LOCALIZACIÓN DE INCINERADORAS DE MATERIALES ESPECÍFICOS DE RIESGO EN ANDALUCÍA MEDIANTE UN ENFOQUE MULTICRITERIO.

Flor Guerrero Casas

Concepción Paralera Morales

Manuela Segovia González

Departamento de Economía y Empresa

Universidad Pablo de Olavide

e-mail: fguecas@dee.upo.es, cparmor@dee.upo.es, mmseggon@dee.upo.es

Rafael Caballero Fernández

Mercedes González Lozano

Julián Molina Luque

Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas)

Universidad de Málaga

e-mail: rafael.caballero@uma.es, m_gonzalez@uma.es, julian.molina@uma.es

Resumen

La problemática enfrentada en este trabajo es la localización de una incineradora de residuos sólidos animales entre 5 lugares preestablecidos de Andalucía.

A dicha incineradora llegarían los deshechos semanales de 161 mataderos recogidos mediante camiones de forma que cada camión partiría de cada matadero hacia la incineradora elegida.

En cuanto a los criterios utilizados para elegir la localización tenemos criterios económicos como el coste de instalación de la incineradora, el de mantenimiento y el de transporte junto con el rechazo social de los distintos pueblos por donde pasarían los camiones en sus rutas, el riesgo máximo y la desutilidad de las poblaciones cercanas a la incineradora.

Palabras clave: Residuos M.E.R., Localización, Multicriterio.

1. Introducción.

En los últimos años, el interés por analizar los efectos derivados de la contaminación por residuos y el estudio de las medidas que deben adoptarse para tratarlos se ha visto incrementado. Se tiende hacia nuevos hábitos de consumo que a su vez inducen la necesidad de producir alimentos a gran escala. La transformación de estos alimentos han impulsado el desarrollo de unas actividades industriales que dan lugar a una cantidad importante de residuos, entre los cuales se encuentran los aquí tratados (**M**ateriales **E**specíficos de **R**iesgo).

Una muestra de la preocupación que provoca estos temas es la aplicación de normativas establecidas en los países industrializados con el objetivo de proteger el medio natural y reducir el daño ecológico y personal que pueden ocasionar ciertos procesos. Parte de esta legislación medio ambiental se refiere al transporte y depósito, transformación o eliminación de los residuos, considerándose como un caso particular la gestión de los desechos procedentes de la Enfermedad Espongiforme transmisible (EET) en la Comunidad Europea.

En la mayoría de actividades ganaderas y explotaciones, se generan restos de animales como consecuencia de las bajas que se producen en la cabaña. Estos restos no se pueden gestionar ni como urbanos ni como peligrosos, por lo que los productores se ven en la situación de falta de servicios en la eliminación de los mismos. Para una correcta gestión de las explotaciones se deben eliminar estos restos de manera que no sean un foco de infección y puedan transmitirse enfermedades al resto de los animales y a las personas.

Con la entrada en vigor del Real Decreto 3454/2000 (B.O.E. de 22 de diciembre de 2000) "Plan Integral coordinado de vigilancia y control de las encefalopatías espongiformes transmisibles de los animales" se regula la destrucción de los M.E.R. y el R.D. 1911/2000 de 24 de noviembre establece la eliminación de determinados órganos y tejidos de los animales de la especie bovina, ovina y caprina. Posteriormente el R.D. 221/2001 de 2 de marzo modifica el R.D. 1911/2000

ampliando los residuos M.E.R siguiendo las directrices que emanan de la comisión Europea. La destrucción de los materiales específicos de riesgo según el R.D. 1911/2000 se deberá realizar mediante incineración llevándose a cabo con las exigencias establecidas en la legislación sobre residuos. La eliminación de los restos por medio de incineración se considera como la más factible, económica y viable.

