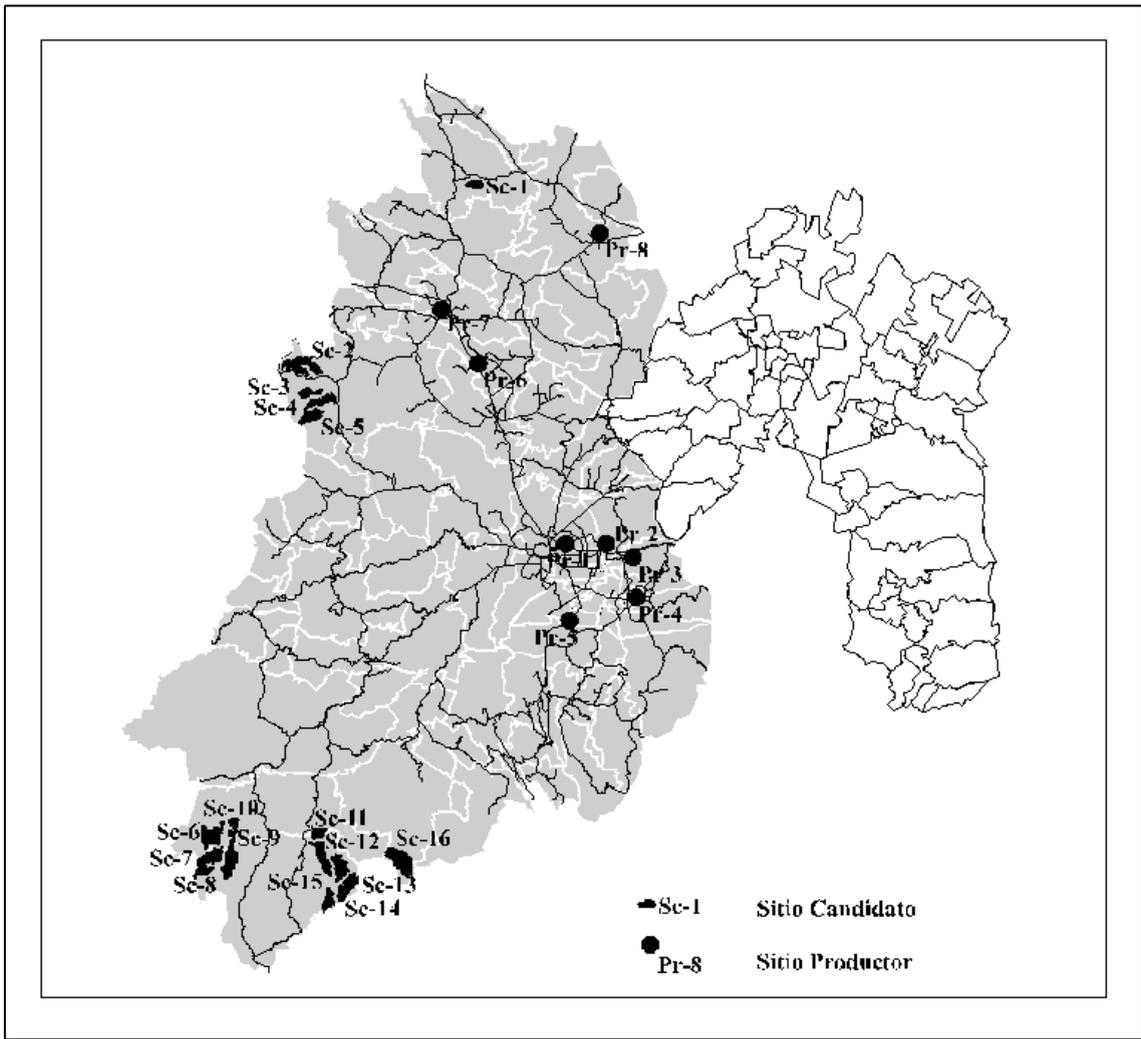


Figura 5. Distribución de sitios candidatos y sitios generadores de residuos en la ZPEM (Franco 2000)

Para la aplicación de modelos de localización-asignación se consideraron cuatro objetivos de valoración:

- la maximización de la distancia entre la población y los sitios candidatos.
- la minimización de la distancia entre generadores de residuos y sitios candidatos.
- la valoración comparativa entre pares de sitios candidatos.
- la valoración simultánea de tres sitios candidatos.

