

XXIX REUNIÓN DE ESTUDIOS REGIONALES
PROBLEMA MULTIOBJETIVO DE LOCALIZACIÓN DE INCINERADORAS
DE MATERIALES ESPECIFICOS DE RIESGO EN ANDALUCÍA.

Rafael Caballero Fernández

Mercedes González Lozano

Julián Molina Luque

Universidad de Málaga

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

julian.molina@uma.es

Flor M^a Guerrero Casas

Concepción Paralara Morales

Universidad Pablo de Olavide de Sevilla

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

RESUMEN

La problemática que analizamos en este trabajo es la localización de hasta un máximo de dos incineradoras de residuos sólidos animales entre 5 lugares preestablecidos de Andalucía.

Se deben incinerar los deshechos semanales de 161 mataderos los cuales deben ser recogidos mediante camiones, uno por cada matadero, siendo el punto de partida de cada camión, el matadero correspondiente.

En cuanto a los criterios utilizados para elegir las localizaciones tenemos criterios económico, como el coste de instalación de la incineradora, el de mantenimiento y el de transporte, y criterios sociales como 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.

El problema resultante, desde el punto de vista matemático, es multiobjetivo binario. Además, es un problema de rutas con más de 100 nodos, que no es recomendable resolver con el programa CPLEX y es por lo que se utiliza un método metaheurístico, buscando las soluciones eficientes.

Palabras claves: Residuos M.E.R., Localización, Metaheurístico.

1. Introducción

La dimensión actual de las actividades comerciales tanto en el mercado interior como en el internacional han dado lugar, en ocasiones, a la aparición y extensión de riesgos para la salud y la seguridad alimentaria en amplios sectores de la sociedad, con la consiguiente trascendencia social. 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 ha impulsado el desarrollo de unas actividades industriales que dan lugar a una cantidad importante de residuos, entre los cuales se encuentran los aquí tratados (**Materiales Específicos de Riesgo**).

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 en los últimos años.

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.

Según el R. D. 1911/2000 de 24 de noviembre, se regula la destrucción de los materiales específicos de riesgo, que en su artículo 1.2 recoge los tejidos y órganos que se consideran MER de la especie bovina, ovina y caprina. Esto supone un tratamiento específico para la separación y destrucción de los mismos.

Posteriormente, se establece y regula el Programa Integral coordinado de vigilancia y control de las encefalopatías espongiformes transmisibles de los animales (R. D. 3454/2000 de 22 de diciembre), que a su vez comprende cuatro programas de actuación, de vigilancia, control de sustancias empleadas en la alimentación de animales, de inspección de establecimientos de transformación de subproductos y cadáveres y control de MER.

El R. D. 221/2001, de 2 de marzo y el R. D. 100/2003, de 24 de enero, modifican el R. D. 1911/2000 de 24 de noviembre, ampliando los residuos M.E.R siguiendo las directrices que emanan de la Comisión Europea.

El 1 de octubre de 2003, entrará en vigor el Reglamento 1139/2003 por el que la Comisión ha optado, como medida de precaución, añadir el ileon del ganado ovino y caprino de todas las edades a la lista de materiales especificados de riesgoⁱ.

La eliminación de los MER pretende la destrucción total de los tejidos de mayor riesgo para evitar cualquier paso a la cadena alimentaria humana y/o animal, pero su destrucción es costosa. Según el R.D. 1911/2000 la destrucción de los materiales específicos de riesgo se deberá realizar mediante incineración llevándose a cabo con las exigencias establecidas en la legislación sobre residuos. Además 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 producían tenían que ser tratados fuera de ella, por no existir centros de tratamiento específicos. Actualmente existen dos plantas de transformación (no incineradora) de los M.E.R a otros productos, que posteriormente tienen que ser incinerados en su mayoría, destinándose otra parte a combustible.

La producción anual de dichos residuos en Andalucía es bastante elevada, la mayoría correspondiente a ganado bovino, y en su mayor parte se localizan en Sevilla, Cádiz y Málaga.

Planteamos un modelo que nos permite localizar hasta un máximo de dos plantas incineradoras de residuos sólidos animales entre cinco lugares preestablecidos en la Comunidad Andaluza.

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. Se considera que la localización del centro de tratamiento se sitúa a una distancia de 5 Km de la población y además fijaremos un umbral superior, entendiendo que si una población está a una distancia por encima de 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

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

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 , $i \in I$, $j \in J$.

ξ_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.

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 : parámetro utilizado 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

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

- Minimizar el coste de mantenimiento

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

- Minimizar el coste de transporte

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

- Minimizar el rechazo social

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

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)

$$\text{Min} \text{ Max} \sum_{j \in J} \omega_h R_{hj} y_j$$

- Minimizar la desutilidad colectiva

$$\text{Min} \sum_{h \in H} \omega_h E_h$$

$$E_h = \sum_{j \in J} \frac{\gamma y_j}{\delta_{hj}}, \quad \delta_{hj} \leq \theta_1$$

Restricciones

1. Se instalan como máximo dos incineradoras entre las posibles localizaciones.

$$\sum_{j=1}^s y_j \leq 2$$

2. En cada localización candidata como máximo se instalará una incineradora.

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

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

$$X_j \leq \gamma y_j, \quad \forall j \in J$$

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

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

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

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

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 problemática que analizamos en este trabajo es la localización de hasta un máximo de dos incineradoras de residuos sólidos animales, de una capacidad determinada, entre cinco lugares preestablecidos en Andalucía; Alcalá la Real, Alquife, Antequera, Aznalcóllar y Olvera, teniendo en cuenta los factores que pueden influir en la decisión.

