

Localización de incineradoras de materiales específicos de riesgo en Andalucía bajo un enfoque multicriterio

Concepción Paralera Morales

Universidad Pablo de Olavide

1. INTRODUCCIÓN

Bien es conocido el problema social que se produjo en Aznalcóllar debido al cierre de minas y que aún todavía está latente. El cierre de la mina fue una de las consecuencias del desastre ecológico que se produjo con el vertido al río Guadiamar de millones de metros cúbicos de aguas ácidas y lodos tóxicos al romperse la presa de una balsa de las minas de pirita, que llevó a una situación de desempleo a una gran parte de la población de dicha localidad, en su mayoría personas dedicadas al transporte y reparación de maquinaria.

Poco después, en el año 2000, surgía en España, después de llevar años causando estragos en Europa y principalmente en el Reino Unido, el conocido “mal de las vacas locas”, que requería de medidas de control para evitar la propagación de la **Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB)**. A raíz de su aparición, una gran cantidad de animales y los residuos que se consideraron como de riesgo (**Materiales Específicos de Riesgo, MER**), tanto de animales sospechosos de padecer la encefalopatía, como de animales sanos, tuvieron que ser eliminados. La manera más eficaz y económica para eliminar estos residuos es mediante su incineración, ya que las altas temperaturas que se alcanzan con este método los reduce a unas cenizas totalmente estériles y sin ningún peligro para las personas, animales ni medio ambiente (como recoge la legislación en la Orden 22/02/2001 de supuestos excepcionales de incineración).

Teniendo en cuenta la situación social que se había creado en Aznalcóllar en ese momento y la necesidad de eliminar los residuos para evitar la propagación de la EEB,

nos planteamos analizar en una primera aproximación, mediante un problema de programación multiobjetivo, si Aznalcóllar sería una localización posible para la instalación de una incineradora. Con ello se conseguiría de algún modo paliar el problema de paro, ya que los transportistas empleados anteriormente en la mina, podían ser empleados en las rutas de transporte de los residuos y de esa manera, además, se facilitaba una salida al tratamiento de los residuos. Éste fue el comienzo del trabajo que hoy desarrollamos, llegando a ser una motivación suficiente y de gran interés para seguir profundizando en el tema.

Bien es sabido que la dimensión actual de las actividades comerciales tanto en el mercado nacional como en el internacional ha 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. Además, la transformación de estos alimentos ha impulsado el desarrollo de unas actividades industriales que dan lugar a una cantidad importante de residuos.

Esto ha ocasionado un problema ambiental, dado el elevado número de residuos que se generan (tóxicos, radioactivos, sanitarios, peligrosos, etc.), que pueden tener consecuencias muy graves para la salud de no recibir un tratamiento adecuado, ya que pueden derivar en problemas de contaminación atmosférica, hídrica y de suelos.

Una muestra de la preocupación que provocan estas actividades 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 medioambiental se refiere al transporte y depósito, transformación o eliminación de los residuos procedentes de la Encefalopatía Espongiforme Transmisible (EET) y en concreto de la Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB), los residuos MER en la Comunidad Europea, que son los que tratamos en este estudio.

Analizando la situación en España frente a la EEB, y en concreto en Andalucía, dada la gran cantidad de residuos que se generan en sus mataderos y conociendo la legislación (Comunitaria, Estatal y Autonómica) existente referente a ello, pensamos en la necesidad de centros de tratamiento específicos para los residuos MER que, según nos marca la legislación, deben ser incineradoras. El tratamiento mediante incineración

se considera el más adecuado y estaría encuadrado dentro del marco del Desarrollo Sostenible, entendiendo por Desarrollo Sostenible¹ aquél que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

A pesar de que con nuestro trabajo consideremos una solución respetuosa con el Medio Ambiente, la opinión de los futuros vecinos de una incineradora no siempre es positiva. En muchas ocasiones, propugnan diversos motivos que se oponen a los supuestos beneficios de estas centrales. Esto hace que no siempre sea fácil decidir en qué lugares se deben localizar.

El objetivo que nosotros nos planteamos con este trabajo es la ubicación de incineradoras de residuos sólidos animales (MER) entre una serie de localizaciones andaluzas, para lo cual plantearemos un modelo multiobjetivo teniendo en cuenta tanto criterios económicos como sociales.

La Encefalopatía Espongiforme Bovina (EEB), conocida como el mal de las vacas locas, surge como consecuencia de una estrategia británica para poder aumentar la producción de leche en 1980 mediante la alimentación del ganado con suplementos hechos con carne y desechos de animales. Desde el comienzo de la enfermedad se tomaron medidas estrictas: el sacrificio de miles de cabezas de ganado, la prohibición del uso de piensos para la alimentación del ganado y de la exportación de carne a otros países fueran o no de la Comunidad Europea. La industria ganadera británica y las derivadas del tratamiento de distintas partes del ganado bovino, se vieron fuertemente afectadas.

Años más tarde, en el 2000, se detecta el primer caso de EEB en España y se produce una crisis alimentaria sin precedentes que posteriormente afecta a Andalucía. Comienzan a tomarse medidas para evitar su propagación; éstas se centran en detectar y eliminar los animales sospechosos así como en la destrucción de los residuos que de ellos se producen. Ante la dificultad de la eliminación de los mismos, la gran cantidad de residuos que se generan en nuestra Comunidad y el hecho de que no existan plantas específicas de tratamiento (incineradoras), nos planteamos en este trabajo la localización de estas plantas entre algunas poblaciones elegidas en Andalucía.

¹ Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, *Nuestro Futuro Común*. Alianza Editorial. Madrid, 1988, pp. 67.

Una vez que se han seleccionado las posibles localizaciones, nos centramos en la formulación del modelo que va a dar solución al problema que intentamos resolver, para lo que nos planteamos primero, cuáles van a ser los objetivos y cuáles las restricciones. Mediante una revisión de la literatura existente hemos podido obtener aquellos criterios y restricciones más adecuados a nuestro problema.

Una vez formulado el modelo, lo abordaremos según distintas aproximaciones, dependiendo de si decidimos localizar una única planta incineradora o instalar varias. En el primer caso suponemos que cada camión sólo puede recoger los residuos de un solo matadero y transportarlo a la incineradora que corresponda y en el segundo caso permitimos además que cada camión pueda recoger los residuos de varios mataderos hasta completar su capacidad máxima (una situación más real del problema) y posteriormente transportarlos hacia la(s) incineradora(s) correspondiente(s).

En el primer caso, ya que todos los residuos de los 53 mataderos considerados en el estudio se transportarán a la única incineradora que debe ser elegida, el problema que se nos plantea es multicriterio discreto y con él intentamos elegir la mejor localización para la instalación de la incineradora (este será nuestro problema de localización). Abordaremos la resolución esta primera aproximación, mediante dos enfoques: utilizamos el método PROMETHEE basado en las Relaciones de Superación y la Teoría de la Utilidad Multiatributo. En este caso, hemos considerado tres tipos de decisores, representantes de tres colectivos distintos (político, socioambiental y empresarial) que se pueden ver implicados en la problemática objeto de nuestro estudio. Así, se puede obtener toda la información posible acerca del comportamiento del modelo discreto.

Ahora bien, si decidimos que se localicen más de una incineradora, perdemos el carácter discreto del problema dada las diversas combinaciones que podrían darse para distribuir los desechos de los 53 mataderos entre las posibles ubicaciones para las incineradoras. Tal caso es más complejo y crece su dificultad en la resolución.

En este segundo caso, es un problema continuo, y dado que los métodos que normalmente podemos utilizar para la búsqueda de soluciones eficientes, los denominados métodos exactos, son computacionalmente costosos, recurriremos a métodos más recientes y de gran auge como son los métodos metaheurísticos. Esta es una aproximación más real del problema ya que permitiremos que un mismo camión pueda recoger los residuos de varios mataderos, hasta completar la carga o el horario,

antes de llegar a la incineradora. Así, deberemos determinar en este caso tanto la localización de la(s) incineradora(s) como las rutas de los camiones, convirtiéndose el problema en un problema de Localización y Rutas Multiobjetivo

Con esta perspectiva, el problema adquiere una complejidad considerable debido a la gran cantidad de posibles combinaciones a la hora de recoger los residuos, lo que aumenta de una manera importante sus dimensiones, dificultando así tanto la obtención de los datos necesarios como su resolución.

En concreto, nos enfrentamos a un problema multiobjetivo de Localización y Rutas con cinco objetivos, los cuales recogen criterios económicos y sociales, con unas dimensiones no estudiadas anteriormente. Para resolverlo, dada su complejidad, optamos por un algoritmo metaheurístico basado en búsqueda tabú, en lugar de utilizar un algoritmo exacto con el que sería inviable su resolución.

Por último, y teniendo en consideración que en el problema de localización de una única incineradora se obtiene una ordenación de las posibles localizaciones, mientras que en el caso de más de una incineradora, lo que obtenemos es el conjunto de las soluciones eficientes, debiendo el decisor elegir entre ellas, se presenta un proceso interactivo para la selección de localizaciones adecuadas a las preferencias del posible decisor.

2. FORMULACIÓN DEL MODELO

El problema que consideramos consiste en recoger los residuos MER semanales, generados por los n mataderos, que componen el conjunto I , y transportarlos a las incineradoras, las cuales deben estar ubicadas en algunas de las s localizaciones candidatas para la instalación de las mismas (localizaciones que conforman el conjunto J). En dicho transporte se atraviesan diversos centros de población, en concreto q centros, elementos del conjunto H .

En cuanto a las variables de nuestro modelo, consideramos dos bloques de variables, por un lado las variables binarias y_j , que se encuentran asociadas a las incineradoras (tomarán el valor 1 si se instala una incineradora en la localización j , con $j \in J$, y 0 en caso contrario); y por otro, las variables x_{ij} , también binarias, que nos indican si los residuos se transportan desde el matadero i , con $i \in I$, a la incineradora j , con $j \in J$ o no.

De acuerdo con esta notación pasamos a comentar, justificar y definir nuestros objetivos.

• **COSTES FIJOS:**

Hemos de indicar en primer lugar que los costes fijos son suma de los costes de instalación y de mantenimiento que describimos a continuación.

– **Costes de instalación:**

Para cada posible ubicación, hemos considerado los gastos que se ocasionan en la instalación de una incineradora. La incineradora se debe instalar en una nave con unas determinadas características, medidas y estructuras, necesarias para la utilidad que se le va a dar; por lo tanto, lo primero que necesitamos para instalar la incineradora es una parcela con unas medidas determinadas. Dependiendo del tipo de nave que se construya en la parcela, si es adosada o no, el precio varía. Nosotros hemos considerado que la nave que construimos en la parcela es independiente. Así, el primer coste que incluimos es el de la parcela donde se va a construir la nave. Además, también se incluyen los costes del terreno que bordea a la nave y que forman parte de lo que denominamos *parcela exterior*, que tiene un precio diferente al anterior.

Aparte, tenemos que añadir el coste de la construcción de la planta incineradora según las especificaciones que rige el tipo de incineradora, el del horno incinerador, que dependerá de la empresa que lo proporcione y del tipo que se quiera instalar (en nuestro caso, una incineradora de residuos MER) y de su montaje y transporte hasta la posible ubicación (que dependerá de la población).

También 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 (necesarios para la apertura de la misma).

Dado que estas localizaciones se encuentran repartidas entre cinco provincias andaluzas, dos en Sevilla y una en Cádiz, Málaga, Granada y Jaén, respectivamente y dependientes de distintos ayuntamientos, los precios variarán entre unas localizaciones y otras.

Hemos calculado los costes de instalación de una incineradora, según las características proporcionadas por la empresa INCINERADORES VEGASA,

dedicada a la venta de incineradoras de restos de animales y las condiciones necesarias para su instalación. Gracias a ella obtuvimos la descripción de la planta MER, la descripción del equipo, las características de la incineradora, del solar necesario para la instalación; las medidas de la parcela interior (donde se va a construir la planta incineradora) y exterior (zona que debe rodear al edificio para que se puedan mover con facilidad los camiones que llegan y descargan) y los requisitos necesarios para su correcta puesta en funcionamiento.

– Coste de mantenimiento:

En este coste hemos englobado los gastos que suponen el mantenimiento de la incineradora, donde incluimos revisiones periódicas, piezas, etc., de forma que se cumpla en todo momento con la normativa ambiental. Las incineradoras de MER que hemos considerado en este estudio cumplen con todas las normativas vigentes en la actualidad: europea, española y por comunidades autónomas. Además, para su instalación se debe presentar entre otras cosas, un estudio e informe de emisiones y un informe de impacto ambiental que aseguren el cumplimiento de dicha normativa ambiental.

También incluye este coste los gastos por el mantenimiento tanto de la parcela exterior como de la interior del edificio donde se ubica la incineradora, así como los correspondientes al personal encargado de ella. Estos gastos nos han sido proporcionados por empresas de mantenimiento de las localidades que se han seleccionado para el trabajo.

En este coste de mantenimiento no se incluye el coste que puede suponer la incineración ya que todo se tiene que quemar, independientemente de donde se haga.

Con los datos especificados anteriormente, la expresión que recoge los costes fijos será:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^s (\xi_j + v_j) \cdot y_j, \text{ donde}$$

ξ_j son los gastos correspondientes a la instalación de una planta incineradora en la localización j ($j = 1, \dots, s$).

v_j representa el coste de mantenimiento de una incineradora en la localización j ($j = 1, \dots, s$).

Debemos resaltar que en el caso de Osuna existe un centro de tratamiento de residuos que no es una incineradora como la que pretendemos situar, por lo que se han computado los costes fijos de una incineradora y no los costes del centro ya instalado, puesto que se quiere analizar la idoneidad de esta ubicación para una incineradora.

