

Una modelización multiobjetivo para el análisis de medidas de ahorro energético en la Comunidad de Madrid

Cámara, Angeles^a; Liberatore, Federico^b; Monrobel, José Ramón^c

^a Universidad Rey Juan Carlos

E-mail: angeles.camara@urjc.es

^b Universidad Rey Juan Carlos

E-mail: federico.liberatore@urjc.es

^c Universidad Rey Juan Carlos

E-mail: joseramon.monrobel@urjc.es

Resumen

La Comunidad de Madrid se enfrenta a dos problemas energéticos, su alta dependencia energética y sus elevados índices de contaminación atmosférica. Para solucionarlos, el Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012 plantea como objetivos a lograr en 2012 reducir la demanda energética hasta 12,26 Mtep, aumentar el consumo de energías renovables hasta el 3,4% y reducir las emisiones de CO₂ un 10%. En este contexto presentamos un ejercicio de programación multiobjetivo en el que buscamos optimizar conjuntamente tanto objetivos macroeconómicos como medioambientales. Para ello utilizaremos una matriz de contabilidad social de la Comunidad de Madrid en la que incluiremos el sector de energías renovables, que nos servirá de base de datos para calibrar un modelo de equilibrio general en el que quedarán representadas las decisiones optimizadoras de los agentes económicos. Con estas herramientas estudiaremos cómo compaginar políticas con criterios tanto económicos como medioambientales.

Abstract

The Community of Madrid faces two energetic problems: high energetic dependency and high air pollution index. In order to find a solution, the Energetic Plan of the Community of Madrid 2004-2012 establishes as goals to be achieved in 2012 the reduction of energetic demand by 12.26 Mtoe, the increase of renewal energies consumption by 3.4%, and the reduction of CO2 emissions by 10%. Within this context, we present a multiobjective model for the joint optimization of macroeconomic and environmental goals. We consider the social account matrix of the Community of Madrid, extended to include the renewable energy sector. The matrix is used as database for a general equilibrium model where the economic agents' optimal decisions are represented. The resulting tool is used to devise policies which consider both economics and environmental criteria.

Palabras clave: Programación Multiobjetivo, Modelos de Equilibrio General Aplicado, Energías Renovables, Matriz de Contabilidad Social, Comunidad de Madrid

Área temática: 4. Modelos de Equilibrio General Aplicado

1 Introducción

En la actual coyuntura de pérdida de actividad económica y de empleo se hace necesario el apoyo institucional a nuevos sectores que aporten a la economía un alto valor añadido y con capacidad para generar empleo. Uno de estos sectores es el de las energías renovables, que en la Comunidad de Madrid se ha desarrollado considerablemente a partir del año 2004, destacando la energía solar y la energía procedente de la biomasa.

Este desarrollo se ha producido en el marco del Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012, que tiene como objetivos disminuir la elevada dependencia energética de la región, fomentar el ahorro energético y la eficiencia energética, promover el uso de recursos energéticos renovables y disminuir los efectos medioambientales del consumo energético.

Estos objetivos se concretan en las siguientes cifras, a alcanzar al final del Plan en el año 2012:

- Reducción de un 10% del consumo energético en el año 2012 respecto del escenario tendencial, por medidas de ahorro y eficiencia.
- Duplicar la energía generada anualmente por fuentes renovables, sobrepasando los 400 ktep/año al final del Plan.
- Reducir en el año 2012 la emisión de CO₂ en un 10 % respecto al escenario tendencial.

La consecución de estos objetivos choca con el hecho de que en Madrid se concentren un elevado volumen de población y actividades económicas intensivas en consumo energético (por ejemplo, transporte y comunicaciones) que la hace muy dependiente en términos energéticos. Pese a ello, se han realizado esfuerzos de implantación de energías renovables en la región.

Entre los sectores de energías renovables que se han implantado en Madrid el que mayor número de empleos ha proporcionado es el solar fotovoltaico con 2.677 empleos, seguido del solar térmico con 2.359 empleos, del sector de los biocombustibles con 2.058 empleos y del sector eólico que proporciona 2.362 empleos

(datos recogidos de ISTAS-CCOO). Esta implantación de los sectores de energías renovables ha mitigado los dos problemas energéticos de la Comunidad, su alta dependencia energética y su alta contaminación atmosférica, pero actualmente este último problema sigue sin solución enfrentándose la Comunidad de Madrid a posibles sanciones por parte de la Unión Europea.