Además de aplicar el programa MAXIM\_S desarrollado por Francesco dal Pozzo, se aplicaron algunos modelos que consideran la capacidad de gestión de residuos y/o la cantidad de residuos generados en las principales zonas industriales de la región.

Dentro de estos modelos se pueden mencionar:

- Modelo maxisum considerando como medida de proximidad la fuerza de repulsión entre cada sitio candidato (dependiendo de su capacidad de gestión de residuos) y todas las localidades (dependiendo de su población).
- Modelo maxisum considerando la suma de distancias entre cada sitio candidato y los sitios generadores de residuos (la distancia fue ponderada por la cantidad de residuos [en piezas, m<sup>3</sup> y toneladas] que cada sitio genera).
- Modelo maxisum considerando como medida de proximidad la fuerza de atracción entre cada sitio candidato (dependiendo de su capacidad de

gestión de residuos) y todos los sitios generadores de residuos (dependiendo de la cantidad generada de residuos en toneladas).

- Modelo maxisum considerando tres sitios candidatos y aplicando como medida de proximidad la fuerza de repulsión entre cada sitio candidato (dependiendo de su capacidad de gestión de residuos) y las localidades (dependiendo de su población).
- Modelo maxisum considerando tres sitios candidatos y aplicando como medida de proximidad la fuerza de atracción de los sitios candidatos en función de la proximidad a los sitios generadores de residuos.

La aplicación de los modelos de localización-asignación nos permitió obtener, para cada una de las 16 alternativas de localización, diez valoraciones, cuatro relativas a la proximidad a la población y seis referentes a la proximidad con los generadores de residuos. Estos valores fueron utilizados posteriormente en la evaluación final de alternativas.

Adicionalmente, la aplicación del modelo maxisum para la valoración de pares y tercias de sitios candidatos, permitió obtener soluciones más equitativas.

### Etapa III. Evaluación de Rutas para el Transporte de Residuos (ZPEM)

La evaluación de rutas para el transporte de los residuos peligrosos en el poniente del Estado de México siguió un procedimiento similar al aplicado en el Valle de Toluca. La posibilidad de realizar un amplio recorrido de campo permitió, sin embargo, introducir dos criterios adicionales para caracterizar el sistema carretero. En el caso de la evaluación del riesgo se consideró, además de la Población Afectada y el Tránsito Diario Promedio Anual, la Sinuosidad de cada arista de la red. En lo que respecta a la evaluación de la eficiencia, ésta incluyó la Longitud, el Número de Carriles y el Estado de conservación de cada tramo.

Obtenida la base cartográfica con la distribución del sistema regional de comunicaciones e integrada la base de datos de la información temática de los seis

criterios considerados, se aplicó el ROUTE incluido en el módulo *Network Analysis* del ARC/VIEW. De esta manera fue posible obtener la ruta más eficiente y de menor riesgo entre cada zona generadora de residuos y cada alternativa de localización.

En este punto lo que nos interesaba era valorar cada sitio candidato en función de sus rutas hacia cada zona generadora de residuos. Para ello se obtuvo la relación riesgo/eficiencia de cada alternativa de localización respecto a las ocho zonas industriales y, finalmente, se evaluó cada alternativa de localización en función de las ocho relaciones previamente calculadas, utilizando para ello el análisis de proximidad al punto ideal (Franco, 2000: 146). Dicha valoración nos indica, para cada sitio candidato, la relación global de riesgo/eficiencia respecto a las 8 principales zonas industriales.

### Etapa IV. Evaluación Final de Alternativas (ZPEM)

Con base en experiencias previas de investigación, se optó por la aplicación de las técnicas de Evaluación Multicriterio Discreta (EMD) y, en particular, los métodos de evaluación de la suma ponderada y el análisis de la distancia a la alternativa ideal.

#### La matriz de decisión

La matriz de decisión incluyó un conjunto de valoraciones obtenidas a lo largo de la investigación:

**criterios:**

- a** Nivel medio de adecuación de la parcela (*a*).
- b** Análisis de la relación riesgo/eficiencia de las rutas para el transporte de residuos.
- c** Distancia maximin entre sitios candidatos y la localidad más cercana
- d** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las localidades [ponderada por la población de cada localidad].
- e** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las localidades [sin ponderar por la población de cada localidad].
- f** Distancia maxisum considerando la

fuerza de repulsión entre cada sitio candidato [dependiendo de su capacidad de gestión de residuos] y todas las localidades [dependiendo de su población].

