

Localización de centrales de generación de energía eléctrica a partir de Biomasa procedente del olivar

Flor María Guerrero Casas

Ana F. Carazo

Universidad Pablo de Olavide

Recibido, Enero de 2005; Versión final aceptada, Junio de 2005.

PALABRAS CLAVE: Biomasa, Energía eléctrica, localización, Multicriterio, Olivar.

KEYWORDS: Allocation, Biomass, Electrical Energy, Multicriteria, Olive.

RESUMEN

El futuro energético mundial pasa por una progresiva sustitución de las energías fósiles por energías renovables. En consecuencia, la cuestión de cómo lograr un aumento de la producción de estas últimas en la forma más eficiente y racional posible es un tema del enorme interés. En este contexto, en este estudio se presenta un modelo multicriterio de programación por metas, diseñado para ayudar a decidir la localización de centrales generadoras de energía eléctrica a partir de biomasa. El trabajo incluye una aplicación práctica al caso de Andalucía que ilustra la utilidad del modelo propuesto.

ABSTRACT

The energetic future of the world requires a progressive substitution of fossil energies by renewable ones. Consequently, the question of how to obtain this increase of energy production using renewable sources, in a way as much efficient and rational as possible, is of great relevance. In this context, this study presents a multicriteria goal programming model designed to help to decide the best location for biomass electric plants. The work includes an application in the region of Andalusia (Spain), illustrating the usefulness of the proposed model.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo acuciado por graves problemas medioambientales, en el que cada día son más necesarias nuevas aplicaciones energéticas que contribuyan al denominado desarrollo sostenible, la biomasa está ocupando, especialmente en los últimos años, un importante papel, tanto por su carácter de energía renovable y no contaminante, como por la posibilidad de crear un mercado interno que minimice la dependencia de fuentes energéticas importadas de países externos. Así, la biomasa puede ayudar a solventar gran parte de los problemas que presenta el actual sistema

de producción, distribución y consumo energético, basado fundamentalmente en el uso de combustibles fósiles. Entre estos problemas destacan los efectos nocivos procedentes de las emisiones de CO₂ y otros gases que son perjudiciales tanto para la población como para el Medio Ambiente, su carácter de recurso escaso y no renovable, y su concentración en determinadas zonas, provocando la dependencia de unos países frente a otros.

Como consecuencia de todo ello, y ante la dificultad de actuar por el lado de la demanda en el mercado energético, parece razonable que cualquier intento racional de resolver estos problemas debe basarse en un uso extensivo de las energías renovables, idea que ha comenzado a plasmarse en la normativa comunitaria, estatal y a nivel de comunidades autónomas.

En el ámbito europeo, una de las principales actuaciones en este sentido fue la aprobación del Programa Altener (1993), el cual fomenta la creación de un marco de trabajo para el uso y desarrollo de las energías renovables. Posteriormente en 1994, se produjo la declaración de Madrid, que dio lugar a la elaboración de un Plan de Acción para las Fuentes de Energías Renovables en Europa, proponiéndose entre sus objetivos sustituir el equivalente al 15% de la demanda de energía primaria convencional por energías renovables para el año 2010. En esta conferencia se establecen las bases para la posterior cumbre de Kyoto (1997). Desde entonces los distintos países han ido impulsando una necesaria normativa en este sentido. Así, España recoge en el Plan Energético Nacional, Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) y los Programas de Ahorro, Sustitución, Cogeneración y Energías Renovables, que se conciben como una transposición de los objetivos europeos al caso español. Para el caso andaluz, en aplicación a las directrices marcadas por el Libro Blanco de las Energías Renovables de la Unión Europea 1997, se establece el Plan Energético de Andalucía (PLEAN) 2001-2006 que pretende impulsar mediante subvenciones y ayudas, proyectos y aplicaciones que utilicen fuentes energéticas renovables, reduciéndose de este modo las emisiones de CO₂ y consolidando un mercado interno que minimice la dependencia de la Unión Europea de fuentes energéticas importadas. Dentro de los proyectos que están siendo apoyados por el PLEAN presentan gran fuerza aquellos que se apoyan en la utilización de la biomasa como fuente energética, ya que en Andalucía se generan alrededor de 3.010 Ktep¹ (miles de toneladas equivalentes de petróleo) de biomasa cada año que es posible aprovechar.

De hecho, el potencial de la biomasa como alternativa al uso de combustibles fósiles no sólo ha empezado a plasmarse desde el punto de vista de las administraciones, sino que multitud de estudiosos han mostrado su importancia en gran

1. Datos procedentes de la Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía (SODEAN) 2002.

cantidad de artículos que indagan sobre sus posibilidades: Hall and Scrase (1998), Domínguez and Marcos (2000), Pari (2001), Parikka (2003), García-Ibáñez et al. (2004). Sin embargo, aunque existe un consenso generalizado sobre la necesidad de aumentar la producción de energía mediante biomasa, los problemas surgen a la hora de decidir cómo alcanzar ese aumento de la forma más eficiente posible. En concreto, una de las cuestiones a decidir es la localización y dimensión óptima de las centrales energéticas de tratamiento de la biomasa.

En este estudio nos planteamos encontrar para una región, una posible respuesta a ese cambio en la tendencia energética mundial, planteándonos como objetivo de nuestro trabajo, localizar centrales de generación de energía eléctrica utilizando como combustible la biomasa procedente del olivar.

Se han utilizado diferentes técnicas en los estudios de localización de centrales de energía que utilizan la biomasa como recurso, algunos autores se han apoyado en técnicas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG): Noon and Daly (1996), Graham et al. (2000), Domínguez et al. (2003). Mientras que otros han utilizado métodos de programación matemática: West et al. (1987), Nagel (2000), Freppaz et al. (2004), Krukanont and Prasertsan (2004)². Dentro de este último tipo de estudios, al centrarnos en un problema de localización en el que se presentan múltiples alternativas con objetivos muchas veces en conflicto, hemos optado por el Análisis Multicriterio como una técnica adecuada, compatible con el problema planteado. Más específicamente, emplearemos la técnica de Programación por Metas Ponderadas ampliamente utilizada en el campo de la localización en general, Erkut and Neuman (1992), Giannikos (1998), Wise and Perushek (2000), pero no aplicada para el caso de plantas de generación de energía eléctrica.

El objetivo del presente trabajo es la formulación de un modelo teórico que ayude en este proceso de decisión, determinando el número de centrales de biomasa a establecer, la localización más adecuada de entre las alternativas posibles, así como la dimensión ideal tanto de las plantas ya existentes como de las nuevas instalaciones. En este artículo se incluye también una aplicación de un caso real aunque limitado, que valida su potencial para ser extendido y utilizado en situaciones con mayor complejidad de alternativas.