• **COSTE DE TRANSPORTE:**

Para calcularlo, vamos a considerar el coste que supondría el transporte de los residuos desde los mataderos a cada una de las incineradoras ubicadas en las localizaciones que han sido seleccionadas para este fin, asumiendo que los camiones parten de la incineradora y concluyen su recorrido en ella. Por lo tanto, lo primero que tenemos que tener en cuenta es el número de camiones que van a ser necesarios en cada matadero, dependiendo del volumen de residuos que en estos se genere. El número de camiones varía también dependiendo de la capacidad de este. Así que, conociendo el volumen de residuos anuales y, por tanto, el que se genera semanalmente en los mataderos y las posibles capacidades de los camiones dedicados a la recogida de estos residuos, realizamos nuestro estudio con camiones con una capacidad de 3.500 kg². Una vez que sabemos cuál es la capacidad del camión, necesitamos conocer cuál es el coste que nos supone que ese camión esté en funcionamiento y el tiempo que puede dedicar el transportista al día a la recogida de residuos en los mataderos, es decir, su jornada laboral y el coste que se imputa por kilómetro recorrido. Los requisitos que deben cumplir dichos camiones con respecto al transporte de los MER están recogidos en la legislación (RD 1911/2000).

La siguiente expresión nos proporciona el coste de transporte:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s c r_i \delta_{ij} x_{ij} \text{ donde}$$

c es el coste imputado por kilómetro recorrido.

δ_{ij} representa la distancia recorrida recogiendo los residuos en el matadero i ($i = 1, \dots, n$), partiendo desde la incineradora j , $j = 1, \dots, s$, y terminando en ella.

r_i indica el número de camiones asociados al matadero i a la semana .

²Cada empresa dedicada al transporte de los MER tiene su propia flota de camiones y, dependiendo del ámbito de recogida, tienen unas capacidades u otras.

Consideramos las variables x_{ij} como binarias, tomando el valor 1 si se transportan los residuos desde el matadero i a la incineradora correspondiente en la localización j y 0 en caso contrario.

Las distancias δ_{ij} , desde cada uno de los mataderos a las localizaciones elegidas para la instalación de las incineradoras, se han calculado mediante la Guía CAMPSA (2004), eligiendo las rutas que nos proporcionen la distancia más corta en kilómetros.

• **RECHAZO SOCIAL:**

En nuestro trabajo nos basamos en la medida del riesgo individual definida en Giannikos (1998).

En un principio, para el cálculo del rechazo social, medimos el riesgo individual mediante la cantidad de residuos (en Kg), que se transportaban en camiones desde el matadero i a la incineradora correspondiente en la localización j . Pero a la hora de medir el rechazo que suponía el paso de los camiones, nos parecía lo mismo si estos camiones iban casi vacíos, a media carga o lleno puesto que lo que la población ve es el camión y no su carga. Esto nos llevó a considerar el riesgo individual medido por el número de camiones que pasan por la población h en su camino hacia la incineradora j . Dicho riesgo individual se multiplica por el número de habitantes de la población para obtener el social.

Así, para el cálculo del rechazo social, hemos considerado todos los centros de población por los que pasan los vehículos en sus rutas. Hemos calculado las rutas que siguen los camiones desde que parten de la incineradora, pasan por el matadero y regresan a dicha incineradora, determinando cuáles son las poblaciones por las que pasan. Estas, las hemos determinado mediante el programa de carreteras que, además de proporcionarnos la ruta más corta en kilómetros desde la población donde está el matadero hasta aquella en la que se quiere instalar la incineradora, nos indica cuál es el camino que sigue y las poblaciones que atraviesa.

Una vez que conocemos las poblaciones por las que discurre la ruta, el número de camiones que pasan a la semana (que dependerá de los distintos mataderos de los que provengan, pudiendo ser uno o varios por cada uno de ellos) y el número de habitantes de dichas localidades, el producto del número de camiones por el número de habitantes, nos dará el valor que corresponde a este aspecto del rechazo social.

De este modo, el objetivo nos quedaría:

$$\text{Min} \sum_{h \in H} R_h, \text{ donde}$$

$$R_h = \varpi_h \cdot \sum_{i,j/h \in H_{ij}} x_{ij} \cdot r_i$$

ϖ_h nos indica número de habitantes de la población h .

H es el conjunto de poblaciones que se ven afectadas por el paso de camiones.

H_{ij} es el conjunto de las poblaciones que están en la ruta del matadero i a la incineradora j .

R_h representa el riesgo individual y viene determinado por el número de camiones que pasan por la población h en su camino de ida y vuelta hacia la incineradora situada en la localización j .

• **CRITERIO DE DISTRIBUCIÓN DEL RIESGO (MINIMIZAR EL RIESGO MÁXIMO):**

Este criterio de distribución del riesgo es un criterio de equidad. Según hemos visto anteriormente, Marsh y Schilling (1994) orientan esta medida del riesgo máximo a distribuir el daño entre la población afectada de forma igualitaria, ya que la percepción de desigualdad puede ser un motivo para que la población rechace la posible instalación de las incineradoras.

Para determinar cuál es el valor que nos da el riesgo máximo analizamos todas las rutas de una solución posible contabilizando el número de camiones que pasan por una población. Multiplicando este número por el rechazo de la población obtenemos el rechazo total de una población a dicha solución. El valor del rechazo de la población que nos da el mayor rechazo social será el riesgo máximo.

Su expresión viene determinada por:

$$\text{Min} \text{Max}_{h \in H} R_h$$

• **DESUTILIDAD COLECTIVA:**

Con ella pretendemos recoger el rechazo de las poblaciones cercanas a la incineradora, entendiendo por *cercana* el encontrarse a una distancia de la ubicación de la incineradora inferior o igual a θ , umbral que hemos situado en 10 Km., suponiendo que si una población está a una distancia por encima de dicho umbral, ese aspecto de rechazo social no se considera.

La desutilidad colectiva viene dada por la expresión:

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

$$E_h = \sum_{j \in J} \frac{\gamma y_j}{\delta_{hj}}, \quad 1 \leq \delta_{hj} \leq \theta, \text{ donde}$$

γ representa la capacidad de la incineradora.

δ_{hj} es la distancia de la población $h \in H$ a la localización de la incineradora j .

Vemos entonces que la desutilidad colectiva es una función creciente de la capacidad de la incineradora que se desea instalar y decreciente con respecto a la distancia del centro a la población correspondiente. Esta función queda bien definida ya que consideramos que la incineradora no se coloca en el núcleo de la población, sino en las afueras, de ahí la cota inferior de uno.

A la hora de aplicar el modelo, nosotros no hemos considerado la capacidad de la incineradora como un parámetro. Conocemos la cantidad de kilos que se generan semanalmente, por lo que una incineradora de capacidad de incineración de 1 Tm/h es suficiente para eliminarlos.

Una vez que hemos detallado cuáles van a ser los objetivos de nuestro modelo, hemos de puntualizar que no hemos considerado un coste medioambiental a la hora de instalar las incineradoras porque, por un lado, consideramos que en el coste de mantenimiento de una incineradora queda recogido este aspecto, ya que en las especificaciones técnicas del incinerador se justifica que las sustancias que se puedan derivar de la incineración de los residuos están dentro de lo que permite la normativa ambiental. Además, en el rechazo social y en la desutilidad colectiva también se hace constar la posición de la población ante la instalación de una planta de estas características.

También hemos de considerar que todos los parámetros que se han introducido en el modelo están abiertos a posibles modificaciones.

En cuanto a las restricciones del modelo tenemos las siguientes:

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

$$\sum_{i \in I} \tau_i x_{ij} \leq \gamma y_j \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

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

La primera nos indica el número máximo de incineradoras que deseamos instalar, p . La segunda hace referencia al hecho de que la cantidad de residuos incinerados en la localización j no puede exceder la capacidad de la incineradora, siendo τ_i la cantidad de residuos semanales procedentes del matadero i . La siguiente tiene su razón de ser en la necesidad de que todos los mataderos deben ser asignados a una incineradora³. Por último, aparece la condición de dicotomía de las variables binarias.

El modelo quedaría como sigue:

• **OBJETIVOS:**

Costes fijos:
$$\text{Min} \sum_{j=1}^s (\xi_j + v_j) \cdot y_j$$

Coste de transporte:
$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s cr_i \delta_{ij} x_{ij}$$

Rechazo Social:
$$\text{Min} \sum_{h \in H} R_h \quad R_h = \varpi_h \cdot \sum_{i, j/h \in H_{ij}} x_{ij} \cdot r_i$$

Riesgo Máximo:
$$\text{Min} \text{Max}_{h \in H} R_h$$

Desutilidad Colectiva:
$$\text{Min} \sum_{h \in H} \omega_h E_h \quad E_h = \sum_{j \in J} \frac{\gamma y_j}{\delta_{hj}}, \quad 1 \leq \delta_{hj} \leq \theta$$

• **RESTRICCIONES:**

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

$$\sum_{i \in I} \tau_i x_{ij} \leq \gamma y_j \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

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

³ Todos los residuos de un mismo matadero van hacia una misma incineradora.

3. LOCALIZACIÓN DE UNA INCINERADORA

El problema con que nos enfrentamos es claramente multicriterio, pero si el número de incineradoras que decidimos instalar es uno (suficiente para los residuos generados), en cuyo caso en la primera restricción del problema $p = 1$, se convierte, además, en un problema discreto debido a que, de todas las variables del problema, las únicas que tendríamos que obtener serían las variables y_j . El resto de variables, x_{ij} , serían conocidas puesto que todos los residuos deben ser eliminados en la única incineradora elegida, y todos los mataderos deben ser asignados a la misma.

En este caso disponemos de una tabla con los valores correspondientes a cada uno de los objetivos en cada una de las seis localizaciones candidatas para la instalación de la incineradora, ya que, como hemos dicho anteriormente, las únicas variables que quedan en el modelo son las y_j , que nos indicarán en qué localización se va a ubicar la incineradora una vez que se apliquen las técnicas adecuadas para el problema multicriterio discreto con 6 alternativas (las seis localizaciones seleccionadas para la instalación de las incineradoras) y 5 criterios cuantitativos (criterios económicos y sociales) al que nos enfrentamos.

Con los valores que obtenemos en los distintos criterios y para las distintas localizaciones, en una primera aproximación buscamos cuál es la mejor localización (de las seis posibles), para la instalación de una única incineradora a la cual llegarían todos los desechos, basándose en los criterios que hemos considerado en nuestro estudio. Además consideramos que cada camión recoge los residuos del matadero que le corresponde y posteriormente los lleva a la incineradora elegida, sin recoger más desechos en su camino.

Este problema multicriterio discreto lo abordamos mediante dos técnicas. En primer lugar utilizamos PROMETHEE y en segundo lugar y con el fin de realizar un análisis más consistente, utilizamos además la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT), con el fin de expresar las preferencias del decisor en términos de la utilidad que le reporta.

3.1 Resolución mediante el método PROMETHEE

Volvamos al problema concreto que estamos resolviendo: la localización de una única incineradora. En primer lugar, aplicamos el método PROMETHEE mediante el software Decision Lab. La solución del problema discreto, que en este apartado

tratamos, no sólo va a depender de sus características técnicas, sino también de las preferencias del decisor.

Para la selección de las funciones de preferencia, se proponen seis tipos básicos (Brans and Vincke, 1985; Brans *et al.* 1984, 1986). La información que aporta el decisor es la que marca cuál de los diferentes tipos va a usar y cuál es el valor que le va a asignar a los umbrales correspondientes. En nuestro caso concreto, las elegidas son las de tipo lineal para todos los criterios, puesto que son fáciles de entender por el decisor y son las más utilizadas, y apropiadas para nuestra situación. En este tipo de criterio se necesitan dos parámetros de decisión; el umbral de indiferencia q y el de preferencia p .

Los parámetros que van a ser incorporados al análisis tienen un significado real para el decisor, de forma que él pueda fijarlos sin especiales complicaciones y de acuerdo a sus preferencias. En nuestro caso, para elegir los umbrales observamos en primer lugar el rango de variación de cada uno de los criterios. En la tabla siguiente podemos ver los valores máximos y mínimos de cada uno de ellos, así como una fila en la que podemos observar la máxima diferencia existente entre las distintas alternativas en cada uno de los criterios.

Alternativas	Costes Fijos	Costes de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva
Aznalcóllar	7.320,02	41.067,60	9.893.480	1.202.080	6.511,66
Antequera	8.283,18	31.127,00	4389.160	1.246.832	41.066,40
Alcalá la Real	7.897,92	34.421,60	7.718.920	1.577.730	24.929,30
Olvera	7.705,28	33.252,40	7.429.680	1.826.600	113.811,10
Alquife	7.011,80	45.744,20	5.974.620	1.246.832	2.350,90
Osuna	7.375,03	29.813,20	14.705.760	2.443.060	17.529,27
Máxima diferencia	1.271,38	15.931,00	10.316.600	1.240.980	111.460,20

Tabla 1: Máxima diferencia en los criterios.

En segundo lugar, calculamos las desviaciones que existen entre todas las alternativas para cada uno de los criterios, así vamos comparando cada alternativa con las restantes por último nos centramos en aquellas que toman el valor positivo y se representan (sin contabilizar aquellos que se repiten) con el fin de ver cómo se comportan, Dicha representación puede ayudarnos a la hora de elegir cuáles van a ser los umbrales que se van a utilizar.

Con la información dada por los gráficos los umbrales que fueron elegidos para cada uno de los criterios se encuentran recogidos en la *Tabla 2*.

Umbrales	Costes Fijos	Costes de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva
Indiferencia	300	2000	1.600.000	300.000	12.000
Preferencia	600	8000	5.000.000	600.000	35.000

Tabla 2: Umbrales de preferencia e indiferencia.

Además de determinar los umbrales p y q , la elección de los pesos no es una tarea sencilla y también dependen de las preferencias del decisor. Como en esta parte trabajo no disponemos de un decisor real que proporcione unos pesos adecuados a cada uno de los criterios del problema, hemos considerado tres tipos de decisores, representantes de tres colectivos distintos que pueden verse implicados en la problemática objeto de nuestro estudio (Fernández et al., 2000).

Hemos de indicar que en una aplicación con decisores reales, los valores de p y q podían ser distintos dependiendo de cada decisor. No obstante con el fin de no hacer excesivamente complejo el estudio, suponemos que éstos son comunes para los tres tipos de decisores que se han considerado.

Así, en primer lugar hemos considerado cuál sería el punto de vista desde una perspectiva con una componente fuertemente política, la cual debe buscar un equilibrio entre los criterios económicos y los sociales, puesto que se debe cumplir con unas restricciones presupuestarias y además se debe intentar tener en cuenta la opinión pública. Por ello hemos considerado que desde esta perspectiva los pesos más adecuados serían aquellos que ponderaran de una misma forma a todos los criterios.