Por ello en este trabajo nos centramos en estudiar cómo optimizar las ayudas públicas incluidas en el Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012 para con el menor aumento de déficit público conseguir la mayor reducción de emisiones contaminantes.

En resumen, en este trabajo realizamos un ejercicio de programación multiobjetivo en el que buscamos optimizar conjuntamente tanto objetivos macroeconómicos como medioambientales. Para ello, en el epígrafe 2 se presenta la matriz de contabilidad social construida para la Comunidad de Madrid relativa al año 2008 (SAM¹-MAD-2008), en la que se incluye el sector de energías renovables desagregado en dos ramas (una rama que engloba los sectores Biomasa, RSU² y Biogás y una segunda rama que engloba los sectores Solar, Hidráulica, Eólica y Biocarburantes). En el epígrafe 3 se presenta el modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) en el que quedarán reflejados los comportamientos optimizadores de los agentes económicos que componen la economía de la región, en el epígrafe 4 se expondrá la modelización realizada utilizando técnicas de programación multiobjetivo y en el epígrafe 5 se reflejarán las conclusiones obtenidas.

2 Construcción de la base de datos: SAM-MAD-2008

Para la construcción de la SAM-MAD-2008 se ha realizado una actualización de la SAM-MAD-2002 construida a partir de los datos proporcionados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM). La razón para realizar una actualización en lugar de construir una matriz nueva es que el último Marco Input-Output (MIO) con tablas a precios de adquisición publicado por la Comunidad de Madrid es el referido al año 2002.

¹ SAM son las iniciales de Social Accounting Matrix

² RSU son las iniciales de Residuos Sólidos Urbanos

Para llevar a cabo la actualización al año 2008 se ha utilizado el método de minimización de la entropía (Robinson *et al*, 2001) a partir de la matriz conocida del año 2002 (Monrobel, 2010) y los datos macroeconómicos del año 2008 publicados por el IECM. El motivo de elegir el año 2008 para realizar la actualización, es que es el último año para el que se dispone de datos medioambientales proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente.

Posteriormente se ha desagregado el sector energético, que en el MIO de la Comunidad de Madrid aparece agregado en una sola cuenta, en tres cuentas diferenciadas: Energía no renovable; Energía de la Biomasa, RSU y Biogás y, por último, Energía Solar, Hidráulica, Eólica y Biocarburantes.

La estructura de la matriz construida se puede resumir en la siguiente tabla:

Tabla 1. Estructura contable de una SAM

	Producción	Factores Productivos	Impuestos	Sectores Institucionales	Ahorro/ Inversión	Sector Exterior
Producción	Consumos Intermedios			Consumo de los sectores	Formación bruta de capital	Exportaciones
Factores Productivos	Remuneración asalariados/ Excedente bruto de explotación					
Impuestos	Impuestos			Impuestos	Impuestos	
Sectores Institucionales		Remuneración asalariados/ Excedente bruto de explotación	Impuestos	Transferencias entre sectores institucionales		Transferencias del sector exterior
Ahorro/ Inversión				Ahorro sectores institucionales		
Sector Exterior	Importaciones			Transferencias al sector exterior		

Fuente: Elaboración propia

Las cuentas incluidas en la SAM-MAD-2008 las presentamos en la siguiente tabla:

Tabla 2. Cuentas de la SAM-MAD-2008

PRODUCCIÓN	1. Agricultura y ganadería
	2. Energía no renovable y Minería
	3. Biomasa, RSU y Biogás
	4. Solar, Hidráulica, Eólica y Biocarburantes
	5. Metalurgia y productos metálicos
	6. Maquinaria industrial
	7. Material eléctrico y electrónico
	8. <i>Material de transporte</i>
	9. Alimentación
	10. Industria química
	11. Industria no metálica
	12. Industrias manufactureras
	13. Construcción
	14. Comercio y Restauración
	15. Transportes y comunicaciones
	16. Servicios destinados a la venta
	17. Servicios no destinados a la venta
	18. Otros servicios
FACTORES PRODUCTIVOS	19. Capital
	20. Trabajo
IMPUESTOS	21. Impuestos sobre productos
	22. Impuestos netos sobre producción
SECTORES INSTITUCIONALES	23. Hogares
	24. Sociedades
	25. ISFLSH
	26. Administraciones Públicas
AHORRO/INVERSIÓN	27. Ahorro/Inversión
SECTOR EXTERIOR	28. Sector Exterior