La estructura seguida en este artículo es la siguiente: comenzaremos por la definición de biomasa así como de las características concretas del tipo de biomasa aquí considerada, para pasar a determinar un modelo específico de localización de centrales de generación de energía eléctrica mediante biomasa. Finalizaremos con una aplicación práctica para el caso de Andalucía, señalando en las conclusiones

2. Estos dos últimos autores emplean ambas técnicas, aunque el peso del artículo reside en el modelo matemático, también utilizan el Sistema de Información Geográfica para localizar zonas candidatas.

las aportaciones del estudio, así como nuevas vías para futuros trabajos de investigación en el campo.

2. UN CASO PARTICULAR DE BIOMASA: RESIDUOS PROCEDENTES DEL OLIVAR

En general se define la biomasa como el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal. El término biomasa abarca una variada serie de fuentes energéticas que van desde la simple combustión de leña para calefacción hasta las centrales térmicas para producir electricidad usando como combustible residuos forestales, agrícolas, ganaderos o incluso lo que se denominan cultivos energéticos, pasando por el biogás de los vertederos, lodos de depuradoras o los biocombustibles. Se suelen considerar tres grandes grupos en cuanto a las posibles fuentes de biomasa destinadas a aprovechamiento energético: *biomasa producida por plantaciones energéticas*, biomasa como subproducto (también llamada *biomasa natural*) y la *biomasa residual* que es la generada por cualquier actividad humana. En este estudio nos centraremos en esta última y específicamente en el uso de los residuos procedentes del olivar, ya que en Andalucía, es la fuente que presenta un mayor potencial, representando el 38%³ del total de la biomasa de dicha región.

3. ELECCIÓN DE LA TÉCNICA A EMPLEAR

El problema de localizar centrales de generación de energía eléctrica utilizando biomasa podría parecer en principio un sencillo problema económico de optimización, sin embargo, al analizarse en mayor profundidad se comprueba la existencia de múltiples alternativas disponibles y objetivos muchas veces contrapuestos que complican el problema. Esto hace que no sea posible hablar de un óptimo matemático como solución al problema, sino de una solución compromiso que equilibre todos estos aspectos.

La necesidad de tener en cuenta simultáneamente en este tipo de estudios criterios geográficos, ambientales y socio-económicos de la región como aspectos importantes en el problema de la toma de decisión ha sido destacada recientemente por autores como Freppaz et al. (2004). En nuestro caso, en el diseño del modelo y en la posterior ejemplificación mediante un caso práctico, hemos tenido en cuenta un tipo de biomasa específica de la región considerada (los residuos procedentes del olivar), su disponibilidad (la región en la que se ha centrado la aplicación práctica

3. Datos procedentes de la Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía (SODEAN) 2002.

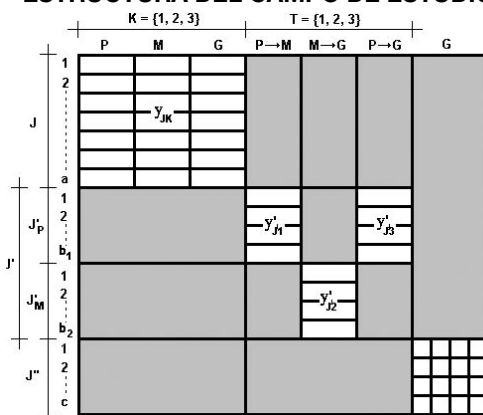
son aquellas provincias de la Comunidad Andaluza en las que el olivar es la principal fuente productiva) y los efectos económicos y sociales que la implantación de una central de energía puede producir (impacto sobre el empleo, industrias auxiliares, fijación de núcleos de población, etc.).

Por tanto, al combinarse en este problema de localización distintas alternativas (las posibles plantas podrían inicialmente situarse en muchas zonas candidatas) con más de un objetivo (minimizar costes, maximizar producción...), se pasa de la búsqueda de una solución óptima (problema tradicional de optimización) a la de soluciones eficientes para posteriormente, dentro de éstas, elegir la que más se adecue o satisfaga al centro decisor⁴, convirtiéndose así en un problema que puede ser abordado desde la teoría de la Toma de Decisiones en un Análisis Multicriterio.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

Nuestro problema consiste en crear o ampliar de tamaño plantas de generación de energía eléctrica mediante biomasa en un conjunto de I zonas donde se encuentra situada la biomasa en la región estudiada. Para reflejar de una forma más clara las diferentes alternativas que pueden producirse en el modelo, se incluye la siguiente Figura.

FIGURA 1
ESTRUCTURA DEL CAMPO DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

- En este caso se ha planteado el trabajo desde el punto de vista de un planificador público que pretende establecer la localización y tamaño óptimo de plantas de generación de energía eléctrica utilizando como recurso los residuos procedentes del olivar.

Donde consideraremos:

K = Conjunto de tamaños de plantas de generación de electricidad que utilicen biomasa. Se consideran los siguientes tamaños en función de la potencia de la planta: las Pequeñas (P) designan a las plantas cuya potencia es inferior a 10Mw, Medianas (M) aquellas instalaciones en las que la potencia de la planta se sitúe en el intervalo [10, 20) y como grandes (G) aquellas plantas en las que su potencia es mayor o igual a 20 Mw. Luego $K = \{1, 2, 3\}$, donde $P = 1$, $M = 2$ y $G = 3$.

T = Conjunto de las posibles ampliaciones de capacidad en las plantas existentes, y por tanto $T = \{1, 2, 3\}$ considerando que:

- 1 indica la ampliación de potencia, pasando de pequeña a mediana, $P \rightarrow M$.
- 2 indica la ampliación de una planta mediana a grande, $M \rightarrow G$.
- 3 indica la ampliación de una planta pequeña a grande, $P \rightarrow G$.

J = Conjunto de a localizaciones candidatas⁵ para crear plantas de energía eléctrica utilizando biomasa procedente del olivar como combustible. En cada una de estas a opciones se podrá crear una planta de tamaño P, M o G, donde la variable dicotómica (y_{jk})⁶ representa la posible creación (valor 1) o no (valor 0) de plantas para cada tamaño, en cada localización. Estos sitios candidatos han sido seleccionados allí donde no existían inicialmente plantas de energía eléctrica, por lo que en estas localizaciones no se puede producir ninguna ampliación de tamaño.

J' = Conjunto de b localizaciones de plantas ya existentes en la región analizada con posibilidad de ampliación. Dentro de este conjunto se diferencian dos grupos: J'_P que representa las b_1 plantas de tamaño pequeño ya existentes con posibilidad de ampliación a tamaño mediano $y'_{j'1}$ o a grande $y'_{j'3}$, (siendo $y'_{j'k}$ una variable binaria donde 1 representa la posible ampliación de plantas ya existentes y 0 si no se amplía dicha planta) y J'_M que representa las b_2 localizaciones de plantas medianas existentes con posibilidad de ampliación a tamaño grande $y'_{j'2}$, cumpliéndose que $b = b_1 + b_2$.

J'' = Conjunto de c localizaciones en las que ya existen plantas grandes y por tanto sin posibilidad de ampliación.