En segundo lugar, hemos tenido en cuenta la problemática desde la perspectiva de un colectivo, al cual hemos llamado socioambiental, donde primen los aspectos sociales, representante de las inquietudes de la población. Para dicho colectivo hemos considerado que unos pesos adecuados serían aquellos que primasen los aspectos sociales sobre los económicos, en concreto nosotros hemos ponderado cuatro veces más los primeros que los segundos.

Y, en último caso hemos analizado la perspectiva desde el punto de vista empresarial, bajo el cual se priman por encima de todo los intereses económicos. Por ello en este tercer caso hemos ponderado cuatro veces más los criterios económicos que los sociales.

En el siguiente gráfico vemos los valores que se le han dado a los pesos ya sea desde la perspectiva del político, el socioambiental o el empresario.

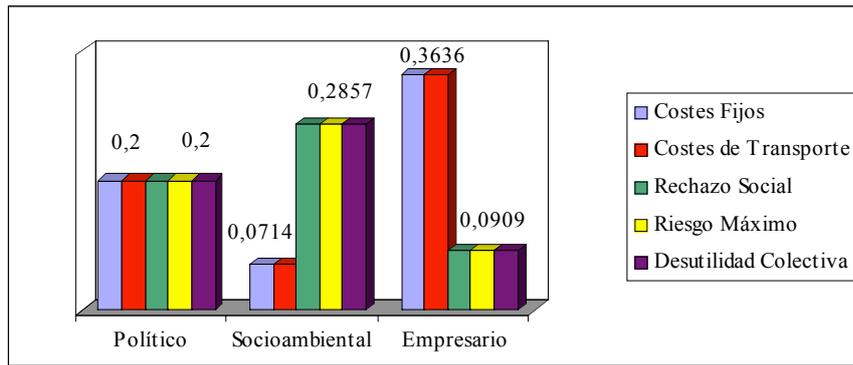


Gráfico 1: Ponderaciones de los criterios.

Con toda esta información utilizamos el software Decisión Lab para resolver mediante el método PROMETHEE nuestro problema discreto con el fin de obtener una ordenación.

Se han calculado las ordenaciones totales con PROMETHEE II, con el fin de evitar las posibles incomparabilidades que se pueden producir al utilizar las ordenaciones parciales. Esto implica cierta pérdida de información respecto al grado de conflicto existente entre las parejas de alternativas incomparables, pero sin embargo nos permite establecer un ordenamiento preferencial entre las mismas.

Según la perspectiva con una componente fuertemente política, con el que se pretende buscar un equilibrio entre los criterios económicos y los sociales, la ordenación obtenida proporciona como mejor alternativa Alquife. La razón de que esta ordenación sea así, es porque como localización es la que mayor equilibrio presenta entre los criterios económicos y sociales y además, la que presenta los valores en los criterios sociales más bajos.

Del mismo modo, la ordenación obtenida desde la perspectiva de un colectivo socioambiental, nos vuelve a proporcionar a Alquife como mejor alternativa. Esta localización es una de las que tiene los tres criterios sociales con valores más pequeños, objetivo que persigue dicho colectivo.

Sin embargo la ordenación resultante de analizar la situación desde una perspectiva empresarial es distinta. Bajo este punto de vista, la mejor alternativa ahora es Osuna. Es lógico que salga elegida esta localización ya que es la más económica y la menos social, pues presenta los menores valores en los costes de transporte y bajos en los costes fijos, y por el contrario, presenta los mayores valores tanto en el rechazo social como en el riesgo máximo.

Conocemos por tanto mediante PROMETHEE II las ordenaciones totales para cada uno de los escenarios. A continuación analizamos mediante los perfiles de las alternativas que se obtienen en primer lugar de la ordenación (Alquife para el político y el socioambiental y Osuna para el empresario), la potencialidad de los atributos en esas alternativas. De hecho ambos perfiles son independientes de cada una de las tres situaciones que estamos considerando.

En los gráficos que recogen los perfiles de Alquife y Osuna (*Gráficos 2 y 3*) se representan los flujos netos correspondientes a la alternativa considerada y que dependerán de los valores que tomen los criterios. En la siguiente tabla están recogidos los valores de cada uno de los criterios en las dos alternativas que consideramos, así como los valores medios que toman los criterios en las seis localizaciones. La idea de incluirlos es para comprender algo mejor los gráficos correspondientes a los perfiles.

Alternativas	Costes Fijos	Costes de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva
Osuna	7.375,03	29.813,20	14.705760	2.443.060	17.529,27
Alquife	7.011,80	45.744,20	5.974.620	1.246.832	2.350,90
Media de los valores	7.598,87	35.904,33	8,351.936,67	1.590.522,33	34.366,443

Tabla 3: Valores de los criterios en las dos alternativas seleccionadas.

Si observamos los valores en los distintos criterios de Alquife, vemos que los correspondientes a los costes fijos, rechazo social, riesgo máximo y desutilidad colectiva están por debajo de la media de los valores que toma ese criterio en las seis alternativas y en el caso del coste del transporte por encima. Al estar minimizando todos los criterios, en el perfil de Alquife que aparece a continuación los flujos netos correspondientes a esa alternativa se representan al contrario, todos los criterios por encima de 0 salvo el coste de transporte (véase *Gráfico 2*).

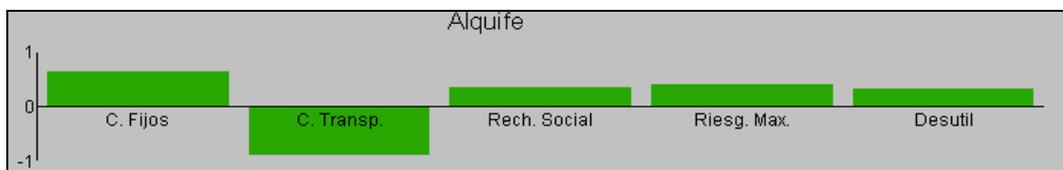


Gráfico 2: Perfil de Alquife.

Ahora bien, en el caso de Osuna los valores en criterios correspondientes a los costes fijos, de transporte y la desutilidad se encuentran por debajo de la media, con lo que en el perfil aparece por encima de 0, y tanto el rechazo social como el riesgo máximo

toman valores muy por encima de la media, de hecho alcanza los valores máximos de esos criterios, con lo que en el gráfico aparecen por debajo de 0 (véase *Gráfico 3*).

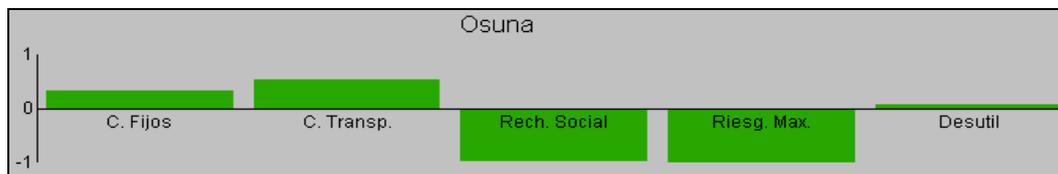


Gráfico 3: Perfil de Osuna.

Viendo los perfiles de ambos se puede entender que Alquife salga como primera alternativa analizando la situación tanto desde la perspectiva de un político como la de un colectivo socioambiental, ya que en ambos casos los criterios sociales están más considerados. Sin embargo, Osuna aparece como mejor localización en el caso de que se considere la perspectiva del empresario en el que primen, por encima de todos, los costes económicos, ya que los valores que presenta esta localización en los criterios del rechazo y riesgo están muy por encima de la media de los valores de ese criterio.

Una vez que se han analizada las ordenaciones totales obtenidas, ofrecemos también un análisis gráfico, complementario a la metodología PROMETHEE que hemos utilizado anteriormente, mediante el plano GAIA. Este ofrece al decisor una descripción gráfica de su problema de decisión, enfatizando los conflictos existentes entre los criterios y el impacto de los pesos en la decisión final.

En el *Gráfico 5* podemos observar la proyección de los seis criterios y las alternativas así como la del vector de pesos, llamado eje de decisión PROMETHEE, en el caso de que analicemos la situación desde la perspectiva del político. En las otras dos situaciones como el vector de pesos se modifica, el eje de decisión también cambiará y, por tanto, se podrán ver las variaciones en la solución en el plano GAIA, ya que las alternativas y los criterios no habrán variado. La alternativa que se seleccionará será aquella que mejor situada se encuentre respecto a este vector de ponderaciones.

Una vez realizada su proyección, el plano GAIA nos proporciona el 94,73 % de la información en los tres casos, con lo que podemos decir que nos ofrece una representación bastante fiable. Observando el plano GAIA que se muestra a continuación, se puede apreciar que los criterios más discriminantes a la hora de seleccionar la localización adecuada son, el rechazo social, el riesgo máximo y el coste de transporte, seguido de los costes fijos mientras que el que menos discrimina es la desutilidad.

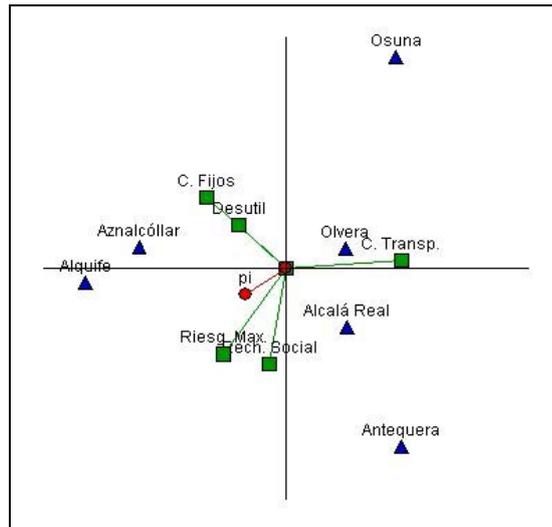


Gráfico 4: Plano GAIA para el político.

Además si nos fijamos en la dirección de los criterios podemos indicar, que los criterios correspondientes a los costes fijos y desutilidad son similares ya que están aproximadamente en la misma dirección ocurriendo lo mismo con el riesgo máximo y con el rechazo social. En conflicto se encuentran, el criterio correspondiente al coste de transporte con la el rechazo social y riesgo máximo, puesto que están en diferentes direcciones. Y son independientes los costes fijos y la desutilidad con el riesgo máximo, porque sus direcciones son ortogonales.

Conocidas las ponderaciones, el eje de decisión π (que es la proyección del vector de pesos) indica al decisor cuál puede ser la alternativa más adecuada, teniendo en cuenta los distintos criterios considerados en el modelo. Así, se puede apreciar que el vector de pesos, en el caso de la perspectiva del político, nos proporciona como mejor alternativa Alquife, ya que es la alternativa que se presenta en la dirección de dicho eje. El vector de pesos está intermedio a los criterios del rechazo social, riesgo máximo, costes fijos y desutilidad, lo que nos indica que estos son determinantes a la hora de seleccionar la alternativa, siendo la más cercana a la dirección del eje de decisión Alquife.

Análogamente se podrían analizar los planos GAIA para los otros dos escenarios, pero nos parece más interesante comparar cómo son los vectores de pesos en las tres situaciones y comentar qué solución (alternativa) es la elegida según las ponderaciones que se han asignado en cada una de las situaciones.

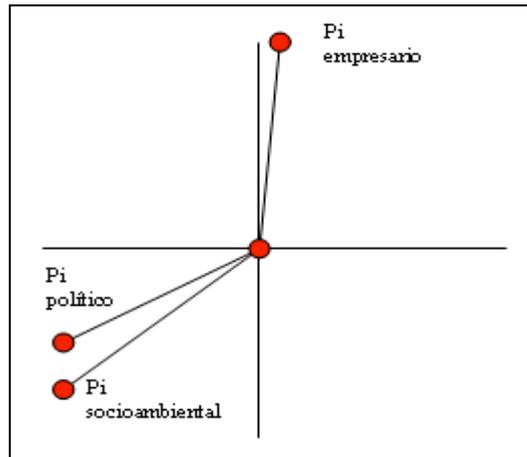


Gráfico 5: Vectores de pesos en los tres escenarios.

En el caso del colectivo socioambiental el vector de pesos está más cercano a los criterios del rechazo social y riesgo máximo (más determinantes que la desutilidad a la hora de seleccionar la alternativa) que son los que se han ponderado cuatro veces más que los económicos y eso nos da como alternativa seleccionada, Alquife. En cambio, desde el punto de vista empresarial, el vector de pesos es bien diferente. Se ponderaban cuatro veces más los criterios económicos que los sociales y si nos fijamos en el gráfico tiene una dirección intermedia entre los costes fijos y los de transporte, por lo que la alternativa seleccionada en este caso es Osuna.

3.1.1 Análisis de estabilidad y robustez de pesos

Una vez realizado el análisis gráfico decidimos realizar un análisis de sensibilidad de los pesos. De esa manera, para cada criterio, vemos en qué intervalo se pueden mover los mismos, de forma que la solución del problema siga siendo la misma. Lo que sí es cierto es que cuanto mayor sean los intervalos, más estables serán las ponderaciones.

Las tablas correspondientes al análisis de sensibilidad de los pesos según los tres puntos de vista considerados están calculadas de manera que quede inalterable la ordenación.

En principio nos planteamos que permanezca inalterable la ordenación, pero únicamente modificando la ponderación de uno de los criterios y manteniendo el resto en los intervalos que les corresponden. El hecho de considerar fija sólo la primera viene dado porque nuestro interés en este modelo es localizar una única incineradora, luego sólo nos interesa la que quede en primer lugar de la ordenación.

La *Tabla 4* recoge el análisis de sensibilidad de los pesos correspondiente al escenario del político. Los intervalos más estables son los correspondientes a las ponderaciones asignadas al riesgo máximo y desutilidad colectiva.

Criterios	Absolute values			Relative values (%)		
	Weight	Min	Máx	Weight	Min	Máx
C. Fijos	0.2000	0.1859	0.2319	20.00%	18.86%	22.47%
C. Transporte	0.2000	0.1477	0.2074	20.00%	15.58%	20.59%
Rechazo Social	0.2000	0.1748	0.2187	20.00%	17.94%	21.47%
Riesgo Máximo	0.2000	0.1910	0.2763	20.00%	19.27%	25.67%
Desutilidad	0.2000	0.1303	0.2208	20.00%	14.00%	21.63%

Tabla 4: Intervalos de las ponderaciones para el político.