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la desagregación del sector energético se ha utilizado el Balance Energético de la Comunidad de Madrid 2008³, en el que se recogen los datos de consumo y generación para los diferentes tipos de fuentes energéticas.

³ Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2009)

Tabla 3. Consumo de energía final en la Comunidad de Madrid (año 2008)

P. Petrolíferos	6.673
Electricidad	2.636
Gas natural	2.047
Energía térmica	175
Carbón	17
Biocombustibles	8
Total (ktep)	11.556

Fuente: Balance Energético 2008

Tabla 4. Generación de energía renovable en la Comunidad de Madrid

Hidráulica	8,8
RSU	19,3
Tratamiento de residuos	22,7
Solar térmica	7
Solar fotovoltaica	2,1
Biocombustibles	1,2
Biomasa	104,4
Total (ktep)	165,3

Fuente: Balance Energético 2008

La Comunidad de Madrid importa y exporta energía renovable. En concreto, contrastando las Tablas 3 y 4 podemos observar que importa 6,8 ktep de biocombustibles y según información del Balance Energético 2008 sabemos que el consumo de biocarburantes fue de 8 ktep. También sabemos que la Comunidad de Madrid exporta biomasa pues genera 104,4 ktep y consume 80,5 ktep, según los datos proporcionados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE).

Para desagregar las ramas de energía renovable en dos bloques se han utilizado los datos proporcionados por el Balance Energético 2008 para saber el total de energía generada de cada uno de los tipos. En concreto, se generaron 146,4 ktep de Biomasa y Residuos y se generaron 19,1 ktep de Hidráulica, Solar y Biocarburantes.

Para obtener los gastos derivados de la producción de energías renovables, además de las fuentes anteriormente mencionadas se ha utilizado el informe “Energías renovables y empleo en la Comunidad de Madrid” elaborado por Arregui *et al* (2009). En concreto, de este informe hemos obtenido los datos de empleo en energías renovables, datos que queremos comentar debido a la alta descompensación que existe entre empleo y potencia instalada/producción. En la Comunidad de Madrid se encuentra mucho más desarrollada en términos de producción la rama Biomasa/RSU/Biogás que la rama Solar/Hidráulica/Eólica/Biocarburantes; en cambio, en términos de empleo generan mucho más empleo estas últimas, destacando sobre las demás la energía Solar.

Esto es debido a que la Comunidad de Madrid proporciona empleos relacionados con gestión, coordinación, planificación, proyectos,..., pero no ha desarrollado suficientemente las tecnologías renovables en lo que se refiere a instalaciones que produzcan energía. Esto redundaría en el problema de su alta dependencia energética, pues los empleos generados en la Comunidad de Madrid dependen de la implantación de estas energías en otras comunidades.

Una vez construida nuestra base de datos, SAM-MAD-2008, en el siguiente epígrafe presentamos el modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) que hemos utilizado para la modelización.

3 Modelo de equilibrio general aplicado

El modelo que hemos elaborado, se realiza con una visión neoclásica del equilibrio de Walras extendido con el gobierno, sector exterior y sociedades, modelizando los sectores productivos en competencia perfecta, pleno empleo de los factores productivos y vaciado de todos los mercados de bienes

En los epígrafes siguientes señalaremos los rasgos y características principales del modelo de equilibrio general aplicado teniendo en cuenta que su elaboración persigue el análisis de la Política Energética de la Comunidad de Madrid en el periodo 2004-2012.⁴