Las operaciones realizadas con estos residuos llevan asociadas un riesgo cuya incorporación en los modelos de transporte y localización se ha realizado de formas diversas. El riesgo percibido aparece en la bibliografía de localización y rutas definido de varias formas: según Erkut y Verter (1995, 1997) como el riesgo individual multiplicado por una potencia de la población, donde el riesgo individual puede venir expresado en función de las probabilidades de incidente y sus consecuencias; según Giannikos (1998) como la cantidad de producto transportada por el núcleo de población o de alguna otra manera. Por otra parte, también debemos tener en cuenta, en este tipo de problemática, criterios de equidad, entendiendo por ella la distribución del daño entre la población afectada de forma igualitaria (Marsh y Schilling, 1993).

A la hora de considerar las posibles localizaciones para los nuevos centros de tratamientos hemos de conjugar distintos criterios. Por una parte, minimizar costes de instalación y de transporte y por otra parte es preciso controlar el rechazo social, objetivos claramente en conflicto, de lo que se deduce la naturaleza multiobjetivo del problema.

Actualmente la presión social y las fuertes sanciones de la Administración han logrado que la mayoría de los industriales hayan optado por resolver el problema. En la Comunidad Andaluza todos los residuos M.E.R. que se producen tienen que ser tratados fuera de ella, por no existir centros de tratamiento específicos. Es por ello por lo que se plantea un modelo que sirva como iniciativa al problema existente, debiéndose hacer más detallado en el futuro.

Como objetivos del modelo, planteamos minimizar el coste total de la operación que desglosaríamos en el coste de instalación de incineradoras dependiendo del tamaño,

el coste de tratamiento de los residuos, el coste de la inversión y el coste de transporte; minimizar el rechazo social, distinguiendo, por un lado, el correspondiente a las poblaciones por donde pasan los camiones en su ruta hacia la incineradora, el cual se obtiene multiplicando el número de camiones que pasan a través de un centro de población por el número de habitantes del mismo y, por otro lado, el rechazo de las poblaciones cercanas a la incineradora el cual es una función creciente del tamaño del centro que se desea instalar y decreciente de la distancia del centro a la población correspondiente. Consideramos que las localizaciones de los centros de tratamiento no pueden estar en ningún núcleo de población. Para ello fijaremos un umbral inferior, de forma que ningún centro pueda estar a menos distancia de la población que dicho umbral y otro superior, entendiendo que si una población está a una distancia superior a dicho umbral, ese aspecto de rechazo social no se considera.

Además como medida de equidad se minimiza el rechazo social máximo el cual, como su nombre indica, corresponde a aquella población que se ve más afectada por el transporte de los residuos para su quema posterior.

2. Planteamiento del problema.

Conjuntos

I: *n* centros generadores de residuos MER (Mataderos).
J: conjunto de *s* localizaciones candidatas para la instalación de incineradoras.
H: conjunto de *q* centros de población.

Variables

$$y_j = \begin{cases} 1 & \textit{si se instala una incineradora en la localización } j \in J. \\ 0 & \textit{en caso contrario.} \end{cases}$$

x_{ij}: cantidad de residuos MER transportados desde *i* a *j*, $\forall\, i \in I, \forall\, j \in J$.

X_j: cantidad de residuos incinerados en $j \in J$.

Parámetros

γ :capacidad de la nueva incineradora.

δ_{ij} : distancia en la red desde i a j, $i \in I$, $j \in J$.

α_j :coste fijo de instalar una incineradora en la localización j, $j \in J$.

v_j :coste de mantenimiento de una incineradora en la localización j, $j \in J$.

τ_i :cantidad de residuo generado en $i \in I$ a la semana.

η_j :incremento de coste por cada unidad que se quema en el centro j, $j \in J$.

c: coste imputado por kilómetro recorrido.

r_{ij} : número de camiones que parten del matadero i a la incineradora j a la semana (en la aplicación del modelo se ha considerado que parte un único camión de cada matadero a la incineradora elegida).

ω_h :número de habitantes en $h \in H$.

θ_1, θ_2 : parámetros utilizados en la desutilidad.

Los costes de instalación se han dividido por 15 años de duración de la incineradora. El resto de los costes se han calculado semanalmente.