- g** Distancia maximin entre sitios candidatos y la zona generadora de residuos más cercana.
- h** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las zonas generadoras de residuos [sin ponderar por la generación de residuos]
- i** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las zonas generadoras de residuos [ponderada por la generación de residuos en m<sup>3</sup>]
- j** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las zonas generadoras de residuos [ponderada por la generación de residuos en toneladas]
- k** Distancia maxisum entre sitios candidatos y las zonas generadoras de residuos [ponderada por la generación de residuos en piezas]
- l** Distancia maxisum considerando la fuerza de atracción entre sitios candidatos [dependiendo de su capacidad de gestión de residuos] y las zonas generadoras de residuos [dependiendo de la cantidad de residuos que genera en toneladas]

## Definición de pesos

Una vez obtenida la matriz de decisión de valores normalizados, fue necesario establecer un vector de pesos que permitiera modelar las preferencias del gestor. En este punto se optó por definir cuatro escenarios de ponderación en función de cuatro aspectos fundamentales: a) nivel de adecuación; b) rutas para el transporte de residuos; c) exposición a la población y; d) proximidad con los generadores de residuos. Estos escenarios son:

- Escenario 1 relación igualitaria entre los criterios (a = b = c = d)
- Escenario 2 priorizando el nivel de adecuación (a > b > c > d)
- Escenario 3 priorizando la población expuesta (c > a = b > d)
- Escenario 4 priorizando la proximidad con los generadores de residuos (d > a = c > b)

Así, mediante el procedimiento de tasación simple en función del preorden de los criterios, se definió un vector de pesos para cada escenario.

De esta manera se construyó la matriz de decisión con valores sin normalizar (tabla 4).

a	CRITERIOS DE EVALUACIÓN (j)											
	a	B	c	d	e	F	g	h	i	j	k	l
1	148.49	0.6898	1.1223	253005718	333493	44011503.91	32.39	602.26	7.76	1.14	1.20	0.00002549
2	92.03	0.2178	0.6318	211063538	259276	23502459.65	36.06	598.87	8.3	1.4	1.13	0.00002983
3	137.65	0.2110	1.2438	194879658	241454	20553879.34	36.13	562.59	7.94	1.35	1.06	0.00003497
4	132.87	0.2027	1.2438	186761499	233740	19523935.66	35.26	541.19	7.69	1.31	1.01	0.00003844
5	132.87	0.2252	0.6842	187293618	232144	18807136.56	38.36	549.51	7.89	1.35	1.05	0.00003770
6	127.29	0.7753	0.6765	315044467	308715	21888105.72	98.74	990.18	16.15	2.76	2.73	0.00001389
7	130.78	0.8507	0.7337	322167401	316760	22949507.33	99.93	1008.96	16.5	2.82	2.80	0.00001341
8	110.94	0.8593	1.2592	338333841	334114	25207851.62	105.45	1053.37	17.19	2.93	2.92	0.00001216
9	126.40	0.7889	0.4189	320936394	316135	22896462.41	98.6	1004.67	16.48	2.82	2.81	0.00001361
10	136.83	0.7287	0.6874	306333277	300215	20869564.64	94.76	965.38	15.82	2.71	2.68	0.00001481
11	133.32	0.5732	0.6139	273364011	273875	17749601.23	78.58	865.82	14.49	2.5	2.48	0.00001967
12	119.54	0.6245	0.9706	282048714	283946	18928990.56	80.43	887.92	14.88	2.56	2.56	0.00001865
13	139.68	0.7842	0.5971	283734262	288935	19516437.31	79.28	888.38	14.95	2.57	2.58	0.00001880
14	134.47	0.8338	0.9397	288498484	296341	20416157.51	79.63	898.14	15.15	2.61	2.63	0.00001844
15	137.40	0.8269	1.1032	309056633	314620	22712307.60	87.7	958.34	16.05	2.75	2.78	0.00001575
16	141.74	0.9979	1.3545	263514369	278569	18396437.15	68.36	819.49	14.03	2.42	2.44	0.00002328

Tabla 4. Matriz de decisión sin normalizar

## Aplicación de los métodos de evaluación multicriterio

Se aplicaron los métodos de la suma ponderada y el análisis de la distancia a la alternativa ideal, para los cuatro escenarios de ponderación. Ello permitió definir el orden de las alternativas de elección de acuerdo a cada método y a cada escenario (tabla 5):