Se deben de incinerar los deshechos semanales de 161 centros generadores de residuos (mataderos existentes en Andalucía), los cuales son recogidos mediante camiones, uno por cada matadero, siendo el punto de partida de cada camión, el matadero correspondiente.

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 de los residuos desde los mataderos hasta las incineradoras, y criterios sociales como 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 residuos. 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 tiene un mayor rechazo social.

- Desutilidad Colectiva

Se considera que la localización del centro de tratamiento, se sitúa a una distancia de 5 Km de la población y además fijaremos un umbral superior (θ_1), entendiendo que si una población está a una distancia por encima de dicho umbral, ese aspecto de rechazo social no se considera.

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.

El problema que planteamos desde el punto de vista matemático es multiobjetivo binario cuadrático. Además, es un problema de rutas con más de 100 nodos, que no es recomendable resolver con el programa CPLEX y es por lo que se utiliza un método metaheurístico, buscando las soluciones eficientes.

Algunas de las soluciones eficientes obtenidas son las que aparecen en las tablas que se muestran a continuación.

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesg Max	Desutilid	Suma	Max	Aznalcóllar	Antequera	Olvera	Alcalá Real	Alquife
**						0,00%	0,00%	6	2	0	1	2
sol9	0,00	1,00	0,69	1,00	0,01	269,89%	100,00%	0	0	0	0	161
sol4	0,96	0,00	0,66	0,67	0,53	281,03%	95,52%	85	0	0	76	0
sol69	1,00	0,32	0	0,00	1,00	232,21%	100,00%	30	131	0	0	0
sol6	1,00	0,27	0,01	0,00	1,00	227,42%	100,00%	36	125	0	0	0
sol3	0,04	0,52	1	0,71	0,00	226,85%	71,11%	161	0	0	0	0
sol152	0,85	0,38	0,10	0,00	0,38	171,04%	85,20%	75	0	0	0	86
sol3	0,04	0,52	1	0,71	0,00	226,85%	71,11%	161	0	0	0	0

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesg Max	Desutilid	Suma	Max	Aznalcóllar	Antequera	Olvera	Alcalá Real	Alquife
**						0,00%	0,00%	6	2	0	1	2
sol9	7012	84528	4,09	1,25	3057			0	0	0	0	161
sol4	15218	36563	3,97	0,94	7281			85	0	0	76	0
sol69	15603	52014	1,55	0,31	11064			30	131	0	0	0
sol6	15603	49444	1,57	0,31	11064			36	125	0	0	0
sol3	7320	61577	5,24	0,98	2977			161	0	0	0	0
sol152	14332	54602	1,94	0,31	6034			75	0	0	0	86
sol3	7320	61577	5,24	0,98	2977			161	0	0	0	0

En la primera tabla, en las seis primeras columnas vemos las soluciones eficientes y los valores normalizados de cada uno de los objetivos en cada una de las soluciones.

La solución 9 minimiza el coste (instalación y mantenimiento), el de transporte la sol4, el rechazo social la sol69, el riesgo máximo la sol6 y la desutilidad la sol3. En la segunda tabla, se recogen los valores en los que se dan los mínimos anteriores.

En las últimas columnas (de ambas tablas) aparecen las cinco localizaciones candidatas, el número de mataderos que transportan los residuos hacia cada una de ellas y el número de incineradoras que se instalan en cada una de las soluciones eficientes.

En la sol9 se instala una única incineradora en Alquife, y en la sol3 en Aznalcóllar. En el resto de soluciones eficientes que se recogen en la tabla observamos que se instalan dos incineradoras, por ejemplo, en la sol4, 85 mataderos llevan sus residuos a Aznalcóllar y 76 a Alcalá la Real.

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos tratado de determinar la mejor localización de hasta un máximo de dos incineradoras de residuos sólidos animales entre cinco lugares preestablecidos, 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, considerando dentro de los costes económicos los costes de instalación y mantenimiento agregados.

Nos enfrentamos a un problema multiobjetivo binario cuadrático. Es un problema de rutas que se ha resuelto con un metaheurístico buscando las soluciones eficientes.

En una futura línea de investigación trataremos de ubicar hasta dos incineradoras, como en este trabajo, pero cambiaríamos el hecho de que un camión recoja los desechos de un solo matadero, permitiendo que pudiera pasar por varios de ellos antes de llegar a la incineradora correspondiente, recogiendo en todos ellos sus residuos. Así trataríamos de organizar las rutas para cada camión con el punto de partida y de llegada, la incineradora elegida.

En lo referente a los datos que se utilizarían tendríamos que modificar los correspondientes al coste de transporte, ya que habría que determinar las distancias entre los diversos mataderos y entre ellos y las incineradoras. Los correspondientes al rechazo social y al riesgo máximo se complicarían también.

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.

ⁱ Materiales específicos de riesgo

El cráneo, incluidos el encéfalo y los ojos, las amígdalas, la columna vertebral, excluidas las vértebras caudales, las apófisis transversas de las vértebras lumbares y torácicas y las alas del sacro, pero incluidos los ganglios de la raíz dorsal y la medula espinal de los bovinos de mas de doce meses de edad, y los intestinos desde el duodeno hasta el recto, y el mesenterio, de los bovinos de cualquier edad

Se consideran también como tales aquellas partes del cadáver que contengan materiales específicos de riesgos que no hayan sido extraídos o cadáveres enteros.