Objetivos.

- Minimizar el coste total de la operación.

$$Min \sum_{j=1}^{s} \alpha_j y_j$$

- Minimizar el coste de mantenimiento.

$$Min \sum_{j=1}^{s} v_j y_j$$

- Minimizar el coste de transporte

$$Min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{s} cr_{ij} \delta_{ij} y_j$$

– Minimizar el rechazo social

$$Min \sum_{h\in H}\sum_{j\in J} w_h R_{hj} y_j$$

donde R_{hj} es el riesgo individual medido por el número de camiones que pasan por la población h en su camino hacia la incineradora j.

– Criterio de distribución del riesgo (minimizar el riesgo máximo).

$$Min \;\; Max \sum_{j\in J} w_h R_{hj} y_j$$

– Minimizar la desutilidad colectiva.

$$Min \sum_{h\in H} w_h E_h$$

$$E_h = \sum_{j\in J} \frac{g y_j}{d_{hj}}, \quad q_1 \le d_{hj} \le q_2$$

Restricciones.

1. Se instala una única incineradora entre las posibles localizaciones.

$$\sum_{j=1}^{s} y_j = 1$$

2. La cantidad de residuos MER incinerados en la localización j no puede exceder a su capacidad.

$$X_j \le g\, y_j, \quad \forall j \in J$$

3. La cantidad de residuos incinerados en j es igual a las cantidades de residuos que llegan a j.

$$X_j = \sum_{i\in I} x_{ij}, \quad \forall j \in J$$

4. Todos los residuos que se generan en los mataderos deben ser incinerados.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = \boldsymbol{t}_i, \quad \forall i \in I$$

5. La incineradora situada en la localización j tiene que estar al menos a una distancia $\boldsymbol{q}_1$ del núcleo de población.

$$\boldsymbol{d}_{hj} \geq \boldsymbol{q}_1$$

6. Condiciones de no negatividad.

$$X_j \geq 0, \forall j \in J$$
$$x_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J$$

7. Las variables y_j son dicotómicas.

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

3. Aplicación del modelo.

La propuesta que inicialmente se podría hacer de instalación de una incineradora debe llevar un respaldo científico sobre el razonamiento de la ubicación de una o varias en Andalucía, teniendo en cuenta los factores que pueden influir en la decisión. Así pues, nos encontramos con un problema de localización que se podría resolver a través de la programación multicriterio, puesto que existen distintos objetivos a considerar y a veces son objetivos que están claramente en conflicto.

Dado que en Andalucía no existen centros específicos de tratamiento para los residuos M.E.R, se presenta un problema con 161 centros generadores de residuos, correspondientes a los mataderos existentes en Andalucía y se pretende instalar una incineradora de residuos M.E.R., de una capacidad determinada, considerando cinco localizaciones preestablecidas; Alcalá la Real, Alquife, Antequera, Aznalcóllar y Olvera.

Se ha elegido Antequera por ser el centro geográfico de Andalucía, Aznalcóllar (uno de los municipios del Corredor Verde), por ser una población en la que se ha producido un gran número de desempleados, en su mayor parte transportistas y reparadores de maquinaria, debido al cierre de la mina. Alquife por una situación similar. Olvera y Alcalá la Real por su situación de proximidad entre varias provincias andaluzas.

En cuanto a los criterios utilizados para elegir la localización tenemos criterios económicos como el coste de instalación de la incineradora, el de mantenimiento y el de transporte junto con el rechazo social de los distintos pueblos por donde pasarían los camiones en sus rutas, el riesgo máximo como criterio de equidad y la desutilidad de las poblaciones cercanas a la incineradora.

En cuanto al cálculo realizado para obtener estos cinco criterios podemos indicar lo siguiente:

- Coste de la Instalación

Para cada posible ubicación se han considerado los costes de instalación de una incineradora, para ello se ha tenido en cuenta, el coste de la parcela donde se va a ubicar la incineradora y el coste del terreno exterior, el coste de la construcción de la planta incineradora, el de la incineradora y de su transporte hasta la posible ubicación. Además se han incluido los costes correspondientes a mobiliario, material y cámaras frigoríficas necesarias para el correcto funcionamiento de la planta, sin olvidar los costes correspondientes a los gastos facultativos y de licencia.