Orden	Suma Ponderada				Distancia al punto ideal			
	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
	$a_i$				$a_i$			
1	4	3	3	4	3	3	3	3
2	3	4	4	3	2	2	2	2
3	5	5	1	1	4	4	4	4
4	1	1	5	5	5	5	5	5
5	2	2	2	2	11	11	11	11
6	16	16	15	16	12	12	12	12
7	15	15	16	15	1	1	1	1
8	11	11	8	14	10	10	10	10
9	14	13	14	11	13	6	6	13
10	13	10	10	13	6	13	13	14
11	10	14	7	12	9	9	15	6
12	12	7	12	10	15	15	14	15
13	7	6	6	7	14	14	9	9
14	6	12	11	6	7	7	7	7
15	8	9	13	8	8	8	8	8
16	9	8	9	9	16	16	16	16

Tabla 5. Orden de las alternativas de acuerdo a la suma ponderada y la distancia al punto ideal

## Selección de alternativas de localización

Los resultados obtenidos a lo largo de la investigación expresan, por sí solos, una serie de valoraciones de carácter ambiental, social y económico. Dentro de las distintas soluciones analizadas destacan tres alternativas que se aproximan al óptimo deseado y que servirían como base para estudios más detallados.

La alternativa 3 resulta la mejor valorada tomando en consideración la posibilidad de localizar una sola instalación. Se trata de una parcela de 492 ha. que se extiende sobre una zona de baja permeabilidad cubierta por pastizales inducidos y que se ajusta mejor a los criterios ambientales y socioeconómicos propuestos.

La aplicación del modelo *maxisum justo* permitió identificar la combinación 1, 8 como la de mayor equidad. Esta combinación

presentó la menor distancia respecto al punto ideal, considerando la relación entre sitios candidatos, la población y los generadores de residuos.

En cuanto a la posibilidad de localizar tres instalaciones, la combinación mejor valorada corresponde a los sitios candidatos 1, 4 y 8, con una capacidad de gestión de residuos de 10000, 50000 y 10000 toneladas

anuales respectivamente. Desde el punto de vista de la distribución espacial de las alternativas de localización, la alternativa 4 presenta la mayor eficiencia respecto a los principales generadores de residuos y, por tanto, debe recibir la mayor capacidad de gestión de residuos [50000 toneladas]. Las alternativas 1 y 8, por su parte, contribuyen a reducir los efectos negativos de la alternativa 4 pero, dada su lejanía de los centros generadores, deben tener una menor capacidad de gestión de residuos [10000 toneladas].

## TRASCENDENCIA DE LAS INVESTIGACIONES

A lo largo del presente trabajo se delinear los principales aspectos de nuestra propuesta metodológica para la localización-asignación de un CIMARI en el Estado de México. Dicha propuesta se basa en la

aplicación de un Sistema de Información Geográfica, como herramienta que permite el manejo integrado de múltiples procedimientos de análisis. Una revisión de algunos proyectos realizados en México, nos ha permitido comprobar que no existe una propuesta que aborde el problema con la misma complejidad expuesta en este trabajo. Resulta importante mencionar que, si bien es cierto que la investigación ha tenido un importante impacto en el ámbito académico, su trascendencia en el ámbito gubernamental ha sido limitada.

## Impacto en el ámbito académico

El trabajo realizado durante los pasados cinco años ha tenido logros académicos significativos. El más importante ha sido, sin lugar a dudas la elaboración del trabajo de tesis doctoral bajo la dirección del Dr. Joaquín Bosque Sendra, y la obtención del grado de Doctor en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá. El proyecto de investigación de la ZPEM, por su parte, permitió importantes avances metodológicos respecto al trabajo original en el Valle de Toluca. El informe final de dicho proyecto recibió un dictamen muy favorable por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México y de la Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados de la UAEM. Adicionalmente, la activa participación en el proyecto de tres alumnos de la carrera en Planeación Territorial, enriqueció significativamente algunos aspectos de la investigación al tiempo que les permitió la elaboración de sus tesis de licenciatura.

Como parte importante de nuestros esfuerzos, se encuentra la difusión académica de la obra. Para ello hemos buscado su publicación en distintos medios y se ha participado en eventos nacionales e internacionales. Destaca la participación en la VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica celebrada en la ciudad de Mérida, Venezuela y el IX Simposio Latinoamericano de Percepción Remota que tuvo lugar en Puerto de Iguazú, Argentina. Es importante destacar que, al momento de escribir este artículo, se encuentra en preparación un cuaderno de investigación en el que se publicarán los principales resultados del proyecto.