Bajo el punto de vista empresarial, el intervalo más estable es el correspondiente al riesgo máximo, y después los correspondientes al rechazo social y desutilidad y, en el caso del colectivo socioambiental son el riesgo máximo y desutilidad.

Una vez realizado éste para cada uno de nuestros decisores, decidimos realizar un análisis de robustez de los pesos. Hemos de señalar la distinción existente entre el análisis de sensibilidad y el análisis de robustez. En el análisis de sensibilidad se parte de la variación concreta de un único peso, suponiendo el resto invariables y se analiza la variación que se produce en la ordenación de las alternativas. En cambio, en el análisis de robustez se parte de la validez de una afirmación obtenida a raíz de los resultados para un vector de valores de los pesos y se estudia si es válida en un conjunto de valores posibles de los pesos.

Roy (1998) define el análisis de la robustez como un procedimiento para identificar las conclusiones robustas, dados sistemas de combinaciones para los valores de los parámetros (ponderaciones).

Para ello tomamos los intervalos cerrados de estabilidad de cada una de las ponderaciones correspondientes al análisis de sensibilidad manteniendo las tres primeras localizaciones y el resultado, robusto o no, será el mantener la primera localización que aparece en cada una de las ordenaciones, como se puede ver en Fernández et al., 2000.

En el caso del político, cualquier vector de ponderaciones que consideremos en el conjunto $[0,15, 0,5] \times [0, 0,25] \times [0, 0,25] \times [0,15, 0,35] \times [0,1, 0,5]$, seguirá manteniendo Alquife como primera alternativa de la ordenación. Para el colectivo

socioambiental este conjunto es $[0'02, 0'15] \times [0, 0'12] \times [0'18, 0'35] \times [0'18, 0'35] \times [0'18, 0'35]$ y en el caso del empresario cualquier vector de ponderaciones en $[0'28, 0'46] \times [0'3, 0'44] \times [0, 0'13] \times [0, 0'15] \times [0, 0'12]$ mantiene como primera alternativa de la ordenación a Osuna.

A la vista de los intervalos donde pueden tomar valores los pesos podemos determinar que tanto en el escenario del político como en el del colectivo socioambiental son más robustos que en el caso del empresario.

Llegados a este punto y dado que durante toda la aplicación del método PROMETHEE a nuestra problemática hemos considerado tres decisores distintos, nos pareció interesante realizar el mismo análisis anterior bajo la perspectiva de un decisor que representara un consenso entre los tres anteriores. Para ello, teníamos que calcular unos pesos que de alguna manera reflejaran un acuerdo entre los tres tipos de ponderaciones estudiadas.

Para la obtención de dichos pesos nos basamos en el modelo presentado en Linares y Romero (2002) en el cual se utiliza la programación por metas. En la siguiente tabla recogemos cuáles son los pesos de consenso que se han obtenido, dependiendo de los valores de λ en el modelo.

Λ	Pesos de consenso				
	W^s_1	W^s_2	W^s_3	W^s_4	W^s_5
[0,000, 0,386)	0,212551	0,212551	0,184966	0,184966	0,184966
[0,386, 0,500)	0,209202	0,209202	0,182865	0,182865	0,182865
[0,500, 0,501)	0,209399	0,209399	0,188067	0,188067	0,188067
[0,501, 0,922)	0,200314	0,200314	0,199457	0,199457	0,199457
[0,922, 1]	0,200306	0,200306	0,200462	0,200462	0,200462

Tabla 5: Pesos de consenso.

Nos interesa comparar las soluciones obtenidas anteriormente para cada uno de los pesos correspondientes a los tres colectivos considerados, con las que se obtienen con los pesos de consenso que acabamos de obtener. Así, en el *Gráfico 6*, se recogen dos ordenaciones distintas, mediante PROMETHEE II, con los pesos de consenso. Para los valores de λ pertenecientes a los tres primeros intervalos se obtiene la primera ordenación y para los valores restantes de λ en los otros dos, la segunda. Se puede apreciar que la alternativa que aparece en primer lugar en las dos, es Alquife (en la que los valores en cuatro de los cinco criterios se encuentran muy por debajo de la media de los valores de cada uno en las seis alternativas), y en la última Osuna.

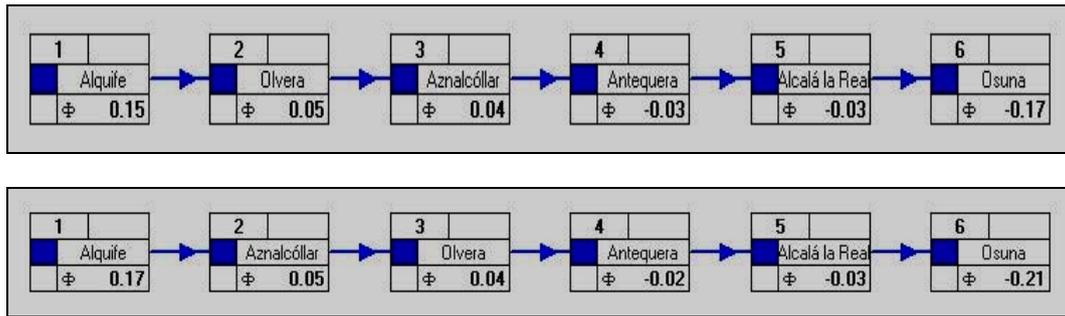


Gráfico 6: Ordenaciones para los pesos de consenso.

3.2. Resolución mediante el método MAUT

En nuestro caso en el que contamos con cinco criterios, la función de utilidad aditiva ponderada vendrá expresada por:

$$U(r_j) = \sum_{i=1}^5 w_i u_i(r_j) \quad i = 1, \dots, 5, \text{ donde}$$

$U(r_j)$ es el valor de la utilidad de la alternativa r_j , w_i es la ponderación o peso otorgado al atributo i y $u_i(r_j)$ es el valor de la utilidad aditiva del atributo i para la alternativa r_j .

Lo primero que realizamos es 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, por lo que los valores más bajos que se puedan obtener en cada uno de los criterios, representan una mayor utilidad para el decisor, del mismo modo que la peor utilidad nos la reportarán aquellos valores más altos. Así, consideramos para todos los criterios que las funciones de utilidad de nuestro decisor son lineales, con valores comprendidos en el intervalo [0,10], teniendo un mínimo en el valor 0 y un máximo en el valor 10.

Localizaciones	Costes fijos	Coste de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva
Aznalcóllar	7.320,02	41.067,68	9.893.480	1.202.080	6.511,66
Antequera	8.283,18	31.127,0	4.389.160	1.246.832	41.066,4
Alcalá la Real	7.897,92	34.421,6	7.718.920	1.577.730	24.929,3
Olvera	7.705,28	33.252,4	7.429.680	1.826.600	11.381,1
Alquife	7.011,8	45.744,2	5.974.620	1.246.832	2.350,9
Osuna	7.375,03	29.813,2	14.705.760	2.443.060	17.529,3
Valor 0	8.500	46.000	1.000.000	2.600.000	42.000
Valor 10	7.000	28.000	4.000.000	1.200.000	2.000

Tabla 6: Valores extremos de la función de utilidad.

La *Tabla 6* recoge los valores de los distintos criterios en cada uno de los extremos del intervalo [0, 10], para lo que nos hemos fijado en los valores más pequeños y más elevados en cada uno de los criterios.

Así obtenemos para cada uno de los criterios en las distintas alternativas unos valores que representan utilidades. Se incluyen a continuación las tablas de estos valores (*Tablas 7, 8 y 9*) correspondientes a cada uno de los tres decisores que hemos considerado, ya que para cada uno de ellos se han tomado ponderaciones distintas en los criterios.

Localizaciones	Costes Fijos	Coste de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva	SUMA Ponderada
Aznalcóllar	7,87	2,74	5,09	9,99	8,87	6,91
Antequera	1,45	8,26	9,68	9,67	0,23	5,86
Alcalá la Real	4,01	6,43	6,90	7,30	4,27	5,78
Olvera	5,30	7,08	7,14	5,52	7,65	6,54
Alquife	9,92	0,14	8,35	9,67	9,91	7,60
Osuna	7,50	8,99	1,08	1,12	6,12	4,96
Pesos	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	

Tabla 7: Utilidades para el político.

Localizaciones	Costes Fijos	Coste de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva	SUMA Ponderada
Aznalcóllar	7,87	2,74	5,09	9,99	8,87	7,60
Antequera	1,45	8,26	9,68	9,67	0,23	6,29
Alcalá la Real	4,01	6,43	6,90	7,30	4,27	6,02
Olvera	5,30	7,08	7,14	5,52	7,65	6,69
Alquife	9,92	0,14	8,35	9,67	9,91	8,70
Osuna	7,50	8,99	1,08	1,12	6,12	3,55
Pesos	0,07	0,07	0,29	0,29	0,29	

Tabla 8: Utilidades para el socioambiental.

Localizaciones	Costes Fijos	Coste de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máximo	Desutilidad Colectiva	SUMA Ponderada
Aznalcóllar	7,87	2,74	5,09	9,99	8,87	6,03
Antequera	1,45	8,26	9,68	9,67	0,23	5,31
Alcalá la Real	4,01	6,43	6,90	7,30	4,27	5,48
Olvera	5,30	7,08	7,14	5,52	7,65	6,35
Alquife	9,92	0,14	8,35	9,67	9,91	6,20
Osuna	7,50	8,99	1,08	1,12	6,12	6,75
Pesos	0,36	0,36	0,09	0,09	0,09	

Tabla 9: Utilidades para el empresario.

Además de las utilidades, en ellas recogemos las ponderaciones de los criterios (normalizadas) según la perspectiva del político, socioambiental o del empresario,

siendo las mismas que las utilizadas en el método PROMETHEE y, en la última columna aparece la suma ponderada correspondiente a cada localización. Puede observarse que tanto en el caso del político, como del socioambiental la localización con mayor suma ponderada es Alquife y en el caso del empresario, Osuna.

Los resultados que se han obtenido son coherentes respecto a las ponderaciones que se han considerado dependiendo de la perspectiva desde la que se ha analizado la situación. Alquife aparece como alternativa ganadora si se analiza desde el punto de vista del político, en el que los pesos están equilibrados y dicha alternativa presenta valores buenos en todos los criterios salvo en el coste de transporte y también, en el caso de considerarse desde el punto de vista del colectivo socioambiental en la que las ponderaciones de los criterios sociales son cuatro veces las de los económicos.

Por el contrario, Osuna aparece como mejor alternativa desde el punto de vista empresarial, presentando los peores valores en los criterios sociales.

A la vista de los resultados obtenidos con MAUT, si comparamos estas ordenaciones con las obtenidas con PROMETHEE, para cada uno de los escenarios considerados con sus pesos, vemos que las alternativas seleccionadas como las mejores en ambos métodos coinciden.

Debemos hacer constar que en PROMETHEE, medimos las intensidades de preferencia de una alternativa respecto de otra, con un valor máximo de uno aunque la diferencia entre las valoraciones de dos alternativas respecto de un criterio sea muy significativa, mientras que con MAUT esas diferencias siempre quedan valoradas porque como hemos dicho se considera la suma ponderada de las utilidades monocriterio.

Para concluir el análisis mediante la teoría de la utilidad Multiatributo, utilizamos los pesos de consenso y las ordenaciones que obtenemos nos proporcionan como primera alternativa Alquife. Aunque el resto de las posiciones no es demasiado relevante (pues nuestro interés está en la primera), la ordenación que se obtiene con MAUT es: Alquife, Aznalcóllar, Olvera, Antequera, Alcalá la Real y en última posición con la suma ponderada más baja, Osuna.

Esta misma situación se obtuvo con los pesos de consenso con PROMETHEE, pero donde las alternativas Olvera y Aznalcóllar cambian de orden con respecto a la ordenación que acabamos de ver con MAUT.

4. LOCALIZACIÓN DE MÚLTIPLES INCINERADORAS

La problemática a la que nos enfrentamos en este caso es la localización a lo sumo, de dos incineradoras en Andalucía, pero permitiendo que un mismo camión pueda recoger residuos de varios mataderos antes de llevarlos hacia la incineradora elegida, a diferencia del modelo anterior, en el que cada camión recogía de un solo matadero y hacía su ruta hacia la incineradora sin recoger los residuos de ninguno más. Pretendemos por tanto organizar ahora las rutas para cada camión con el punto de partida y llegada, la incineradora elegida, considerando la jornada del transportista, el tiempo de carga y descarga y teniendo en consideración ventanas de tiempo.

En cuanto a los aspectos técnicos del modelo, es decir, su formulación y resolución, hemos de señalar en primer lugar que nos enfrentamos a un problema multiobjetivo de Localización y Rutas (MLR) con cinco objetivos, con unas dimensiones tales que no ha sido objeto de estudio previamente. En este caso ya no sólo buscamos cuáles deben ser las mejores localizaciones para ubicar las incineradoras entre las seis localizaciones candidatas, sino que además queremos conocer cuáles deben ser las rutas óptimas (determinando qué mataderos se van a encontrar en ella) de forma que se minimicen tanto los criterios económicos como los sociales (los mismos que los utilizados en el epígrafe anterior)

En un problema de este tipo (MLR), lo que se persigue es localizar una serie de plantas (localizaciones) que han de satisfacer la demanda de una serie de clientes (nodos) de forma que se minimicen los costes fijos ocasionados por estas plantas/localizaciones y los costes de transporte debidos a satisfacer las demandas de cada uno de estos clientes/nodos, además de los costes sociales.

En la literatura, podemos encontrar problemas de localización y rutas (LR) con un único objetivo en el que se consideran sólo los costes económicos (véase, por ejemplo, Albareda-Sambola *et al.* 2005). Incluyendo varios objetivos, podemos encontrar algún trabajo relacionado con el problema de localización (Fernández y Puerto, 2003), pero no con el problema de rutas.

En la práctica, debido a la dificultad computacional para resolver este tipo de problema, aún en el caso de un sólo criterio económico, en ocasiones se ha recurrido a resolver independientemente el problema de localización y el de rutas.