- Coste de Mantenimiento

En él están recogido los gastos que suponen el mantenimiento de la incineradora (revisiones, piezas, etc.), de la parcela tanto exterior como interior, así como los correspondientes al personal encargado de ella.

- Coste de Transporte

Se ha calculado teniendo en cuenta las distancias de cada uno de los 161 centros generadores de residuos (mataderos) a cada una de las posibles ubicaciones para la planta incineradora, conjuntamente con el número de camiones necesarios para el transporte, que según la cantidad de residuos generados semanalmente en cada uno de los mataderos, se considera sólo uno y el coste imputado por kilómetro recorrido que se fija en 1€/Km. Por consiguiente, en este criterio recogemos el coste que supondría el transporte de los residuos en 161 camiones, uno por cada matadero, en su trayecto desde cada centro generador a cada incineradora.

- Rechazo Social

Para el cálculo del rechazo social se ha considerado los centros de población por los que pasan los resid uos. Se ha medido el número de camiones que pasan por un centro urbano (a la semana) multiplicado el número de habitantes de dicha población. De esa forma obtenemos un valor de rechazo social para cada posible ubicación de la planta incineradora.

- Riesgo Máximo

Con ello pretendemos establecer un criterio de distribución del riesgo. Para determinar cuál es el valor que nos da el riesgo máximo, entre todas las poblaciones por las que se pasa para llegar a la posible localización, se ha tomado aquella que tie ne un mayor rechazo social.

- Desutilidad Colectiva

Hemos fijado un umbral inferior $(q_1 = 2\ Km)$ de forma que ningún centro pueda estar a menos distancia de la población que dicho umbral y otro superior $(q_2 = 5\ Km)$, entendiendo que si una población está a una distancia superior a dicho umbral no se ve afectada. Para cada posible ubicación hemos considerado los núcleos de población afectados por la instalación y hemos calculado el valor de la desutilidad, siendo ésta

una función decreciente en cuanto a la distancia de la incineradora al centro de población y creciente en cuanto al número de habitantes.

Toda esta información se puede ver en la siguiente tabla donde debemos recordar que los costes son semanales y que hemos dividido el coste de instalación entre quince años de duración, periodo que nos parece razonable como vida útil de la incineradora.

	Coste Instalación	Coste Mantenimiento	Coste Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutulidad Colectiva
Aznalcóllar	1541,06	5778,96	30788,40	5232610	1139412	2977
Antequera	1926,32	6356,86	27470,80	2957654	1246832	8087
Alcalá la Real	1772,22	6125,70	30898,80	7563493	2805372	4304
Olvera	1695,16	6010,12	27389,60	4434927	1246832	4738
Alquife	1464,00	5547,80	42263,90	4091317	1246832	3057

Una vez obtenida toda la información necesaria, y dado que en este trabajo tratamos de encontrar la localización de una sola incineradora, observamos que nuestra problemática se convertía en un problema multicriterio discreto con 5 alternativas y 6 criterios cuantitativos, el cual puede ser resuelto mediante diversos enfoques.

En primer lugar aplicamos el método Promethee mediante la utilización del programa Decision Lab. Dicho método no se encuentra exento de la introducción de diversos parámetros de decisión, como son el umbral de indiferencia y de preferencia para cada criterio así como las ponderaciones correspondientes.

Para elegir los umbrales observamos el rango de variación de cada uno de los criterios y elegimos en consecuencia. En cuanto a las ponderaciones dimos más importancia a los criterios económicos que a los demás, en concreto, ponderamos los costes cuatro veces más que el resto de los criterios.