5. Éstas se obtendrán por medio de un estudio previo, para lo cual se establecen como requisitos: la biomasa aprovechable en un radio de 25km (se considera esta distancia como la máxima permitida para que sea viable económicamente el transporte de biomasa, distancia esta utilizada en otros estudios como el de Domínguez et al. 2003), caminos o vías de comunicación en su entorno, líneas eléctricas de la potencia necesaria, agua suficiente, áreas no protegidas medioambientalmente o de complicada orografía y que no exista ninguna otra planta en esa localidad.
6. Para una más fácil comprensión de las variables y_{jk} e $y'_{j'k}$ ir a la página anterior.

4.1. Objetivos estudiados

Para la creación del modelo hemos considerado fundamentales los siguientes objetivos:

A. Minimización del coste total. Partimos de un objetivo eminentemente económico, puesto que sólo se establecerá una planta de energía si realmente es viable económicamente⁷ de forma sostenible a lo largo del tiempo. Por ello, se primarán a aquellas localizaciones en las que los *costes de apertura o ampliación, mantenimiento, producción y transporte sean mínimos.*

a) Costes fijos de apertura y costes de ampliación. Estos estarán en función del tamaño de la planta. En esta modelización se considerarán como fijos los conceptos que engloban los costes de inversión del suelo, conexión del terreno con la línea eléctrica y red de transporte más cercana, así como los costes de instalación y puesta en funcionamiento. Por otra parte, los costes de ampliación hacen referencia a los costes necesarios para aumentar la potencia de la planta, en el estudio se considerarán que los costes de pasar de un tamaño al inmediatamente superior son constantes. Las posibles ampliaciones son de una planta de tamaño P a M, de M a G o de P a G.

$$a.1) \text{ Costes de apertura: } \sum_j \sum_k m_k y_{jk} \quad (1)$$

$$a.2) \text{ Costes de ampliación}^8: \sum_{j' \in J_P} m y'_{j'1} + \sum_{j' \in J_M} m y'_{j'2} + \sum_{j' \in J_P} 2m y'_{j'3} \quad (2)$$

donde y_{jk} e $y'_{j't}$ son variables binarias y m_k y m son parámetros que denotan: $y_{jk} = 1$ si se instala una planta de tamaño k en la localización j y 0 en otro caso.

$y'_{j't} = 1$ si se realiza la ampliación t de una planta existente en j' y 0 en otro caso.

m_k = coste fijo de instalación y apertura de una planta de tamaño $k \in K$.

m = coste fijo de ampliación a la siguiente categoría suponiendo que el incremento de P a M es igual que el incremento de M a G, y el de P a G es el doble (esto es, $2m$).

b) Coste de mantenimiento y producción. Bajo este apartado se incluyen todos los costes relacionados con el mantenimiento de una planta, ya sea nueva o ampliada, así como aquellos derivados de la producción, que

7. Dentro de las restricciones se considerará que el beneficio sea positivo ($B^0 > 0$).

8. Para una mejor comprensión ver la Figura 1.

se suponen dependientes de la cantidad de biomasa incinerada en cada planta. Estos se pueden representar como sigue:

$$b.1) \text{ Costes de mantenimiento: } \sum_j \sum_k \tilde{n}_k y_{jk} + \sum_{j'} \tilde{n}_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'3} \quad (3)$$

$$b.2) \text{ Costes producción: } \sum_j \sum_k n X_k y_{jk} + \sum_{j'} n X_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} n X_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} n X_3 y'_{j'3} \quad (4)$$

donde n , \tilde{n}_k y X_k son parámetros con los siguientes significados:

\tilde{n}_k = coste fijo anual de mantenimiento de una planta de tamaño k , $k \in K$.

n = coste de producción por unidad de biomasa incinerada.

X_k = capacidad máxima (toneladas de biomasa incineradas anualmente) de una planta de tamaño k , $k \in K$.

c) Costes de transporte. Se representa en función de la distancia y de la

cantidad transportada, y viene expresado por:
$$\sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \alpha_{ij} \quad (5)$$

donde x_{ij} es una variable y c_{ij} y α_{ij} son parámetros que representan:

x_{ij} = número de unidades de biomasa transportadas de i a j , ($i \in I$, $j \in JJJ'$)

c_{ij} = coste del transporte de i a j por tonelada de biomasa, ($i \in I$ y $j \in JJJ'$).

α_{ij} = 1 si la distancia del área donde se encuentra situada la biomasa ($i \in I$) al área donde se localiza la planta ($j \in JJJ'$) es menor que $d=25$ km y 0 en caso contrario.

De esta forma, el objetivo de minimización de costes consiste en la minimización de las expresiones anteriores, esto es, la minimización de los costes de apertura, ampliación, mantenimiento, producción y transporte.

B. Maximización de la producción de electricidad obtenida. Con este objetivo se pretende maximizar la producción de biomasa como combustible capaz de generar electricidad de una manera más limpia (menor emisión de CO₂) reduciendo al mismo tiempo la dependencia del exterior.

Si se supone que la producción de electricidad está en función de la biomasa consumida, se trata de:

$$\text{Max} \left\{ \sum_j \sum_k \beta X_k y_{jk} + \sum_{j'} \beta X_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'3} \right\} \quad (6)$$

donde el parámetro β representa la relación constante entre la unidad de biomasa incinerada y la electricidad obtenida, mientras que el parámetro X_k expresa las toneladas de biomasa incineradas anualmente para cada tamaño $k \in K$.

C. Maximizar la suma de las distancias entre plantas. Este objetivo se centra en la concepción de la biomasa como residuo. Lo que se pretende es distribuir el “beneficio” que supone la instalación de una planta de energía para la eliminación de biomasa, puesto que puede ser considerada como un residuo a eliminar, ya sea por su toxicidad (alpechín, residuos procedentes de animales, lodos, etc.), como por los problemas derivados de su acumulación (así ocurre en el caso de los ramones de olivos, podas procedentes de labores forestales, etc.). Por lo tanto, lo que se pretende con este objetivo es distribuir estas plantas (generadoras de beneficios al contribuir a eliminar este problema) por el territorio andaluz de una manera equitativa, haciendo que la distancia entre plantas sea máxima.

$$\text{Max} \left(\frac{\sum_{j_0 \in J} \sum_{j_1 \in J} \sum_{k \in K} y_{j_0 k} y_{j_1 k} w_{j_0 j_1}}{2} + \frac{\sum_{j_0 \in J} \sum_{j'_1 \in J'} \sum_{k \in K} y_{j_0 k} w_{j_0 j'_1}}{2} + \frac{\sum_{j_0 \in J} \sum_{j''_1 \in J''} \sum_{k \in K} y_{j_0 k} w_{j_0 j''_1}}{2} \right) \quad (7)$$

donde el parámetro $w_{j_0 j_1}$ representa los kilómetros existentes entre las localizaciones j_0 y j_1 , siendo $j_0, j_1 \in J \cup J'$.

El primer sumando de la expresión (7) representa la distancia entre las plantas que se crean, el segundo entre las ya existentes de tamaño pequeño o mediano y las nuevas, y el último expresa la distancia entre las nuevas y las grandes ya existentes.