Tal y como se señala en Albareda-Sambola *et al.* (2005), resolver en dos fases este problema: una primera para determinar las plantas que han de abrirse (localización) y una segunda para determinar las rutas óptimas para visitar cada uno de los clientes (Rutas), es en la mayor parte de los casos reales inoperante. Esto es debido a que en este tipo de problemas, el coste de transporte (es decir, el coste ocasionado por satisfacer la demanda de cada uno de los clientes) es en general determinante, lo cual no permite resolver separadamente el problema de localizar las incineradoras (según alguna aproximación de lo que serán los costes de transporte) y, a continuación resolver el problema de rutas para satisfacer los clientes, puesto que una mala elección de las localizaciones en la primera fase (donde no se tienen en cuenta las rutas) determina unos costes de transporte muy alejados del coste óptimo para la segunda fase. Es decir, para resolver eficientemente este problema ha de plantearse el modelo en una única fase, el modelo de localización y rutas. Por esta razón, en estos últimos años los problemas LR han tenido una especial atención en la literatura, como puede apreciarse en Min *et al.* (1998).

Para nuestra aplicación, tenemos 6 posibles localizaciones para las incineradoras y 53 mataderos los cuales nos generan 99 nodos, ya que aquellos mataderos que tienen más residuos, en el periodo de recogida considerado, que la capacidad de carga de un camión se desdoblan en tantos nodos como son necesarios. Además, nos enfrentamos a un problema con múltiples objetivos, lo cual requiere realizar múltiples resoluciones para obtener una aproximación de la frontera eficiente, donde cada resolución ofrecería un punto eficiente. Por otra parte, es un hecho conocido que para este tipo de problemas (problemas Multiobjetivo de Optimización Combinatoria) parte de estos puntos eficientes son no-soportados y su obtención mediante un método exacto requiere añadir restricciones al modelo original (véase por ejemplo Gandibleux y Freville, 2000), lo cual aumenta aún más su coste computacional. Por las condiciones reales del problema, hemos de añadir también una limitación en la duración en tiempo de cada una de estas rutas, puesto que la jornada laboral de los camioneros encargados de recoger estos residuos es de 8 horas y el tiempo de carga de media hora, lo que lo complica aún más.

El problema que consideramos en este capítulo difiere con respecto al que hemos considerado antes, en que el transporte de los residuos se realiza ahora mediante r rutas

(que conforman el conjunto R) realizadas por r vehículos con una capacidad máxima $CMax$ y en un tiempo menor que $TMax$.

Con respecto a la formulación de los distintos objetivos, aparecen variaciones en la que corresponde al coste de transporte, rechazo social y riesgo máximo, siendo la de los costes fijos y la desutilidad, igual a la que se ha especificado en la formulación general del problema.

La necesidad de la reformulación de los objetivos es debida al gran número de rutas posibles, lo que no es posible realizar de forma exhaustiva a priori por el gran coste que supondría, por ello es utilizado un procedimiento metaheurístico que construye la ruta y la evalúa internamente.

• **Minimizar el coste de transporte:**

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \text{Cost}(r), \text{ donde}$$

$r \in R$ son las rutas de transporte realizadas por vehículos de una capacidad máxima C y en un tiempo menor que $TMax$.

$\text{Cost}(r)$ nos indica el coste de la ruta r , con $r \in R$.

Este coste de transporte se ha calculado teniendo en cuenta que cada uno de los 99 nodos es visitado por un único camión que recoge los residuos del matadero correspondiente (como máximo la capacidad del camión) y los lleva a una única incineradora. Por otra parte, para calcular este coste se considera un coste imputado por kilómetro recorrido así como por tiempo de carga y teniendo en consideración ventanas de tiempo.

Hemos considerado que cada camión tiene como punto de partida la incineradora y cuando llega al primer matadero empezamos a contar tiempo en ruta finalizando este conteo cuando ha recogido los desechos del último matadero de la ruta, hasta un máximo de 8 horas para realizar estas recogidas.

• **Minimizar el rechazo social:**

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \text{rechazo}(r), \text{ donde}$$

$\text{rechazo}(r)$ nos determina el rechazo social de la ruta r , con $r \in R$.

Para calcular el rechazo social de cada ruta, $\text{rechazo}(r)$, sumamos los valores correspondientes al rechazo individual, medido por el número de habitantes de cada una

de las poblaciones h visitadas por la ruta r . Es decir, para el cálculo de este objetivo se consideran los centros de población por los que pasan los camiones, y el número de habitantes de dicha población.

• **Criterio de distribución del riesgo (minimizar el riesgo máximo):**

$$\text{Min Max}_{h \in H} \{ \text{riesgo}(h) \}, \text{ donde}$$

$\text{riesgo}(h)$ es el riesgo de cada población $h \in H$.

H es el conjunto de todas las poblaciones por las que atraviesan las rutas.

Para calcular el riesgo de cada población, $\text{riesgo}(h)$, se multiplica el riesgo producido por pasar una ruta r por la población h , por el número de rutas que pasan por esta población h .

Además, nuestro modelo presenta una serie de restricciones adicionales debido a la situación que representa. Así, tenemos en primer lugar limitado el número máximo de incineradoras que se pueden abrir dentro de las 6 posibles localizaciones, $p = 2$, y hemos de tener en cuenta tanto la capacidad máxima de cada camión, $CMax$ (para nuestro problema $CMax = 3500$ Kg), como el número máximo de horas que puede durar una ruta $TMax$ (para nuestro problema $TMax = 8$ h). Además, para computar el tiempo de cada ruta consideramos un tiempo de carga del camión, $TCar$, de media hora en cada cliente de la ruta. Por último, y como es lógico, deben ser recogidos e incinerados todos los residuos generados por los mataderos.

Con esta aproximación más racional, surge una gran cantidad de posibles combinaciones que aumentan de una manera considerable las dimensiones del problema dificultando la obtención de los datos necesarios para su resolución.

Así, mientras que los datos utilizados en cuanto a los costes fijos y la desutilidad siguen siendo los mismos que han sido utilizados en el caso de instalar una única incineradora, los referentes al coste de transporte, al rechazo social y al riesgo máximo deben ser calculados no sólo teniendo en cuenta las rutas entre los mataderos y las incineradoras sino también las existentes entre mataderos. Además, también se necesitan Tanto las distancias entre los 53 mataderos y las seis localizaciones para las incineradoras, como las distancias entre cualquier par de mataderos.

Tal y como se ha especificado en la formulación de los objetivos que se modifican en este problema, en el correspondiente al coste de transporte se ha contemplado el tiempo

de carga y descarga en 30 min., y como se tienen en cuenta ventanas de tiempo para ver el número de horas de la ruta en cuestión, se necesita conocer el tiempo que se tarda en recorrer la distancia entre cada par de mataderos, ya que como se ha comentado anteriormente el cómputo del tiempo que se emplea en la ruta comienza en el primer matadero que se visita, una vez que se realiza la carga, y acaba en el último una vez cargado el camión.

En segundo lugar, en el cálculo del rechazo social, nos encontramos con un importante problema y es que, debemos tener en cuenta todas las poblaciones por las que pueden pasar los camiones en las posibles rutas que pueden formarse combinando los 53 mataderos dos a dos, así como las ya existentes entre los mataderos y las incineradoras.

Una vez calculadas todas ellas, observamos cuáles son las poblaciones que atraviesan, el número de habitantes y se calcula el valor que nos proporciona el rechazo social. De esta manera, volvemos a tener una tabla de datos como la de las distancias y tiempos, pero en la que cada celda de cada columna representa el rechazo social de la ruta que parte de un matadero y llega a otro. Y por último, aquellas poblaciones que en la ruta tienen un mayor rechazo social nos proporcionan el riesgo máximo.

4.1 Soluciones eficientes del problema de localización y rutas (LR)

En general, los problemas de localización y rutas se caracterizan por los siguientes aspectos:

- ⊗ Según el tipo de plantas que se van a abrir:
 - *Primarias*, si estas plantas son el inicio y el final de las rutas de los vehículos.
 - *Secundarias*, cuando estas plantas son solamente depósitos intermedios.
- ⊗ Según el número de plantas que se han de localizar y si estas tienen limitada su capacidad o no.
- ⊗ Según el número de vehículos disponibles para realizar las rutas y si estos tienen limitada su capacidad o no.

Podemos encontrar en la literatura un método exacto para problemas de localización y rutas, en el caso de una única planta de tipo primario para el caso de vehículos sin límite en su capacidad en Averbakh y Berman, (1994) y en Albareda-Sambola *et al.* (2005), cuando lo que se persigue es la localización de una única planta de tipo

primario. Para el caso en que los vehículos tienen un límite de capacidad, en Chien (1993) se describe un método heurístico.

El problema de localización de varias plantas con vehículos sin límite de capacidad también ha sido considerado en la literatura. Plantas de tipo primario han sido localizadas mediante algoritmos heurísticos en Srivastava (1993) y con métodos exactos en ReVelle *et al.* (1991). Pero el caso de varias plantas y con una limitación en la capacidad de los vehículos, es más complejo y sólo unos pocos trabajos se pueden encontrar, como Albareda-Sambola *et al.* (2005) y todos ellos resuelven el caso de un problema de localización y rutas con un único objetivo.

En nuestro caso, queremos encontrar soluciones al problema en el que se tienen varias plantas que localizar y vehículos con una capacidad limitada. Sin embargo también nos enfrentamos a un problema con múltiples objetivos. Es por ello, que si utilizamos un método exacto, requerirá múltiples resoluciones para obtener una aproximación de la frontera eficiente, donde cada una de las resoluciones ofrecería un punto eficiente. Por otro lado es conocido que para este tipo de problemas (MOCO) un gran número de esos puntos eficientes son no soportados y obtenerlos mediante un método exacto requiere añadir restricciones adicionales al modelo (véase Gandibleux y Freville, 2000), incrementando por consiguiente el coste computacional del mismo.

En concreto el método que nosotros utilizamos, MOAMP (Caballero *et al.*, 2004) trata de adaptar una Búsqueda Tabú (Glover y Laguna, 1997) a la estructura particular del conjunto eficiente de un problema multiobjetivo.

Como resultado obtenemos un total de 498 soluciones eficientes de las que hemos resumido en esta primera tabla los valores de algunas soluciones eficientes, alcanzándose en algunas de ellas los valores ideales de algún objetivo.

Sol	Costes Fijos	Costes Transp.	Rechazo Social	Riesgo Máx.	Des. Col.	Azn.	Ant.	A. Real	Olvera	Alquife	Osuna
sol1	0	0,920191	0,181063	0,351022	0	0	0	0	0	53	0
sol394	0,955157	0	0,185976	0,27169	0,643199	14	0	39	0	0	0
sol43	1	0,283309	0	0,164585	1	7	46	0	0	0	0
sol56	0,964125	0,240969	0,082037	0	0,908003	0	34	0	0	19	0
sol59	0	0,914786	0,192998	0,351022	0	0	0	0	0	53	0
sol36	1	0,232679	0,00113623	0,164585	1	7	46	0	0	0	0
sol385	0	1	0,208893	0,0727469	0	0	0	0	0	53	0
sol345	0,0422783	0,207393	1	0,538518	0,335603	0	0	0	0	0	53
sol105	0,0422783	0,201212	0,914221	1	0,335603	0	0	0	0	0	53
sol79	1	0,0376672	0,0374269	0,27169	1	13	40	0	0	0	0

Tabla 10: Algunas soluciones eficientes del problema de localización y rutas.

En las seis primeras columnas de la tabla vemos ejemplos de soluciones eficientes y los valores normalizados de cada uno de los objetivos en cada una de las soluciones, significando el valor cero el alcance del mínimo de dicho objetivo, es decir, del valor ideal, mientras que, el valor uno supone conseguir el valor anti-ideal.

Por ello vemos que las soluciones **1** y **59** minimizan los costes fijos y la desutilidad, proporcionándonos un valor próximo al anti-ideal en los costes de transporte. Estas soluciones nos llevan a instalar la incineradora en Alquife (es la localización que menores tiene los costes fijos y la desutilidad colectiva). Encontramos 30 soluciones en la que se obtienen los valores ideales en ambos criterios y que por tanto sitúan la incineradora en dicha localidad.

La **sol394** es la única que minimiza los costes de transporte, pero por el contrario nos proporciona un valor muy próximo al anti-ideal en los costes fijos, con lo que en dicho objetivo se alcanzará uno de los valores más elevados. En este caso se instalan dos incineradoras, una en Aznalcóllar y otra en Alcalá la Real, donde 14 mataderos llevan los residuos a la primera y 39 a la segunda.

El valor ideal en los objetivos del rechazo social y riesgo máximo lo obtenemos por ejemplo, en la **sol43** y la **sol56** respectivamente y como antes alcanzan el valor más próximo al anti-ideal en los costes fijos y la desutilidad (en el primer caso caso y muy próximos a éste en el segundo). Tanto en la **sol43** como en la **sol56** se instalan dos incineradoras, Aznalcóllar y Antequera, en la primera y Antequera y Alquife en la segunda. En ellas, 7 y 46 mataderos llevan los residuos a las dos primeras localidades y 34 y 19 a las segundas.

Las soluciones en las que se obtienen el valor anti-ideal en los costes fijos y la desutilidad, como por ejemplo en la **sol36** y la **sol79**, nos llevan a la instalación de dos incineradoras, una en Aznalcóllar y la otra en Antequera, ocurriendo en 102 de las 498 soluciones del problema. Sin embargo, aquellas en la que se obtiene el valor anti-ideal en el coste de transporte, como en el caso de la **sol385**, nos proporcionan el mínimo valor tanto en los costes fijos como en la desutilidad, instalándose en este caso una única incineradora en Alquife.

En las dos soluciones restantes que quedan por comentar de la *Tabla 10*, en concreto en la **sol345** y **sol105**, se obtienen los valores máximos tanto en el rechazo social como en el riesgo máximo, y sin embargo valores próximos a 0 en los criterios económicos y

en la desutilidad, llevándonos en ese caso a la instalación de una única incineradora en Osuna (en ambos casos).

Ahora bien, continuando con el análisis de las soluciones que se han recogido en la *Tabla 10*, incluimos en la siguiente los valores que alcanzan en cada uno de los objetivos, incluyendo aquellas en la que se alcanzaban los valores ideales.