Así los datos utilizados fueron los siguientes:

	Coste Instalación	Coste Mantenimiento	Coste Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutulidad Colectiva
Umbral de indiferencia	200	200	500	500000	300000	200
Umbral de Preferencia	400	400	1000	1500000	700000	1500
Ponderación	0,26	0,26	0,26	0,06	0,06	0,06

Obteniéndose con ellos esta ordenación:

Tras ello, realizamos un análisis de sensibilidad de las ponderaciones para ver hasta cuándo podíamos mover las mismas para mantener la solución anterior. El resultado del mismo aparece en la siguiente tabla:

	Absolute values			Relative values (%)		
	Weight	Min	Max	Weight	Min	Max
C. Instal.	0,2667	0,0000	0,2827	26,67%	0,00%	27,83%
C. Manten.	0,2667	0,0957	0,2747	26,67%	11,55%	27,25%
C. Transp.	0,2667	0,2623	0,4143	26,67%	26,35%	36,10%
Rech. Soc.	0,0667	0,0529	0,1340	6,67%	5,36%	12,56%
Riesg.Max.	0,0667	0,0000	-1,0000	6,67%	0,00%	100,00%
Desutil.	0,0667	0,0000	0,0710	6,67%	0,00%	7,07%

En ella podemos ver como, salvo para el riesgo máximo, pequeñas variaciones en las ponderaciones de los criterios producen cambios en la solución con lo cual nos encontramos con un problema muy sensible a los parámetros decisionales.

Una vez aplicado este método decidimos contrastar los resultados obtenidos mediante la resolución de nuestro problema mediante otro enfoque multicriterio. En concreto, elegimos la filosofía de la teoría de la utilidad multiatributo la cual requiere la transformación de los datos obtenidos para cada uno de los criterios en utilidades para el decisor. Posteriormente, aquella localización con la mayor suma ponderada de las utilidades nos proporcionará la solución requerida.

En la conversión de los datos de nuestro problema en utilidades hemos de tener en cuenta que nuestros objetivos pretenden ser minimizados luego, los valores más bajos representan una mayor utilidad para el decisor. Así, consideramos para todos los criterios que las funciones de utilidad de nuestro decisor eran lineales, teniendo un mínimo en el valor 0 y una máximo en el valor 10, extremos alcanzados en los siguientes valores:

	Valor 0	**Valor 10**
C. Instalación	2000	1000
C. Mantenimiento	6500	5000
C. Transporte	45000	25000
Rechazo Social	8000000	2500000
Riesgo Máximo	3000000	1000000
Desutilidad	8500	2500

El resultado conseguido con estas decisiones aparece en la siguiente tabla:

	Coste Instalación	**Coste Mantenimiento**	**Coste Transporte**	**Rechazo Social**	**Riesgo Máximo**	**Desutilidad Colectiva**	**SUMA PONDERADA**
Aznalcóllar	4,5894	4,80693	7,1058	5,0316181	9,30294	9,205	5,969873
Antequera	0,7368	0,95426	8,7646	9,1679018	8,76584	0,6883	4,029649
Alcalá la Real	2,2778	2,4953	7,0506	0,793649	0,97314	6,993	3,737004
Olvera	3,0484	3,26586	8,8052	6,4819509	8,76584	6,27	5,466377
Alquife	5,36	6,348	1,36805	7,1066963	8,76584	9,0716	5,149893
Ponderaciones	0,26	0,26	0,26	0,06	0,06	0,06	

En ella además de las utilidades, recogemos las ponderaciones de los criterios, las cuales son las mismas que las utilizadas en el método anterior. La última columna recoge la suma ponderada correspondiente a cada localización con lo cual se puede ver que Aznalcóllar resultaría ganadora, seguida por Olvera, Alquife, Antequera, y por último, Alcalá la Real.

Si comparamos esta ordenación con la obtenida en el método anterior vemos que cambian las posiciones primera y segunda puesto que con el Promethee Olvera salía ganadora, pero con una diferencia pequeña con respecto a Aznalcóllar.