D. Maximizar la aceptación social. Se plantea la creación o ampliación de plantas de generación de electricidad en aquellas localidades con mayor tasa de desempleo con objeto de que estas poblaciones puedan beneficiarse de los puestos de trabajo que dichas plantas puedan generar.

La creación de una central eléctrica a partir de biomasa requiere de una aceptación por parte de los ciudadanos que viven en las poblaciones cercanas. No es ilógico suponer que esta aceptación puede depender del número de puestos de trabajo (ya sean directos o indirectos⁹) creados por dicha planta, los cuales son una función del tamaño de la planta en cuestión. Así, el objetivo planteado queda:

$$\text{Max} \left(\sum_k \sum_j I_k z_j y_{jk} + \sum_{j'} I z_j y'_{j-1} + \sum_{j'} I z_j y'_{j+2} + \sum_{j'} 2 I z_j y'_{j+3} \right) \quad (8)$$

Por su parte, los parámetros z_j , I_k y I se definen de la siguiente manera:

z_j = tasa de desempleo de la localidad j en la que se instala la planta, $j \in J \cup J'$.

9. A pesar de que en este estudio no va a ser tenido en cuenta el empleo que se crea de una manera indirecta como consecuencia de la planta, en un análisis más exhaustivo esta consideración podría ser interesante que se recogiese.

l_k = número de puestos de trabajo directos de una central de tamaño k , $k \in K$.

l = número de puestos de trabajo directos creados al ampliar una planta a su siguiente tamaño. Como el incremento de puestos de trabajo al pasar de un tamaño al inmediatamente superior se considerará fijo, el aumento en los puestos de trabajo que se producirá con las distintas posibilidades de ampliación se puede expresar como: $P \rightarrow M = l$, $M \rightarrow G = l$ y $P \rightarrow G = 2l$.

E. Maximizar la suma de la disposición de las Administraciones Locales en las distintas localidades al establecimiento o ampliación de una planta. Con este objetivo se pretende reflejar la mayor o menor disposición de los ayuntamientos al establecimiento de este tipo de instalaciones ya sea mediante la concesión de subvenciones, facilitando el terreno, dotación de infraestructuras, agilizando los trámites administrativos, etc.

Se va a emplear un parámetro u_j que agrega todos estos factores en la localidad en la que se va a establecer o ampliar la planta. Para su elaboración se le asignará a cada factor en cada localización, una puntuación del 1 al 10. Una vez asignada esa puntuación se ponderan dichos factores en función de su importancia relativa y se sumarán todos los factores de cada localización normalizándolos posteriormente y dando lugar al valor agregado de disposición para cada una de las alternativas u_j^{10} . La suma de todos estos valores obtenidos para las diferentes poblaciones debe ser igual a 1, es decir, $\sum_{j \in J \cup J'} u_j = 1$.

Quedando el objetivo:
$$Max \left(\sum_j \sum_k u_j y_{jk} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'1} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'2} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'3} \right) \quad (9)$$

4.2. Restricciones

Una vez fijados los objetivos, se definen a continuación las restricciones existentes a la hora de determinar las localizaciones más acordes.

- La cantidad de biomasa quemada en cada planta no puede ser superior a la disponible para esa planta, quedando esta restricción para las plantas:

- Nuevas:
$$\sum_k X_k y_{jk} \leq \sum_i r_i \alpha_{ij} \quad (10)$$

- Pequeñas y medianas existentes:
$$X_2 y'_{j'1} + X_3 y'_{j'3} \leq \sum_i r_i \alpha_{ij}, \quad X_3 y'_{j'2} \leq \sum_i r_i \alpha_{ij} \quad (11)$$

10. Un ejemplo de este procedimiento se puede encontrar en West et al. (1988).

donde r_i son las toneladas de biomasa existentes en una determinada área $i \in I$.

- En cada sitio seleccionado sólo puede haber una instalación (sin importar el tamaño). Esta restricción se fundamenta en el hecho de que, por un lado, sería ineficiente económicamente establecer más de un centro para alcanzar un nivel de producción que podría lograrse aumentando simplemente la escala, evitando así los altos costes fijos que supone la instalación de una nueva planta y, por otro lado, en que difícilmente puede existir biomasa suficiente para más de un centro, dado que una planta se abastece generalmente de la biomasa situada en su proximidad. De esta forma:

$$\sum_k y_{jk} \leq 1 \quad y'_{j'1} + y'_{j'3} \leq 1 \quad (12)$$

- En relación con las variables $y_{jk}, y'_{j't}$: $y_{jk} \in \{0,1\}$ $y'_{j't} \in \{0,1\}$ (13)

- Para la variable x_{ij} , se sabe que la cantidad de biomasa transportada a j no puede ser superior a la capacidad de su planta: $\sum_i x_{ij} = \sum_k X_k y_{jk}$ (14)

- La biomasa que existe en cualquier área será mayor o igual que toda la que se transporta de desde i a cualquier j o j' : $\sum_j \alpha_{ij} x_{ij} \leq r_i$ (15)

- La restricción presupuestaria de partida (Q euros) se destinará a la creación o en su caso ampliación de plantas de generación de energía. Surgiendo por tanto, la siguiente restricción:

$$\sum_j \sum_k m_k y_{jk} + \sum_{j'} m y'_{j'1} + \sum_{j'} m y'_{j'2} + \sum_{j'} 2m y'_{j'3} \leq Q \quad (16)$$

- Restricción de no negatividad: $x_{ij} \geq 0$ (17)
- Los beneficios derivados de la actividad deben ser no negativos, esto es, cubrir al menos los costes de funcionamiento.

Con relación a los ingresos, de manera genérica, se establece en el Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre, el tratamiento legal que se le da a las centrales de generación de energía con recursos renovables, fijándose el precio por la energía eléctrica entregada. La retribución que los productores obtienen por la cesión de energía eléctrica de acuerdo con este RD es: $R = Pm + pr \pm ER$, donde R es la

retribución en €/Kwh, P_m representa el precio del mercado¹¹, Pr es la prima¹² y ER es el complemento por energía reactiva, que será aplicado a la suma de P_m y Pr . Este es el considerado con carácter general en la normativa sobre tarifas, con la diferencia de que si el factor de potencia de la energía cedida de la empresa distribuidora fuese superior a 0'9, el complemento será un abono para el productor y, si fuere inferior, un descuento.