Sol	Costes Fijos	Costes de Transporte	Rechazo Social	Riesgo Máx.	Desutilidad
sol1	7011,8	35459	4,05131	0,600776	2350,9
sol394	15217,9	16477,3	4,09534	0,472955	31441
sol43	15603,2	22321,4	2,42876	0,300388	47578,1
sol56	15295	21448	3,16392	0,035208	43417,3
sol59	7011,8	35347,5	4,15826	0,600776	2350,9

Tabla 11: Valores que alcanzan los objetivos en algunas soluciones.

Hemos de resaltar que los valores que aparecen en los criterios del rechazo social y riesgo máximo están divididos por un millón.

Además, conocemos para cada una de las soluciones eficientes recogidas en la *Tabla 10*, el número de camiones necesarios para el transporte de los residuos desde todos los mataderos hacia la(s) incineradora(s), la carga media que lleva cada uno de ellos, el número de kilómetros en media que recorre cada uno y el tiempo medio que tarda en hacerlo, así como la ruta más larga que realiza un camión. Recogemos la información correspondiente a aquellas soluciones en las que se minimizan los objetivos.

Sol	Nº Camiones	Carga Media	Km Media	Horas Media	Ruta más Larga
sol1	68	3329,02	505,86	4,63064	986,5
sol394	69	3244,03	251,743	2,62343	544,2
sol43	83	2723,06	259,878	2,80743	577,8
sol56	73	2946,6	316,229	2,33995	673,2
sol59	68	3258,29	492,61	4,64387	986,5

Tabla 12: Camiones asignados a cada solución.

Ahora bien, en el conjunto de las 498 soluciones eficientes que obtenemos, en 248 de ellas se instalaría una única incineradora. De ellas, 22 soluciones localizan la incineradora en Aznalcóllar, 107 en Antequera, 30 en Alquife, 72 en Olvera, 17 en Osuna y por el contrario ninguna en Alcalá la Real. Incluimos un resumen con la distribución de las soluciones en las que se instalan dos incineradoras.

Ubicaciones para las incineradoras	Nº de soluciones
Aznalcóllar y Antequera	102
Aznalcóllar y Alquife	97
Antequera y Alquife	29
Aznalcóllar y Alcalá la Real	21
Olvera y Alquife	1

Tabla 13: Ubicaciones compartidas para las incineradoras.

Hemos visto y analizado cómo son algunas de las soluciones que se obtienen mediante el metaheurístico y que casi en la mitad de ellas se instala una única incineradora. Las restantes llevan a la instalación de dos incineradoras, donde el mayor número de soluciones compartidas contempla a Aznalcóllar, Antequera y Alquife como mejores localizaciones para la ubicación de las mismas. Por el contrario, Olvera sólo aparece una vez como solución compartida.

Con el metaheurístico hemos obtenido un conjunto de soluciones que conforman una aproximación de la frontera eficiente y que han quedado recogidas en este apartado. En muchas ocasiones dicha aproximación supone un conjunto de soluciones lo suficientemente grande como para que al decisor le resulte difícil elegir una entre ellas. En tales casos no sólo es insuficiente la determinación o aproximación de la frontera eficiente, sino que es necesario incorporar las preferencias del decisor o decisores para determinar cuál de estos puntos es el que mejor representa estas preferencias. Esta incorporación nos lleva a adentrarnos en el campo de los métodos interactivos en la búsqueda de una solución que tenga en cuenta dichas preferencias. Esta es la idea que vamos a afrontar en el siguiente epígrafe.

4.2 Solución del problema de localización y rutas mediante un método interactivo metaheurístico

A diferencia de otras técnicas de Programación Multiobjetivo en las que el decisor no muestra información sobre sus preferencias o la muestra en un principio, en los métodos interactivos el intercambio de información entre el decisor y el analista se realiza durante todo el proceso. Un aspecto fundamental de la toma de decisiones interactiva consiste en formular cuestiones al decisor, tras la presentación de las soluciones, para que acepte alguna de las dadas, o bien aporte alguna información adicional que se incorpora en el proceso de modelización y resolución.

Dada la importante cantidad de soluciones que se generaron con el MOAMP, la elección de una de ellas por parte del decisor supone un elevado coste de tiempo y

esfuerzo por lo que resulta aconsejable realizar un proceso de interacción con el mismo para ayudarle en su proceso de toma de decisiones. Por ello, en este trabajo presentamos al decisor diversa información sobre las soluciones obtenidas, de forma que, además de los valores que alcanzaban en ellas las distintas funciones objetivos, también le proporcionamos datos de diversas características importantes de las mismas con la intención de facilitar su elección. Con esta información interactuamos con el decisor con el propósito de que el conjunto de soluciones posibles sea cada vez más pequeño, hasta que el decisor sea capaz de tomar una decisión.

4.2.1 Método interactivo

En esta primera parte describimos un método interactivo para escoger entre el conjunto de soluciones de la frontera eficiente.

Los métodos interactivos en Programación Multiobjetivo, constituyen metodologías que conducen a un decisor a obtener la solución que más se ajusta a sus preferencias dentro de las soluciones posibles entre las que puede elegir. El aspecto fundamental de este tipo de métodos es que a lo largo del proceso de resolución, el decisor va manifestando sus preferencias a través de determinadas preguntas, de forma que dichas preferencias son incorporadas en el problema, para así conducirlo hasta su solución más preferida. Es decir, es un proceso de inclusión de preferencias que se realiza durante la resolución e influye en ella. Una revisión muy completa de este tipo de técnicas puede encontrarse en Miettinen (1999).

Sin embargo, la situación a la que nos enfrentamos es distinta: el proceso de resolución ha terminado en nuestro caso. Es decir, un metaheurístico ha generado una aproximación del conjunto eficiente sin tener en cuenta para nada las preferencias del DM y el problema ahora es elegir una de esas soluciones sin realizar ninguna nueva resolución. Esta distinta situación va a tener ventajas e inconvenientes. Por un lado no podremos aprovechar los métodos existentes en la literatura tal cual son, puesto que se basan en el hecho de que la interacción se hace durante la resolución y en nuestro caso la resolución ha terminado.

En cambio, como ventaja, en nuestro caso el método no va a depender en absoluto del método de resolución utilizado para generar el conjunto eficiente, puesto que la interacción se hace fuera de la resolución. Esto es importante en este momento, donde existe un auge enorme de metaheurísticos para la Programación Multiobjetivo, cada uno

de ellos con estructuras y estrategias muy distintas pero todos ellos ofreciendo como resultado un conjunto de puntos eficientes.

Asumimos las siguientes características en nuestro problema:

- Tenemos un conjunto de Ω_0 con M soluciones eficientes $\{s_i : i = 1, \dots, M\}$.
- Cada una de ellas es evaluada de acuerdo a los p criterios.
- Cada una de ellas es evaluada de acuerdo a los n aspectos relevantes (información adicional).

Esto es, cada solución consiste en un conjunto de p valores de las funciones objetivos y un conjunto de n valores relevantes ind_n :

$$s_i = (f_1, \dots, f_p, ind_1, \dots, ind_p)$$

Una vez que se obtienen las soluciones, con este método interactivo proporcionaremos dos herramientas para reducir el número de las soluciones posibles que pueden ser elegidas: un cluster y un filtrado. El decisor podría utilizar cualesquiera de ellas en cualquier iteración t , y obtendrá un sistema reducido de las soluciones Ω_t . Por otra parte, también proporcionamos alguna herramienta gráfica para ayudar al decisor a comprender las características de cada solución, mostrando no solamente los valores de las funciones objetivos en cada una de las soluciones exhibidas sino también de la información relevante.

⊗ Filtrado

Con esta primera herramienta permitimos al decisor eliminar aquel conjunto de soluciones que no le resulta interesante. Una vez que el decisor observa qué parte de la frontera eficiente no le resulta interesante puede usar un filtrado para eliminar aquellas soluciones que considere más lejanas. Se ha hecho simplemente proporcionando algunos niveles para los criterios o aspectos relevantes. Esta herramienta fue mostrada para ser usada en los primeros pasos del procedimiento, donde el decisor se da cuenta de que algunas soluciones extremas pueden no tener lógica en una situación real.

Entonces en cualquier iteración puede ser utilizada la herramienta siguiendo el siguiente esquema:

Iteración t: Filtrado

- Proporcione niveles altos o bajos a los criterios o aspectos relevantes deseados.
- Suprima las soluciones que no cumplan alguno de los nuevos niveles.
- Incluya las soluciones restantes en el conjunto Ω_{t+1} .

⊗ Cluster

Esta es la base del método interactivo. Lo que intentamos hacer es mostrar al decisor un número ($Cl > p$) de soluciones de referencia para que escoja la más preferida. Esa solución de referencia, en la iteración t constituirá el conjunto RS_t , y jugará el papel de representante de un cluster. El resto de soluciones serán clasificadas de acuerdo a este conjunto, esto es, cada solución será asignada al cluster cuyo representante esté más cercano a ella. Ahora el decisor elige un cluster y entonces se elimina aquel que está más lejos del elegido. De esa manera se eliminan las soluciones que están más lejos de las preferidas por el decisor. El resto de soluciones son incluidas en el conjunto Ω_{t+1} para la próxima iteración.

Iteración t: Cluster

I. Construye el conjunto de referencia RS_t .

- ↳ Elige las mejores soluciones para los p criterios.
- ↳ Inclúyelas en RS_t .
- ↳ Mientras que el número de soluciones es más pequeña que Cl , haz:
 - Escoge la solución que maximiza la distancia a RS_t .
 - Inclúyela en RS_t .
- ↳ Fin.

II. Permite que el decisor escoja la solución más preferida en RS_t .

III. Elimine las soluciones del cluster más lejano.

IV. Incluye el resto de soluciones en el conjunto Ω_{t+1} .

El método completo es como sigue:

Paso 1.

A partir del conjunto Ω_0 construye el conjunto de referencia inicial, RS_0 y lo muestra al decisor.

Paso 2.

Si el decisor desea hacer un cluster, ir al *Paso 3*.

Si el decisor desea hacer un filtrado, ir al *Paso 4*.

Si el decisor está satisfecho con la solución más preferida, ir al *Paso 5*.

Paso 3.

Realiza un cluster, construye el próximo conjunto de referencia RS_{t+1} , ir al

Paso 2.

Paso 4.

Realiza un filtrado, con el conjunto de soluciones restantes Ω_{t+1} , construye el siguiente conjunto de referencia RS_{t+1} e ir al *Paso2*.

Paso 5. Fin.

Esta es una herramienta que ayuda al decisor a escoger una solución sobre un amplio conjunto de soluciones eficientes. Puede ser utilizada con independencia del método que se haya utilizado para generar la frontera eficiente y puede ser adaptada a diferentes problemas.

4.2.2 Proceso interactivo

Para realizar la elección de una solución final al decisor se le mostraba, de cada solución, el valor alcanzado por las funciones objetivo y además una serie de datos como el número de incineradoras abiertas, el número de mataderos atendidos por cada planta o el número de camiones necesario para recoger los residuos. Además para cada una de las rutas que conformaban una solución, se disponía de información adicional como era los mataderos que la componían, la duración de la ruta y el número de kilos de cada camión. Pero debido al hecho de que cada solución llevaba asociada un número de rutas demasiado grande como para tener en cuenta todos los datos de cada una de ellas, decidimos proporcionarle un resumen de la información de más interés.

Así se ha preparado el programa de forma que le proporcionamos para cada solución evaluada, el valor de las funciones objetivos y los aspectos relevantes considerados.

El número de soluciones a enseñar en cada iteración (el parámetro CI) fue de 7. El software permite cambiar este parámetro en cualquier momento.

Nosotros mostramos los valores normalizados para las funciones objetivo en el intervalo $[0, 1]$, donde el valor 0 representa el mínimo valor para ese objetivo en todo el conjunto de soluciones, mientras que el valor 1 es el más grande. De esta forma, el decisor puede saber fácilmente si una solución es buena o no en un objetivo, puesto que valores pequeños son buenos, valores cercanos a 1 son malos y valores intermedios representan un compromiso.

Así, en cada iteración el decisor podía visualizar una pantalla como la que se muestra en la siguiente figura:

The screenshot shows a software interface with several panels:

- Datos:** Includes a 'Leer Datos' button, 'Número de sol: 498', 'Mostrar: 7', 'Progreso: Iter: 0', and an 'Atrás' button.
- Iterar:** Includes an 'Iterar' button, 'Mostrar: 7', 'Seleccionada:', and '# Ref Set: 7'.
- Cluster Table:**

Cluster	Repres.	Cardinal
1	Sol1	13
2	Sol394	118
3	Sol43	74
4	Sol56	58
5	Sol59	93
6	Sol438	35
7	Sol238	107
- Cotas/Pesos:** Includes input fields for 'Costes', 'Transporte', 'Rechazo', 'Riesgo Max', and 'Desutilidad', all set to '1'. It has 'Filtrar' and 'Actualizar' buttons, and a 'Modo' section with 'Filtrar' (selected) and 'Cambiar Pesos' options.
- Main Data Table:**

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesgo Max	Desutilid.	Incin. 1	Incin. 2	Nº Cam	Carga Med	Km Med	Horas Med	Más Larga
Sol1	0.000	0.920	0.181	0.351	0.000	Alq 53		68	3329.02	505.86	4.63	986.50
Sol394	0.955	0.000	0.186	0.272	0.643	Azn 14	Alc 39	69	3244.03	251.74	2.62	544.20
Sol43	1.000	0.283	0.000	0.165	1.000	Azn 7	Ant 46	83	2723.06	259.88	2.81	577.80
Sol56	0.964	0.241	0.082	0.000	0.908	Ant 34	Alq 19	73	2946.60	316.23	2.34	673.20
Sol59	0.000	0.915	0.193	0.351	0.000	Alq 53		68	3258.29	452.61	4.64	986.50
Sol438	0.042	0.197	0.918	1.000	0.336	Dsu 53		68	3183.56	301.89	3.05	889.60
Sol238	0.148	0.290	0.128	0.365	0.856	Ant 53		68	3126.30	323.16	3.33	889.60

Gráfico 16: Pantalla inicial del software.