Por último, decidimos utilizar la filosofía de la programación por metas para obtener aquella localización que minimiza la suma de las desviaciones sobre la media de cada criterio. Así, tras calcular la media de los valores correspondientes a cada uno de los criterios (la cual jugará la veces de nuestro niveles de aspiración), restamos a cada una de ella los valores correspondientes de cada localización. Si dicha resta resulta negativa significa que nos encontramos por encima de nuestra meta lo cual no es deseable puesto que pretendemos minimizar todos los objetivos. Así, si sumamos, para cada localización, las diferencias que resultan negativas tenemos:

	SUMA DESVIACIONES SOBRE LA MEDIA
Aznalcóllar	376609,80
Antequera	4093,94
Alcalá la Real	3976063,08
Olvera	167,04
Alquife	10501,60

Con lo cual vemos como ahora Olvera, al tener una menor desviación resultaría ganadora, seguida de Antequera, Alquife, Aznalcóllar y Alcalá la Real. Ordenación

diferente a las anteriores puesto que ahora Aznalcóllar ha pasado a ocupar la cuarta posición.

4. Conclusiones.

A lo largo de este trabajo hemos tratado de determinar la mejor localización de una incineradora de residuos sólidos animales, a la que llegarían los deshechos semanales de los 161 mataderos oficiales de Andalucía, recogidos mediante camiones de forma que cada camión partiría de cada matadero hacia la incineradora elegida.
En cuanto a los criterios utilizados para realizar dicha elección tenemos tanto criterios económicos como sociales, lo cual genera un problema multiobjetivo discreto que puede ser resuelto mediante diversos enfoques.

En concreto, en primer lugar, hemos aplicado un método basado en la relación de superación como es el Promethee, el cual requiere la incorporación de diversos parámetros decisionales. En segundo lugar, utilizamos la teoría de la utilidad multiatributo, representante de una filosofía diferente dentro de las técnicas multicriterio. En ella es necesario hablar en términos de utilidad por lo que se requiere la conversión de los datos obtenidos en utilidades para el decisor con la consecuente dificultad que ello conlleva.

Por último, hemos aplicado la filosofía de la programación por metas, más propia de un problema continuo. En ella el decisor debe indicar los niveles de aspiración para cada uno de los criterios de forma que se encuentre satisfecho si se verifican todas sus metas. Evidentemente, de la elección de dichos niveles dependerá la localización obtenida como solución.

Por consiguiente, vemos como nuestro problema puede resolverse según distintos enfoques donde en cada uno de ellos se debe tomar decisiones de las cuales dependen las soluciones obtenidas.

En concreto, dos de los métodos utilizados proponen la misma ubicación para nuestra incineradora: Olvera, aunque no nos podemos olvidar de Aznalcóllar puesto que debido a su proximidad a la comunidad extremeña, esta última población puede

contar con la baza adicional de su utilización para la incineración de los residuos de dicha comunidad.

Bibliografía.

1. Erkut, E. y Neuman, S. (1989): "Analytical Models for Locating Undesirable Facilities", *EJOR*, **40**, pp. 275-291.

2. Erkut, E. y Verter, V. (1995): *Hazardous Materials Logistics.* En *Facility Location. A Survey of Applications and Methods.* Springer, Heidelberg.

3. Erkut. E. y Verter, V. (1997): "Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials". *Operations Research*, **46**, **5**, pp. 625-642.

4. Giannikos, I. (1998): "A Multiobjective Programming Model for Locating Treatment Sites and Routing Hazardous Wastes". *EJOR*, **104**, pp. 333-342.

5. Marsh, M. y Schilling, D.A. (1993): "Equity Measurement in Facility Location Analysis: A review and Framework". *EJOR*, **74**, pp. 1-17.

6. Romero, C. (1993): *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones.* Alianza Universidad Textos. Madrid.

7. Santos, D.R., Suárez-Vega, R. y Dorta, P. (2001): "Un Modelo de Decisión Multicriterio para Localización de Centros de Tratamientos de Residuos". *Estudios de Economía Aplicada*, **17**, pp. 163-182.