Para simplificar el modelo, y dado que la importancia de este último componente es pequeña en comparación con los otros dos elementos de la retribución, no se considerará en el presente estudio, quedando la retribución definida como:

$$R = P_m + Pr \tag{18}$$

Si se definen los ingresos como producción de electricidad por retribución quedará:

$$Ingresos = R \beta \left(\sum_j \sum_k X_k Y_{jk} + \sum_j X_2 Y'_{j'1} + \sum_j X_3 Y'_{j'2} + \sum_j X_3 Y'_{j'3} \right) \tag{19}$$

En relación a los costes, se consideran los relacionados con el ejercicio normal de la actividad, es decir, no se tendrán en cuenta los costes de establecimiento o ampliación¹³, pero si los de mantenimiento, producción y transporte definidos en las expresiones (3), (4) y (5) esto es:

$$Costes = \left(\sum_j \sum_k \bar{n}_k Y_{jk} + \sum_{j'} \bar{n}_2 Y'_{j'1} + \sum_{j'} \bar{n}_3 Y'_{j'2} + \sum_{j'} \bar{n}_3 Y'_{j'3} + \sum_j \sum_k n X_k Y_{jk} + \sum_{j'} n X_2 Y'_{j'1} + \sum_{j'} n X_3 Y'_{j'2} + \sum_{j'} n X_3 Y'_{j'3} \right) \tag{20}$$

Por lo tanto, el beneficio total será la diferencia de las expresiones (19) y (20), que debe ser mayor o igual que cero.

$$Beneficio = (19) - (20) \geq 0 \tag{21}$$

Para resumir, el modelo está compuesto por los cinco objetivos planteados inicialmente y las restricciones descritas anteriormente, quedando de la siguiente forma:

11. El precio de mercado en €/Kwh se fija según lo especificado en el artículo 24 del RD 2818/1998.
12. La prima que se fijó para el 2003 está establecida en el artículo 12.4 del RD 841/2002 de 2 agosto.
13. No se tienen en cuenta los costes de creación o ampliación para esta restricción, ya que se considera ejercicio normal de la actividad aquel ingreso – coste anual derivado del funcionamiento usual de la planta de energía, la cual no incluye el coste de creación o ampliación. Para el resto del modelo si que se tendrán en cuenta estos costes, tal y como se puede observar en la función de minimización de costes (22).

1. *Minimización de costes de creación, ampliación, mantenimiento, producción y transporte.*

$$\begin{aligned} \text{Min} \left(\sum_j \sum_k m_k y_{jk} + \sum_{j'} my'_{j'1} + \sum_{j'} my'_{j'2} + \sum_{j'} 2my'_{j'3} + \right. \\ \left. \sum_j \sum_k \tilde{n}_k y_{jk} + \sum_{j'} \tilde{n}_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'3} + \right. \\ \left. \sum_j \sum_k nX_k y_{jk} + \sum_{j'} nX_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} nX_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} nX_3 y'_{j'3} + \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \alpha_{ij} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

2. Maximizar la producción de electricidad obtenida:

$$\text{Max} \left(\sum_j \sum_k \beta X_k y_{jk} + \sum_{j'} \beta X_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'3} \right) \quad (23)$$

3. Maximizar la distancia entre plantas:

$$\text{Max} \left(\frac{\sum_{j_0} \sum_{j_1} \sum_k y_{j_0 k} y_{j_1 k} w_{j_0 j_1}}{2} + \frac{\sum_{j_0} \sum_{j'_1} \sum_k y_{j_0 k} w_{j_0 j'_1}}{2} + \frac{\sum_{j_0} \sum_{j''_1} \sum_k y_{j_0 k} w_{j_0 j''_1}}{2} \right) \quad (24)$$

4. Maximizar la aceptación social:

$$\text{Max} \left(\sum_k \sum_i z_{i k} y_{jk} + \sum_{j'} l z_{j'} y'_{j'1} + \sum_{j'} l z_{j'} y'_{j'2} + \sum_{j'} 2l z_{j'} y'_{j'3} \right) \quad (25)$$

5. Maximizar la suma de la disposición de las administraciones locales a la instalación o en su caso ampliación de una planta en cada localidad:

$$\text{Max} \left(\sum_j \sum_k u_j y_{jk} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'1} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'2} + \sum_{j'} u_{j'} y'_{j'3} \right) \quad (26)$$

6. Todas las restricciones establecidas de (10) a (17) y (21)

4.3. Resolución del modelo

Una vez definidos los objetivos con sus respectivas restricciones, modelizaremos el problema mediante la programación por metas ponderadas.

Lo primero a realizar será fijar por un lado, para cada objetivo de máximo o de mínimo, sus correspondientes niveles de aspiración (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5), quedando representado cada uno de los objetivos iniciales como metas que deseamos alcanzar, y por otro las variables de desviación¹⁴ positivas o negativas (p_n y n_n)¹⁵.

14. Romero C. (1993) "las variables de desviación negativas (n_i) cuantifican la falta de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración, mientras que las variables de desviación positivas (p_i) cuantifican el exceso de logro con respecto a su nivel de aspiración".
15. Para el caso en el que la restricción o meta perseguida sea de la forma $f_i > s_i$ en la función objetivo se minimizará n_i , y cuando sea del tipo $f_i < s_i$, habrá que minimizar p_i , en dicha función, tal y como se presenta en la función objetivo del problema representado en la página 155 (32).

Representaremos cada una de las metas normalizadas (para subsanar posibles diferencias en las unidades) de la siguiente manera:

$$1) \frac{100}{s_1} \left(\sum_j \sum_k m_k y_{jk} + \sum_{j'} m y'_{j'1} + \sum_{j'} m y'_{j'2} + \sum_{j'} 2m y'_{j'3} + \sum_j \sum_k \tilde{n}_k y_{jk} + \sum_{j'} \tilde{n}_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \tilde{n}_3 y'_{j'3} + \sum_j \sum_k n X_k y_{jk} + \sum_{j'} n X_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} n X_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} n X_3 y'_{j'3} + \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \alpha_{ij} + n_1 - p_1 \right) = 100 \tag{27}$$

$$2) \frac{100}{s_2} \left(\sum_j \sum_k \beta X_k y_{jk} + \sum_{j'} \beta X_2 y'_{j'1} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'2} + \sum_{j'} \beta X_3 y'_{j'3} + n_2 - p_2 \right) = 100 \tag{28}$$

$$3) \frac{100}{s_3} \left(\frac{\sum_{j_0} \sum_h \sum_k y_{j_0 k} y_{j_0 k} w_{j_0 h}}{2} + \frac{\sum_{j_0} \sum_{j'} \sum_k y_{j_0 k} w_{j_0 j'}}{2} + \frac{\sum_{j_0} \sum_{j'} \sum_k y_{j_0 k} w_{j_0 j''}}{2} + n_3 - p_3 \right) = 100 \tag{29}$$

$$4) \frac{100}{s_4} \left(\sum_k \sum_j z_{j k} y_{jk} + \sum_{j'} l z_{j'} y'_{j'1} + \sum_{j'} l z_{j'} y'_{j'2} + \sum_{j'} 2l z_{j'} y'_{j'3} + n_4 - p_4 \right) = 100 \tag{30}$$

$$5) \frac{100}{s_5} \left(\sum_j \sum_k u_j y_{jk} + \sum_{j'} u_j y'_{j'1} + \sum_{j'} u_j y'_{j'2} + \sum_{j'} u_j y'_{j'3} + n_5 - p_5 \right) = 100 \tag{31}$$

La función objetivo del problema de Programación por Metas Ponderadas consiste en minimizar la suma ponderada de las desviaciones positivas P_i ($P_i = p_i \times 100/s_i$) si la meta perseguida es de minimizar y la suma ponderada de las desviaciones negativas N_i ($N_i = n_i \times 100/s_i$) si es de maximizar, donde λ_i^{16} , representa la ponderación de cada una de las desviaciones no deseadas a minimizar. Quedando dicha función objetivo como:

$$\text{Min } \lambda_1 P_1 + \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3 + \lambda_4 N_4 + \lambda_5 P_5 \tag{32}$$

s.a.: metas y restricciones del problema inicial¹⁷.