Para este proceso interactivo contamos con las preferencias de dos decisores que lo abordan partiendo de opiniones distintas y que a medida que van interactuando con el programa y seleccionando soluciones según sus preferencias llegan a una misma solución final.

Una vez que le mostramos los primeros 7 representantes a nuestro primer decisor explicándole los valores que toman cada uno de ellos en los distintos objetivos, nos empieza a comentar sus preferencias, que se muestran bajo un punto de vista empresarial, sin dejar de lado los aspectos sociales.

Partiendo de las 498 soluciones, en un primer momento lo que analiza en una solución es el coste de transporte, ya que cree que es el criterio más importante por ser un coste que permanece en el tiempo, el cual puede incrementarse en el caso de que la incineradora fuera privada, así que cuanto menos sea mejor. Antepone este coste a los costes fijos porque considera que éstos no le afectan tanto.

Le mostramos también los valores no normalizados de los criterios para que vea a qué cantidades nos referimos. Nos confirma que al ser los costes de transporte mucho más elevados que los fijos, este es el criterio que hay que controlar más para que la inversión realizada sea rentable.

Considera, en segundo lugar, el rechazo social de las poblaciones por las que transcurren los camiones, en tercer lugar mira los costes fijos y el riesgo máximo, y en último lugar la desutilidad. La menor importancia se la da a este objetivo debido a que por encima de cómo se puedan ver afectadas las poblaciones en el entorno, que en algunos casos no son muchas, está la motivación del empleo que se puede crear en la zona por la instalación de la incineradora. Por ejemplo, cree que tanto en Aznalcóllar

como en Alquife al ser poblaciones que poseen un sistema industrial contaminante y con pocos habitantes presentarán una menor oposición a la instalación de una incineradora frente a las compensaciones económicas que puedan derivarse, en otros aspectos sociales. Sin embargo, cree que la oposición social puede ser muy fuerte en el caso de Alcalá la Real y Olvera que tienen un sistema industrial adaptados a los recursos naturales o en el caso de Antequera por tener un gran número de habitantes.

Conforme a sus preferencias pasamos a seleccionar el primer representante. Como por encima de todo prima el transporte seleccionó aquel representante con el menor valor en el coste de transporte.

Sol394	Costes F.	Transporte	R. Social	R. Máx	Desutilidad
<i>Valores Obj</i>	0.955157	0	0.185976	0.27169	0.643199
<i>Plantas</i>	Aznalc.	Al. Real			
<i>Nº mataderos</i>	14	39			
<i>Inf. Adicional</i>	Camiones	Carga Med.	Km. Med	Horas. Med	Máx. Dist.
<i>Valor</i>	69	3244.03	251.743	2.62343	544.2

Tabla 14: Características de la sol394.

Una vez seleccionada, iteramos y volvemos a tener 7 representantes que le mostramos de nuevo. Ahora contamos con 485 soluciones.

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesgo Max	Desutilid.	Incin. 1	Incin. 2	Nº Cam	Carga Med	Km Med	Horas Med	Más Larga
Sol394	0.955	0.000	0.186	0.272	0.643	Azn 14	Alc 39	69	3244.03	251.74	2.62	544.20
Sol59	0.000	0.915	0.193	0.351	0.000	Alq 53	-	68	3258.29	492.61	4.64	986.50
Sol82	0.955	0.001	0.182	0.272	0.643	Azn 14	Alc 39	69	3224.88	253.08	2.63	544.20
Sol43	1.000	0.283	0.000	0.165	1.000	Azn 7	Ant 46	83	2723.06	259.88	2.81	577.80
Sol56	0.964	0.241	0.082	0.000	0.908	Ant 34	Alq 19	73	2946.60	316.23	2.34	673.20
Sol80	0.000	0.958	0.219	0.069	0.000	Alq 53	-	70	3117.30	456.48	3.60	986.50
Sol438	0.042	0.197	0.918	1.000	0.336	Osu 53	-	68	3183.56	301.89	3.05	889.60

Tabla 15: Resultados de la primera iteración.

En primer lugar se queda de nuevo con la sol394 y después con la sol56, que aunque el coste de transporte sea mayor en ella que en la sol82 y en la 438, éstas últimas tienen un mayor rechazo social (que era su segunda prioridad). Asumiría un pequeño aumento en el transporte con el fin de que no aumente mucho el rechazo social.

Después de analizarlas bien, se decide finalmente por la sol394 y volvemos de nuevo a iterar. Eliminamos 15 soluciones en esta iteración.

Como los representantes se mantienen salvo uno, decide imponer cotas a alguno de los criterios con el fin de poder ver otras posibilidades, ya que si no cede en el coste transporte, la única solución en la que obtiene el menor valor es en la 394.

Por tanto las cotas que asignó fueron 0.1 en coste de transporte, rechazo social y riesgo máximo, manteniendo costes fijos y desutilidad en 1. La idea es aumentar

ligeramente el coste de transporte con el fin de que el rechazo social y el riesgo máximo disminuyan. Se filtra el archivo y se obtienen de nuevo los 7 representantes que se muestran a continuación y con 23 soluciones del total de partida.

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesgo Max	Desutilid.	Incin. 1	Incin. 2	Nº Cam	Carga Med	Km Med	Horas Med	Más Larga
Sol230	0.852	0.094	0.090	0.056	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3083.25	286.30	2.69	670.40
Sol476	1.000	0.039	0.040	0.037	1.000	Azn 12	Ant 41	72	3003.85	246.78	2.75	577.80
Sol25	1.000	0.097	0.020	0.096	1.000	Azn 10	Ant 43	76	2795.69	240.99	2.43	577.80
Sol89	1.000	0.051	0.035	0.037	1.000	Azn 12	Ant 41	73	3028.40	257.97	2.74	577.80
Sol319	0.852	0.098	0.086	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	71	3209.72	290.81	2.93	670.40
Sol77	1.000	0.067	0.027	0.071	1.000	Azn 13	Ant 40	73	3000.72	249.55	2.83	577.80
Sol109	1.000	0.089	0.022	0.071	1.000	Azn 13	Ant 40	74	3006.79	245.58	2.89	577.80

Tabla 16: Valores de los representantes después de fijar las cotas.

Las soluciones 476, 89, 77 y 109 las descarta, pues aunque tienen en el rechazo social y riesgo máximo valores menores que en la sol394, no ocurre así en el coste de transporte. Y aunque estuviera dispuesto a ceder ese tramo tan pequeño de valor en el transporte los costes fijos y la desutilidad son los peores que se pueden obtener.

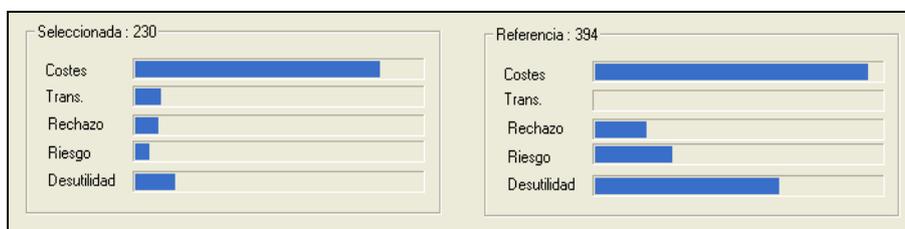


Gráfico 17: Comparativa de la sol230 y sol394.

Entre las restantes, comparándolas con la 394, se decide por la 230 antes que la 319 ya que la primera tiene el coste de transporte ligeramente más bajo. En la tabla siguiente se muestran las características de la solución seleccionada por nuestro decisor.

Sol230	Costes F.	Transporte	R. Social	R. Max	Desutilidad
<i>Valores Obj</i>	0.852017	0.0938385	0.0897856	0.0563505	0.143977
<i>Plantas</i>	Aznalc.	Alquife			
<i>Nº mataderos</i>	15	38			
<i>Inf. Adicional</i>	Camiones	Carga Med.	Km. Med	Horas. Med	Máx. Dist.
<i>Valor</i>	70	3083.25	286.296	2.69119	670.4

Tabla 17: Características de la sol230.

Una vez que se ha quedado con la sol230 se realiza una nueva iteración con las mismas cotas que antes y se le muestra el siguiente cluster, en el que ya quedan 21 soluciones.

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesgo Max	Desutilid.	Incin. 1	Incin. 2	Nº Cam	Carga Med	Km Med	Horas Med	Más Larga
Sol230	0.852	0.094	0.090	0.056	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3083.25	286.30	2.69	670.40
Sol319	0.852	0.098	0.086	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	71	3209.72	290.81	2.93	670.40
Sol476	1.000	0.039	0.040	0.037	1.000	Azn 12	Ant 41	72	3003.85	246.78	2.75	577.80
Sol109	1.000	0.089	0.022	0.071	1.000	Azn 13	Ant 40	74	3006.79	245.58	2.89	577.80
Sol89	1.000	0.051	0.035	0.037	1.000	Azn 12	Ant 41	73	3028.40	257.97	2.74	577.80
Sol359	0.852	0.093	0.094	0.069	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3167.01	290.08	2.72	670.40
Sol444	1.000	0.051	0.033	0.071	1.000	Azn 13	Ant 40	73	3000.72	248.31	2.83	577.80

Tabla 18: Representantes en esta iteración.

Las soluciones 476, 89, 109, 444 y 359 las descarta ya que aunque el transporte, el rechazo social y el riesgo máximo sean más pequeños que en la sol230, ésta es mejor en costes fijos y desutilidad, según se puede apreciar en el *Gráfico 29*.

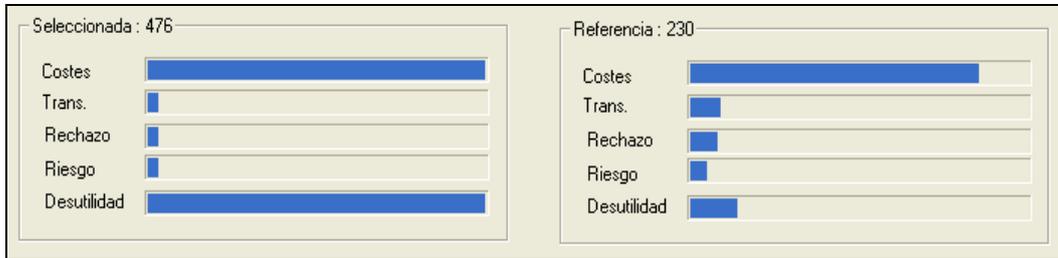


Gráfico 18: Comparativa de la sol476 y sol230.

Después de analizar las dos restantes, se sigue quedando con la 230 antes que con la 319 que tiene un coste de transporte ligeramente mayor. En la siguiente iteración llega más allá.

Decide poner una cota más baja a los costes fijos manteniendo las demás como estaban, es decir, 0.86, 0.1, 0.1, 0.1 y 1. La razón de que fije la cota de los costes fijos en 0.86 es para seguir manteniendo las soluciones que nos están apareciendo con transporte, rechazo y riesgo por debajo de nuestros valores e intentar que alguna solución más se caiga de la tabla. De esa manera al filtrar de nuevo el archivo nos quedamos con seis clusters.

Sol	Costes	Transporte	Rechazo	Riesgo Max	Desutilid.	Incin. 1	Incin. 2	Nº Cam	Carga Med	Km Med	Horas Med	Más Larga
Sol230	0.852	0.094	0.090	0.056	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3083.25	286.30	2.69	670.40
Sol469	0.852	0.085	0.090	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3220.74	286.11	2.92	670.40
Sol319	0.852	0.098	0.086	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	71	3209.72	290.81	2.93	670.40
Sol359	0.852	0.093	0.094	0.069	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3167.01	290.08	2.72	670.40
Sol430	0.852	0.097	0.089	0.069	0.144	Azn 15	Alq 38	71	3092.75	293.36	2.69	685.10
Sol448	0.852	0.091	0.088	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	71	3209.72	288.71	2.92	670.40
Sol469	0.852	0.085	0.090	0.095	0.144	Azn 15	Alq 38	70	3220.74	286.11	2.92	670.40

Tabla 19: Valores de los seis últimos representantes.

Al observar los valores de los seis representantes directamente se decide por aquella solución que tiene más pequeño el coste de transporte, **sol469**, aunque comparándola con la que anteriormente había seleccionado según vemos en el gráfico siguiente, ésta tiene el riesgo máximo más pequeño.

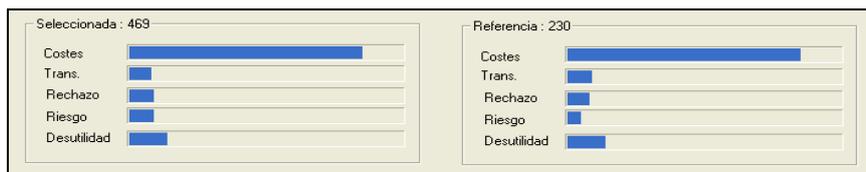


Gráfico 19: Comparativa de la sol469 y sol230.

Ya en esta última iteración todos los representantes obtenidos nos proporcionan como localizaciones para las incineradoras Aznalcóllar y Alquife. Así que su decisión final **Sol469**.

Sol469	Costes F.	Transporte	R Social	R. Máx.	Desutilidad
<i>Valores Obj</i>	0.852017	0.0847586	0.0901548	0.0954517	0.143977
<i>Plantas</i>	Aznalc.	Alquife			
<i>Nº mataderos</i>	15	38			
<i>Inf. Adicional</i>	Camiones	Carga Med.	Km. Med	Horas. Med	Máx. Dist.
<i>Valor</i>	70	3220.74	286.11	292.119	670.4

Tabla 20: Características de la sol469.

El segundo decisor nos muestra su preferencia por aquellas soluciones que seleccionan dos incineradoras puesto que considera que si alguna vez se presentan problemas que imposibilitan el funcionamiento de una se puede desviar los residuos a la otra. Con esta información, eliminamos todas las soluciones que localizan una sola incineradora, quedándonos con 250 y tras ello le volvemos a mostrar los clusters.