## Impacto en el ámbito gubernamental

Concluida la investigación y conscientes de la importancia de dar a conocer nuestra propuesta metodológica, se ha intentado su difusión en los organismos gubernamentales relacionados con los residuos peligrosos en el Estado de México. En este sentido existen dos dependencias importantes, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México.

La SEMARNAT es la instancia federal encargada de dar seguimiento a la problemática de los residuos peligrosos en el país y, por consiguiente, es el organismo que promueve la construcción de confinamientos de residuos peligrosos en el territorio nacional. Así, el Instituto Nacional de Ecología (INE), organismo vinculado a la SEMARNAT, publicó en 1996 una lista de sitios candidatos para la construcción de un Centro Integral de Manejo y Aprovechamiento de Residuos Industriales (CIMARI) en la zona centro del país. De los 87 sitios recomendados, 11 se localizan en el extremo sur oeste del Estado de México. La ubicación de dichos sitios guarda cierta coincidencia con nuestras propuestas de localización. Existen, sin embargo, diferencias importantes entre ambos trabajos. La escasez y pobre resolución de la información geográfica utilizada y la ausencia de procedimientos que integren la evaluación del riesgo, la eficiencia y la equidad, son limitantes importantes de la propuesta gubernamental. En este sentido, nuestros esfuerzos han estado encaminados para que los especialistas del INE conozcan y apliquen nuestras propuestas.

La Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México es el organismo estatal encargado de dar seguimiento a los problemas ambientales y día con día, adquiere mayores competencias en relación con la gestión de los residuos peligrosos en la entidad. Dicho organismo convocó, a fines del año 2000 al Primer Concurso Estatal de Proyectos Ambientales de Instituciones de Educación Superior. Nuestro proyecto de investigación obtuvo el segundo lugar, lo que significó, además del reconocimiento público de la obra, la posibilidad de darle una mayor difusión en el gobierno estatal. Ello nos abrió nuevas posibilidades y nos condujo hacia la problemática de los

Residuos Sólidos Urbanos en la entidad. Así, la Secretaría de Ecología ha solicitado nuestra asesoría para desarrollar una metodología para definir Centros de Acopio y Transferencia de Residuos Sólidos Urbanos en diversas regiones del Estado de México. Asimismo, se ha venido trabajando en la evaluación de alternativas para la localización de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Toluca.

Consideramos que, en este sentido, el trabajo iniciado hace algunos años en la Universidad de Alcalá apenas comienza a rendir frutos. Trascender lo académico, llevando nuestras propuestas al ámbito de los gestores, es una tarea difícil, pero indispensable.

---

## BIBLIOGRAFÍA

Barba-Romero, S. y Pomerol, J. CH. (1997): *Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica*, Colección de Economía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.

Barredo, C. J. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, RA-MA, Madrid.

Bosque, S. J. y Franco, M. S. (1995): "Modelos de Localización-Asignación y Evaluación Multicriterio para la localización de instalaciones no deseables", *Serie Geográfica*, No. 5. Departamento de Geografía, Univ. de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 97-112.

Franco, M. S. (1999): *Metodología para la Localización de Centros Integrales para la Gestión de Desechos Industriales Peligrosos. El caso del Valle de Toluca*, Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.

Franco, M. S. (2000): *Sistema de Información Geográfica para la Localización y Gestión de Residuos Peligrosos*, Reporte Académico de Investigación, CGYEA-UAEM, Toluca, México (Inédito).

Franco, M. S. y Bosque, S. J. (1999): "Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster" *Memorias de la I Reunión de Usuarios del Programa IDRISI 1997*, Univ. de Alcalá de Henares, España.

Jankowski, P. y Richard, L. (1994): "Integration of GIS-based Suitability Analysis and Multicriteria Evaluation in a Spatial Decision Support System for Route Selection", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 21, pp. 323-340.

Secretaría de Gobernación (SG) (1993): "Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL/1993 que establece los requisitos que deberán reunir los sitios destinados al Confinamiento Controlado de Residuos Peligrosos, excepto de los radiactivos", *Diario Oficial de la Federación (22/10/1993)*, Poder Ejecutivo Federal, México, D. F.

(SG) (1996): "Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL/1996 que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado y a la instalación de centros integrales para el manejo de residuos industriales peligrosos", *Diario Oficial de la Federación (11/11/1996)*, Poder Ejecutivo Federal, México, D. F.