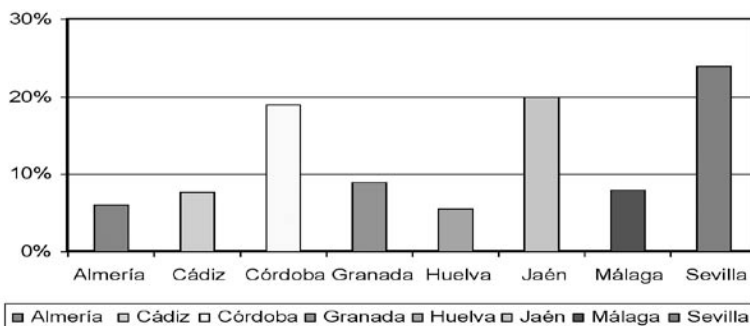
16. λ_i son pesos positivos que reflejan las preferencias de quien toma las decisiones en lo concerniente a la importancia relativa de cada meta.
 17. Las metas expresadas en las ecuaciones (22) a (26) y las restricciones de (10) a (17) y (21).

5. APLICACIÓN PRÁCTICA

Para contrastar la fiabilidad del modelo teórico anteriormente formulado se ha realizado una aplicación práctica, considerando como objetivo de estudio la localización de centrales de generación de energía eléctrica que utilizan como combustible la biomasa procedente del olivar.

Se ha decidido utilizar como fuente de biomasa los residuos procedentes del olivar por la gran cantidad que de ésta existe, ya que de los cinco millones de toneladas anuales de aceitunas que se producen en España se obtienen cuatro millones de toneladas de residuos una vez extraído el aceite. Al considerar solamente el olivar como fuente de biomasa, y ya que es necesaria una gran cantidad de la misma muy concentrada para el funcionamiento de una planta de generación de energía eléctrica, se ha creído conveniente establecer como ámbito de análisis Andalucía ya que en esta región se produce el 80% de las aceitunas de España. Según datos del Instituto de Estadística de Andalucía¹⁸ y teniendo en cuenta la variable Superficie de Explotación Agraria, se establece que el olivar es la fuente de biomasa de mayor concentración de Andalucía y que ésta se encuentra principalmente distribuida en las cordilleras subbéticas y béticas, con especial relevancia en las provincias de Córdoba, Jaén y Sevilla. Al ser éstas provincias las que más cantidad de este tipo de recurso poseen, la aplicación del modelo se circunscribirá a la región delimitada por ellas, lo cual no implica que en futuras investigaciones se pudiese extender el estudio a otras provincias e incluso a otros tipos de biomasa.

FIGURA 2
PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DE ACEITUNAS POR PROVINCIAS ANDALUZAS



Fuente: Elaboración propia

18. www.iea.junta-andalucia.es/sima/

En la actualidad existen en Andalucía veinte plantas en explotación para generar electricidad con un potencial total de 130,8MW, así como gran número de plantas en fase de proyecto y promoción, por lo que se prevee que la potencia total instalada para los próximos años sea de 287,4MW. De las plantas existentes en la actualidad sólo 7 utilizan los subproductos derivados del olivar, de las que cuatro de ellas se encuentran en la provincia de Córdoba (Agroenergética de Baena –Baena- con 25 MW de potencia, Vetejar –Palenciana- de 12,5 MW, Oleícola el Tejar –Palenciana- de 5,7MW, C.T. Hermanos Santa María –Lucena- de 2MW), dos en la provincia de Jaén (La Loma -Villanueva del Arzobispo- de 16MW y Biogás y Energía -Puente Génave- de 5 MW) y en Cádiz, (Agroenergética de Algodonales –Algodonales- de 5MW de potencia).

Dado que el propósito de esta aplicación práctica va a ser testar la fiabilidad del modelo presentado, se van a seleccionar una planta de cada uno de los tamaños. De esta forma, se ha escogido de entre las plantas existentes y de manera aleatoria¹⁹ las situadas en Baena (G), Villanueva del Arzobispo (M) y Lucena (P). Considerando solamente como ya existentes estas plantas y partiendo de un presupuesto inicial Q fijo, el modelo presentado nos va a permitir tomar decisiones sobre si en función de la biomasa existente en la zona, se debe ampliar el tamaño de las plantas ya existentes, pasando de tamaño pequeño a mediano o a grande, o de mediano a grande, o crear nuevas plantas y decidir el tamaño de estas. Cabe también la posibilidad de un caso mixto en el que algunas se amplíen y otras se creen. No hay que olvidar que la decisión está condicionada no sólo por el presupuesto inicial mencionado sino también por la cantidad de biomasa disponible en el entorno considerado, la necesidad de automantenerse financieramente a lo largo de los años, el nivel de aceptación social en cada emplazamiento y el nivel de producción que se debe alcanzar para que se decida la creación o ampliación de la planta entre otros factores.

Para la definición de las zonas candidatas, se han seleccionado aquellos municipios que presentan recursos hidráulicos suficientes, vías de transporte adecuadas, líneas eléctricas con la potencia necesaria, que no pertenezcan a áreas medioambientalmente protegidas y con biomasa suficiente para permitir la instalación de una planta de tamaño grande. De todas esas zonas potenciales se han elegido finalmente una por cada provincia: Arjona (Jaén), Castro del Río (Córdoba) y Osuna (Sevilla). Para ello se tuvieron en cuenta anuarios estadísticos, información proporcionada mediante Sistemas de Información Geográficos (SIG) y estudios oficiales, entre otras fuentes.

19. El seleccionar otras alternativas nos hubiese dado otra posible solución, pero el tipo de problema no hubiese cambiado.