Tras ello, y dado que sus preferencias iban por el criterio de la desutilidad seguido muy de cerca por el coste de transporte, elige quedarse con la solución que presentaba el mínimo de la desutilidad. Sus preferencias por esta solución fueron justificadas por el hecho de que da mucha prioridad a los pueblos cercanos a la incineradora, puesto que se verán afectadas por el mal olor y por la gran cantidad de camiones. Es verdad que dichas poblaciones se van a ver compensadas por una generación directa e indirecta de empleo pero, por otra parte, cuanto mayor sea la población y, por tanto, mayor la desutilidad, dichos efectos multiplicadores son menores siendo mayores en poblaciones pequeñas y deprimidas que son las que van a presentar menores desutilidades. Por ello considera que no aceptará ninguna solución que excediera un valor de 0.25 en dicho criterio. Así que se realiza un nuevo filtrado y se le muestra el siguiente cluster.

Entre los representantes mostrados el decisor vuelve a elegir aquella solución que presenta menor desutilidad, pero ahora se centra en los costes. Considera que es más importante el coste de transporte por permanecer en el tiempo frente a los costes fijos que cree que afectan en menor medida.

Tras realizar varios cluster, las soluciones van siendo muy parecidas en cuanto a los valores de esos dos objetivos, por lo que el decisor empieza a fijarse en la información complementaria referente a la ruta más larga y la carga media eligiendo las que tenían

valores más pequeños. De esa manera se decantó por la siguiente solución, que coincide en todos los aspectos con la seleccionada por el primer decisor.

Sol245	Costes F.	Transporte	R Social	R. Máx.	Desutilidad
<i>Valores Obj</i>	0.852017	0.0847586	0.0901548	0.0954517	0.143977
<i>Plantas</i>	Aznalc.	Alquife			
<i>Nº mataderos</i>	15	38			
<i>Inf. Adicional</i>	Camiones	Carga Med.	Km. Med	Horas. Med	Máx. Dist.
<i>Valor</i>	70	3220.74	286.11	292.119	670.4

Tabla 21: Características de la sol245.

Aunque ambos decisores partieran de preferencias distintas, coinciden en parte en los aspectos económicos, dando ambos más importancia a los costes de transporte que a los costes fijos por las razones anteriormente expuestas, del mismo modo que también procuran que el rechazo social sea pequeño. Lo cierto, es que al ir interactuando e introduciendo preferencias el número de soluciones va disminuyendo considerablemente y nos lleva finalmente a la instalación de dos incineradoras en Aznalcóllar y Alquife.

Es importante resaltar lo útil que resulta utilizar el proceso interactivo ya que al ir incorporando las preferencias del decisor se puede ir seleccionando en cada paso las soluciones que considera más adecuadas de la frontera eficiente.

5. CONCLUSIONES

Conocida la problemática existente sobre la incineración de los residuos sólidos animales que preocupa a muchos países y en particular a las comunidades autónomas españolas, tratamos en este trabajo de determinar la mejor localización de hasta un máximo de dos incineradoras de residuos sólidos animales entre una serie de localizaciones andaluzas, a la que llegarían los desechos semanales de los 53 mataderos registrados oficialmente en Andalucía, recogidos mediante camiones.

En primer lugar se han seleccionado las localizaciones donde se quieren ubicar las incineradoras analizando primero la situación en Andalucía, teniendo en cuenta el número de mataderos por provincia, volumen de residuos generados en ellos y por su situación geográfica, entre otros motivos. La resolución del problema que planteamos se llevará a cabo mediante técnicas multicriterio.

Una vez determinadas las posibles ubicaciones para las incineradoras, planteamos cuáles van a ser los objetivos y restricciones adecuados, revisando previamente algunos

modelos ya existentes en la literatura. En cuanto a los criterios utilizados se han tenido en cuenta por un lado criterios económicos, como son los costes fijos (coste de instalación y mantenimiento de la incineradora) y el coste de transporte que supone el traslado de los residuos de los mataderos hacia las incineradoras.

Por otro lado, se han considerado también criterios sociales para poder determinar cómo puede influir la población en la instalación de las incineradoras. Entre ellos, el rechazo social correspondiente a las poblaciones por donde pasan los camiones en su ruta hacia la(s) incineradora(s), el rechazo de las poblaciones cercanas al lugar donde se instalaría la misma, denominado desutilidad colectiva y como medida de equidad, el riesgo máximo que corresponde a aquella población que se ve más afectada por el transporte de los residuos para su quema posterior.

Una vez formulados los cinco objetivos y las restricciones necesarias, el problema multiobjetivo resultante (debido al carácter de los criterios, algunos en conflicto) se ha afrontado desde dos puntos de vista. En primer lugar se ha buscado la ubicación de una incineradora enfrentándonos a un problema multicriterio discreto y, posteriormente, la ubicación de hasta un máximo de dos incineradoras resolviendo el problema mediante métodos metaheurísticos.

En el caso de buscar la ubicación de una única incineradora a la que llegarían todos los residuos, nos enfrentamos a un problema multicriterio discreto, en el que se ha considerado que cada camión recoge los desechos del matadero que le corresponde y los lleva a la incineradora elegida. Se ha resuelto mediante, el método PROMETHEE y, la Teoría de la Utilidad Multiatributo.

Como no se disponía de un decisor real que proporcionara sus preferencias, en la resolución se han considerado tres tipos de decisores, representantes del colectivo político, socioambiental y empresarial, que de alguna manera puedan recoger distintas posturas frente a los objetivos planteados. Con PROMETHEE hemos obtenido unas ordenaciones totales que se complementan con un análisis gráfico mediante el plano GAIA y un análisis de sensibilidad y robustez de los pesos. En el caso de los dos primeros colectivos las ordenaciones coinciden en su primera alternativa siendo ésta distinta de la obtenida en el tercer colectivo. Una vez analizados los pesos, se llega a la conclusión de que son más robustos en el caso del colectivo político y del socioambiental que del empresarial.

Posteriormente con MAUT realizamos un análisis más consistente con el fin de expresar las preferencias del decisor en función de la utilidad que le supone. Las soluciones obtenidas para los tres tipos de decisores coinciden con las que proporciona PROMETHEE, con las mismas ponderaciones en cada uno de los escenarios. Hasta aquí, el análisis del modelo discreto se ha realizado desde el punto de vista de tres colectivos con preferencias distintas sobre los objetivos. Nos pareció interesante efectuarlo bajo la perspectiva de un decisor que representara un consenso entre los tres, mediante PROMETHEE y MAUT; así obtuvimos unas ordenaciones que nos proporcionaban como primera alternativa, la misma que la obtenida para el colectivo político y el socioambiental.

PROMETHEE y MAUT se han aplicado con el fin de analizar cómo se comporta el modelo discreto y comparar las ordenaciones que ambos métodos proporcionan.

Una primera aproximación al análisis del modelo discreto mediante las dos técnicas anteriormente mencionadas, bajo la perspectiva de un solo decisor, ha sido publicada en la revista *Investigación Operacional*⁴.

Sin embargo, en el caso de que se localicen hasta un máximo de dos plantas incineradoras, se pierde el carácter discreto del problema. Del mismo modo, los residuos serán transportados a través de rutas, que atravesarán distintas poblaciones, hacia la incineradora elegida.

Posteriormente afrontamos la instalación de hasta un máximo de dos incineradoras desde un punto de vista más realista, permitiendo que un mismo camión pueda recoger los desechos de varios centros, teniendo en cuenta la capacidad del mismo y la jornada del transportista. Así se han organizado las rutas para cada camión con el punto de partida y de llegada en la incineradora elegida.

Por tanto, hemos planteado un problema multiobjetivo de localización y rutas, con cinco objetivos, con unas dimensiones no estudiadas anteriormente, siendo resuelto con un método metaheurístico, MOAMP, especialmente adaptado al mismo, usando una estructura de vecindario basada en algunos movimientos clásicos en la literatura para rutas de vehículos y algunos otros movimientos específicos desarrollados por Albareda-Sambola *et al.* (2005) para este tipo de problemas. Actualmente no hay trabajos en localización y rutas con varios objetivos como los que se han planteado en este trabajo.

⁴ Véase Guerrero *et al.* (2005)

En la resolución de este problema utilizamos un procedimiento metaheurístico que construye la ruta y la evalúa internamente debido a la gran complejidad y el coste que supondría el cálculo de todas las rutas. La aplicación mediante un procedimiento metaheurístico, MOAMP basado en Búsqueda Tabú, al problema de localización y rutas en el caso de Andalucía, ha sido aceptada para su publicación en la revista *European Journal of Operational Research*.⁵

Con este algoritmo metaheurístico, se han obtenido 498 soluciones eficientes, entre las que mostramos en este trabajo algunas de las más representativas, entre ellas, aquellas en la que se obtienen los mejores valores en cada uno de los objetivos.

Una vez conocida la frontera eficiente con el metaheurístico, dada el gran número de soluciones, la elección de una de ellas por parte de un decisor puede suponer un gran esfuerzo y un elevado coste de tiempo, por lo que se ha aplicado un proceso interactivo, que ha sido diseñado e implementado para este problema, en el que el decisor va expresando sus preferencias a lo largo del mismo, con el fin de ir reduciendo la frontera eficiente hasta quedarse con aquella solución que mejor se adecue a sus preferencias.

En la aplicación del interactivo contamos con dos decisores externos, a los que se les ha mostrado, aparte de los valores de las funciones objetivos, cierta información adicional. Cada uno de ellos fue proporcionando información (desde puntos de vista diferente en algunos criterios e independientemente uno de otro) que se fue incorporando en el proceso de forma que en cada paso seleccionaba las soluciones que consideraba más adecuadas de la frontera eficiente. Al finalizar el proceso coincidían los dos en la misma solución.

El método interactivo se aplica una vez que se ha obtenido la frontera eficiente, independientemente del método de resolución para la obtención de la misma. Existen en este momento una gran cantidad de metaheurísticos que generan el conjunto eficiente, lo que hace que los métodos interactivos cobren importancia. Es más, hay pocas referencias sobre metaheurísticos interactivos, por lo que queda abierta una línea de trabajo muy amplia.

En resumen, el objetivo principal de este trabajo era la ubicación de incineradoras de residuos MER entre una serie de localizaciones andaluzas, que se ha resuelto bajo un enfoque multicriterio. Partiendo de un modelo base, primero se ha resuelto el problema

⁵ Véase Caballero *et al.* (2005)

discreto y posteriormente reformulando algunos objetivos, un problema de localización y rutas, más complejo que los anteriores.

En definitiva se ha tratado un problema de dimensiones y características no considerado anteriormente, lo que hace que pueda servir de base para posteriores estudios en los que se determine la instalación de plantas de tratamientos de otro tipo de residuos, en otros lugares y a los que se pueda adecuar los criterios necesarios para ello.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBAREDA-SAMBOLA, M., DÍAZ, J., FERNÁNDEZ, E. (2005): A Compact Model and Tight Bounds for a Combined Location\Routing Problem. *Computers and Operations Research*, **32**, 3, pp. 407-428.
- AVERBAKH, T., BERMAN, O. (1994): Routing and Location-Routing p-Delivery Men Problems on a Path. *Transportation Science*, **28**, pp. 162-166.
- BRANS, J.P, MARESCHAL, B., VINCKE, PH. (1984): *PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in MCDM*. En Brans, J. P. (eds.) *Operational Research* 84. North Holland, pp. 447-490.
- BRANS, J.P, VINCKE, PH. (1985): A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for MCDM. *Management Science*, **31**, 6, pp. 647-656.
- BRANS, J. P, MARESCHAL, B., VINCKE, PH. (1986): How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method. *European Journal of Operational Research*, **24**, pp. 228-238.
- CABALLERO, R., GANDIBLEUX, X., MOLINA, J. (2004): MOAMP- A Multiobjective Metaheuristic Using an Adaptative Memory Procedure. *European Journal of Operational Research*. *In press*.
- CHIEN, T. (1993): Heuristic Procedures for Practical Sized Uncapacited Location-Capacited Vehicles Routing Problems. *Decision Sciences*, **24**, pp. 995-1021.
- FERNÁNDEZ, G. M., ESCRIBANO, M. C., CENTENO, M. C. (2000): Análisis de Robustez Aplicado a un Problema de Decisión Multicriterio en el Ámbito de la Defensa Nacional. *Actas del Congreso sobre Técnicas de Ayudas a la Decisión en la Defensa*, pp. 399-419. *Secretaría General Técnica del Ministerio de Defensa. Madrid*.
- FERNÁNDEZ, E., PUERTO, J. (2003): Multiobjective Solution of the Uncapacitated Plant Location Problem. *European Journal of Operational Research*, **145**, pp. 509-529.

- GANDIBLEUX, X., FREVILLE, A. (2000): Tabu Search Based Procedure for Solving the 0-1 Multiobjective Knapsack Problem: the Two Objectives Case. *Journal of Heuristics*, **6**, pp. 361-383.
- GIANNIKOS, I. (1998): A Multiobjective Programming Model for Locating Treatment Sites and Routing Hazardous Wastes. *European Journal of Operational Research*, **104**, pp. 333-342.
- GLOVER, F., LAGUNA, M. (1997): *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers. Boston.
- GUERRERO, F.M., PARALERA, C., CABALLERO, R., GONZÁLEZ, M., MOLINA, J. (2005): Location of Specific Risk Material Incineration Plants in Andalusia using a Multicriteria Approach. *Investigacion Operacional*, **26**, 2, pp. 135-141.
- LINARES, P., ROMERO, C. (2002): Aggregation of Preferences in an Environmental Economics Context: A Goal-Programming Approach. *Omega*, **30**, pp. 89-95.
- MARSH, M., SCHILLING, D.A. (1994): Equity Measurement in Facility Location Analysis: A Review and Framework. *European Journal of Operational Research*, **74**, pp. 1-17.
- MIETTINEN, K. (1999): *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- MIN, H., JAYARAMAN, V., SRIVASTAVA, R. (1998): Combined Location Routing Problems: A Synthesis and Future Research Directions. *European Journal of Operational Research*, **108**, pp. 1-15.
- REVELLE, C.S., COHON, J., SHORBYS, D. (1991): Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes. *Transportation Science*, **25**, 2, pp. 138-145.
- ROY, B. (1998): A Missing Link in OR-DA: Robustness Analysis. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, **23**, 3, pp. 141-160.
- SRIVASTAVA, R. (1993): Alternate Solution Procedures for the Location Routing Problem. *Omega*, **21**, pp. 497-506.