Para el análisis de los costes²⁰ se recurrió a empresas especializadas, que proporcionaron información sobre los costes de creación, ampliación, producción y mantenimiento por tamaños, así como los costes de transporte, considerándose el coste de tonelada de biomasa por Km de 10ptas Tn/Km, es decir, aproximadamente 0,0601 €/Tn/Km. En cuanto al coste de producción por tonelada de biomasa se ha fijado en $n=20€/Tn$ y la relación constante que existe entre las toneladas de biomasa incineradas y la electricidad obtenida es $\beta=690$. El resto de los datos aparecen reflejados en los siguientes Cuadros:

CUADRO 1
CREACIÓN DE PLANTAS POR TAMAÑO

	P	M	G
C.Apertura(m_k)	25.000.000€	35.000.000€	60.000.000€
C.Mantenimiento(\tilde{r}_k)	1.500.000€	1.700.000€	2.000.000€
Puestos Trabajo(l_k)	30	40	55
Capacidad (X_k)	173077	346154	519231

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 2
AMPLIACIÓN DE PLANTAS EXISTENTES

	P-M	P-G	M-G
C.Mantenimiento ¹ (n)	1.700.000€	2.000.000€	2.000.000€
C.Ampliación(m)	10.000.000€	20.000.000€	10.000.000€
Puestos Trabajo creados por ampliación ² (l)	10	25	15

1. Representa el coste total de mantenimiento del tamaño de la planta al que se pasa.

2. Representa el incremento de puestos de trabajo que se producirán por la ampliación.

Fuente: Elaboración propia

Los datos de cantidad de hectáreas de olivar en cada localidad, así como de la tasa de desempleo en cada una de ellas proceden del IEA y las distancias se han calculado mediante la guía interactiva de CAMPSA, considerándose como distancia la media entre la distancia más corta y la distancia más rápida. Siendo estos datos los siguientes:

20. Todos los datos (incluidos los costes) considerados son reales, salvo los referidos a la disposición de los ayuntamientos u_i (que dependerán en gran medida del partido político y los grupos de presión del momento), el nivel presupuestario inicial Q, así como los niveles de aspiración s_i y ponderaciones λ_i del programa de ponderación por metas, estos tres últimos deberían ser establecidos por el centro decisor.

CUADRO 3
DATOS DE LOS MUNICIPIOS

DISTANCIAS	Arjona	Osuna	C. Río	Lucena	V.Arzobispo	Baena
Arjona	0	148	59	82,5	117,65	50,2
Osuna	148	0	90	109,8	264,3	102,75
C. Río	59	90	0	47	174,1	21,2
Lucena	82,5	109,8	47	0	190,5	34,2
V.Arzobispo	117,65	264,3	174,1	190,5	0	164,25
CantBiomasa(r)	500000	450000	650000	350000	520000	800000
T. Desempleo(z)	0,3	0,244	0,246	0,173	0,181	----
Disponi.AALL(u)	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	----

1. No se ha tenido en cuenta ni la predisposición de las Administraciones locales ni la tasa de desempleo para el caso de Baena, ya que la planta que aquí existe es de tamaño grande y por tanto no se puede actuar sobre ella y nos es indiferente disponer de estos datos.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la restricción presupuestaria inicial $Q=1000.000.000\text{€}$, se ha accedido a la ayuda de expertos en la materia para establecer una restricción inicial lógica pero que permita la creación o ampliación de más de una alternativa. La retribución obtenida por la cesión de energía eléctrica calculada según la normativa anteriormente mencionada es la siguiente, $R=63\text{€/Mwh}$.

Para fijar los valores de los niveles de aspiración (s_i), estos se han introducido teniendo en cuenta las características del problema e intentando actuar como un centro decisor público racional.

CUADRO 4
NIVELES DE ASPIRACIÓN DE CADA OBJETIVO

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
13500000€	741750Mwh	720 Km	25 empleados	0,5 (u_i)

Fuente: Elaboración propia

En la valoración de las ponderaciones se ha decidido concederles la misma importancia a todos los objetivos, y por tanto $\lambda_i=0,2$ ($i = 1 \dots 5$).

Realizada esta parte del estudio, pasamos a introducir los datos en el programa informático LINGO, y el resultado obtenido es:

CUADRO 5
RESULTADOS OBTENIDOS CON TODOS LOS λ_i CONSTANTES

$\lambda_i = 0,2$ (i = 2, 3, 4 y 5)					
	CREACIÓN		Villanueva del Arzobispo (Jaén)		
Pequeña	Mediana	Grande	$P \rightarrow M$	$P \rightarrow G$	$M \rightarrow G$
	Arjona (Jaén)				V. Arzobispo
	Osuna (Sevilla)				(Jaén)

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar la estabilidad de esta solución, ante cambios en los valores de las ponderaciones, se ha realizado el consiguiente análisis de sensibilidad, pudiendo concluirse que el modelo se comporta bastante estable, de forma que para que se modifique el resultado es necesario dar a las ponderaciones valores extremos, es decir, valores próximos a 0 ó a 1 (por ejemplo, si se da a la tercera ponderación un valor muy pequeño, el modelo aconseja la creación de la planta de Castro del Río, lo cual es lógico al ser la planta que tiene menor distancia al resto de plantas), pero para el resto de casos los resultados son muy similares al inicial.

Se presenta en el Cuadro 6 en el que se puede mostrar cómo si se utilizan valores muy extremos se puede llegar a producir alguna variación (mucho peso al primer objetivo pero muy poco al tercero).

CUADRO 6
RESULTADOS OBTENIDOS CON λ_i VARIABLES

$\lambda_1 = 0,6$	$\lambda_2 = 0,195$	$\lambda_3 = 0,005$	$\lambda_4 = 0,2$	$\lambda_5 = 0,1$
	CREACIÓN		Villanueva del Arzobispo (Jaén)	
Pequeña	Mediana	Grande		
	C. Río (Sevilla)			V. Arzobispo
	Osuna (Sevilla)			(Jaén)

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, con el modelo se comprueba también que en el caso de que el gobierno retirase la prima que concede a la producción de energía mediante fuentes renovables (la retribución pasaría de 63 €/Mwh a 36 €/Mwh) no sería posible establecer ninguna planta ya que no se verificaría para ningún caso la restricción de beneficios positivos.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La importancia que los organismos oficiales, nacionales e internacionales, dan al fomento del aprovechamiento de la energía procedente de biomasa queda reflejada en diferentes documentos oficiales tales como El Libro Blanco de las Energías Renovables, la ORDEN PRE/ 472/2004 de 24 de febrero por la que se crea la Comisión Interministerial para el aprovechamiento energético de la Biomasa o incluso, a nivel andaluz, el Plan Director de Infraestructuras de Andalucía 1997-2007 mediante el cual se están apoyando y financiando futuros proyectos relacionados con la materia. No obstante, este aumento de la producción de energía mediante biomasa ha de ser realizado de una manera racional distribuyendo las centrales del modo más eficiente posible.

En nuestro estudio, nos enfrentamos por tanto a un tema del mayor interés, consistente en crear un modelo que permita determinar la/s más adecuada/s localización/es para crear o en su caso ampliar las plantas de energía existentes que utilicen como combustible los residuos del olivar. Para realizar dicha elección se ha creado un modelo genérico flexible y de gran aplicabilidad práctica, para el que se han tenido en cuenta criterios de muy distinta índole, tanto económicos como sociales. En concreto, se ha considerado el coste total de la operación, la producción de electricidad obtenida, el nivel de aceptación social, la distancia entre plantas y la predisposición de las Administraciones Locales al establecimiento o ampliación de una planta. Al encontrarnos ante un problema de localización que cuenta con objetivos que pueden estar en conflicto entre si, parece y así lo demuestra la literatura existente en diversas disciplinas (Giannikos (1988), Guerrero et al. (2004) ...) que una manera adecuada para resolverlo puede ser mediante la técnica multicriterio de programación por metas.

La flexibilidad del modelo aquí presentado radica en que puede adecuarse a distintas zonas, o incluso a otros tipos de biomasa. Su aplicabilidad práctica ha sido puesta de manifiesto en este trabajo mediante un ejercicio con datos reales. Los resultados obtenidos al aplicarlos a un caso real para la región de Andalucía (España), nos permiten concluir que partiendo de un presupuesto de 1.000.000.000€ la opción más adecuada en función de los criterios adoptados es crear dos plantas de tamaño mediano, una en Arjona (Jaén) y otra en Osuna (Sevilla), y ampliar a tamaño grande la existente en Villanueva del Arzobispo (Jaén).

En cuanto a los posibles desarrollos futuros del presente trabajo caben citar fundamentalmente 2 líneas de actuación.

Por un lado, en relación a las técnicas aplicadas podríamos enriquecer mucho el trabajo, ya sea utilizando *técnicas multicriterio interactivas*, las cuales permiten que el resultado inicial se vaya mejorando a medida que el centro decisor va proporcio-

nando nueva información a partir de los resultados obtenidos, o incluso utilizando como técnica multicriterio un único modelo genérico denominado *Extended Lexicographic Goal Programming*²¹ el cual engloba los distintos tipos de programación multicriterio existentes.

Por otro, un aspecto importante que podría incorporarse en el modelo es el uso de más de un tipo de biomasa, ya que en el análisis se ha considerado la utilización de un único tipo de biomasa, la procedente del olivar. Sin embargo, las plantas de generación de electricidad requieren la existencia de gran cantidad de biomasa concentrada en pocos kilómetros, por lo que parece razonable considerar la combustión, en una misma planta, de más de un tipo de biomasa, pudiendo incluso considerarse la utilización de cultivos energéticos, analizando los consiguientes efectos medioambientales y sociales que su utilización podría acarrear (prevención de la erosión, fortalecimiento de economía local, mantenimiento de la población local al favorecer que poblaciones puedan seguir viviendo de cultivos en zonas muchas veces casi despobladas, etc.).

21. Romero (2001) "Extended lexicographic goal programming: a unifying approach".

BIBLIOGRAFÍA

- ALTENER I (1993): *Decisión 93/500/CEE del Consejo*, DOCE nº L235, 18/09/1993, p. 41.
- ALTENER (2001): "Informe sobre Biomasa Agrícola y Forestal en España" *Proyecto ENER-IURE Fase III. Análisis de la legislación relativa a las fuentes de Energía Renovables en los Estados Miembros de la UE*.
- Comisión Europea: *Energy for the future-renewable sources of energy: White Paper*, COM (97) 599 final.
- Consejería de Empleo y Desarrollo Tecnológico. Junta de Andalucía. Decreto 86/2003 de 1 de abril, *Plan Energético de Andalucía (PLEAN) 2003-2006*, Boja 101 de 29/05/2003.
- DOMÍNGUEZ J. and MARCOS M. (2000): "GIS applied to evaluate Biomass power in Andalucía (Spain)"; CIBERGE0, [on line] Cibergeo. *European Journal of Geography*, 142. <http://www.cyberge0.presse.fr/payservi/domina/biomasa.htm>.
- DOMÍNGUEZ J. CIRIA P., ESTEBAN L., SÁNCHEZ D. y LASRY P. (2003): "Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España)". *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica GeoFocus*, 3, pp. 1-10.
- ERKUT E. and NEUMAN S. (1992): "A multiobjective model for locating undesirable facilities". *Annals of Operations Research*, 40, pp.209-207.
- European Comisión (2002): "Potencial y aprovechamiento energético de la biomasa del olivar en Andalucía" *Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía (SODEAN)*, pp. 1-23.
- European Union, (1993): *Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan*. COM (97) 599, 26/11/97.
- FREPPAZ D., MINCIARDI R., ROBA M., ROVATTI M., SACILE R., and TARAMASO A. (2004): "Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level" *Biomass and Energy* 26, pp.15-25.
- GARCÍA-IBÁÑEZ P., CABANILLAS A. and SÁNCHEZ J.M. (2004): "Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidised bed reactor. Preliminary results" *Biomass and Bioenergy*, 27, pp. 183-194.
- GIANNIKOS I. (1998): "A multiobjective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes". *European Journal of Operational Research*, 104, pp. 333-342.
- GRAHAM R. L., ENGLISH B.C. and NOON C.E. (2000): "A geographic information system-based modelling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock". *Biomass and Bioenergy*, 18, pp. 309-329.

- GUERRERO F., PARALERA C., CABALLERO R., GONZALEZ M. and MOLINA J. (2004): "Location of specific risk material incineration plants in Andalusia using a multicriteria approach" *Investigation Operacional*, 26,2, pp. 135-141.
- HALL D. and SCRASE J. (1998): "Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future?" *Biomass and Bioenergy*, 15, 4/5, España, pp. 357-367.
- IGNIZIO J. and ROMERO C. (2003): "Goal Programming". *Encyclopedia of Information Systems*, 2, pp. 489- 500.
- KRUKANONT P. and PRASERTSAN (2004): "Geographical distribution of biomass and potential sites of rubber wood fired plants in Southern Thailand" *Biomass and Bioenergy*, 26, pp. 45-59.
- LINARES P. and ROMERO C. (2000): "A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: economic versus environmental objectives". *Journal of the Operational Research Society*, 51, pp.736-746.
- MINER. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (1996): *3º Manual de Energías Renovables: Energía de la Biomasa*. Altener.
- NAGEL J. (2000): "Determination of an economic energy supplí structure based on biomass using a mixed-integer linear optimization model" *Ecological Engineering*, 1, pp. 91-102
- NOON C.E. and DALY M.J. (1996): "GIS-Based Biomass Resource Assessment with BRAVO," *Biomass and Bioenergy*, 10, 2-3, pp. 101-109.
- PARI L. (2001): "Energy production from biomass: the case of Italy" *Renewable Energy*, 22, pp. 21-30.
- PARIKKA M. (2004): "Global biomass fuel resources". *Biomass and Bioenergy*, 27, pp. 613-620.
- ROMERO C. (1993): *Teoría de la Decisión Multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*, Madrid, alianza editorial.
- WEST T., MILLS N. and RANDHAWA S. (1988): "Site selection to minimize fuel handling and transportation cost". *World Productivity Forum*, pp. 533-536.
- WEST T., MILLS N. and RANDHAWA S. (1987): "A Multicriteria Approach to evaluating Sites for Small Biomass-Fueled Electrical Generation Plants". *World Productivity Forum*, pp. 193-197.
- WISE K., PERUSHEK D. (2000): "Goal Programing as a Solution Technique for the Acquisitions Allocation Problem". *Library & Information Science Research*, 22, 2, pp. 165-183.