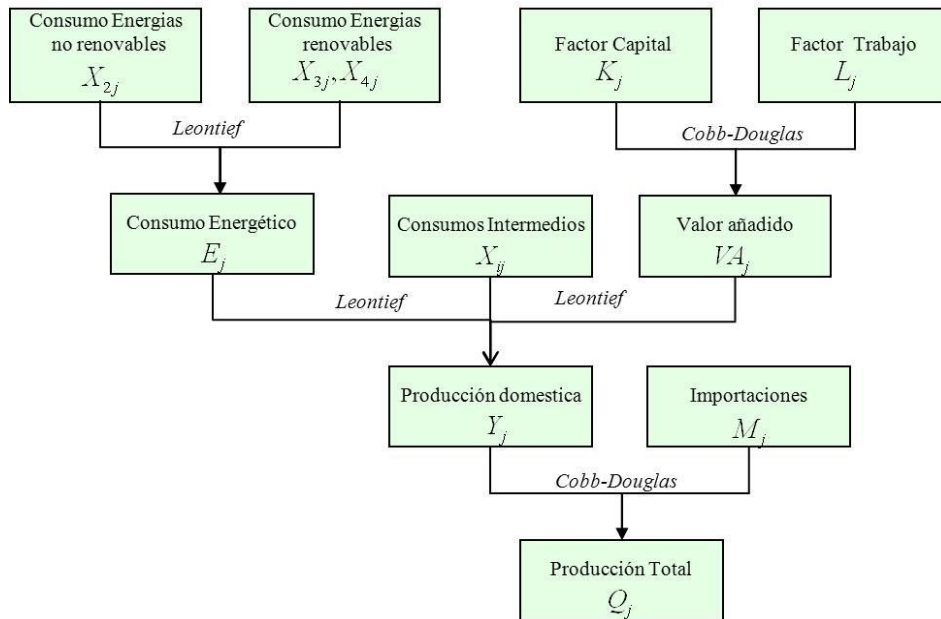
3.1 Sectores productivos

El entramado productivo está compuesto por 18 sectores productivos, de los cuales tres de ellos se corresponden con sectores energéticos. Recordemos, el sector 2 comprende la rama de energías no renovables, y los sectores 3 y 4 son los sectores de energías renovables.

Hemos considerado, en el modelo, que prevalece la competencia perfecta en todos los mercados de bienes y que cada una de las ramas productivas diferenciadas comercializa un único bien homogéneo utilizando una tecnología con rendimientos de escala constantes. Por tanto el objetivo de cada sector será maximizar los beneficios después de impuestos.

⁴ La modelización del resto de agentes y características no incluidos en este trabajo puede encontrarse en Monrobel (2010) siendo la habitual en este tipo de modelos.

Gráfico 1. Estructura anidada de la producción



Fuente: Elaboración propia

En el último nivel de anidamiento, para permitir la sustitución entre los factores productivos, capital y trabajo, se modela el valor añadido de cada sector con una función Cobb-Douglas con rendimientos de escala constantes.

$$VA_j = \delta_j K_j^{\theta_j} L_j^{1-\theta_j}$$

Por otro lado, se define el input energético utilizado por el sector j , como combinación de los consumos de los bienes de los tres sectores energéticos, mediante una función de tipo Leontief,

$$E_j = \min_{i=2,3,4} \left\{ \frac{X_{ij}}{a_{ij}} \right\}$$

En el segundo nivel, la producción doméstica del sector se obtendrá combinando la utilización del resto de bienes intermedios no energéticos, el bien Energía y el factor primario compuesto valor añadido en proporciones fijas mediante una función tipo Leontief.

$$Y_j = \min_{i \neq 2,3,4} \left\{ \frac{X_{ij}}{b_{ij}}, \frac{E_j}{e_j}, \frac{VA_j}{v_j} \right\}$$

Finalmente, bajo el supuesto de que los bienes de distintos países o regiones son sustitutos imperfectos, la producción total de cada sector vendrá dada mediante una combinación de la producción doméstica, Y_j con las importaciones del sector, M_j , mediante una función Cobb-Douglas, para la obtención de la función de producción total

$$Q_j = \beta_j Y_j^{\alpha_j} M_j^{1-\alpha_j}$$

Las ecuaciones del modelo que determinan los distintos valores de las variables se obtienen resolviendo los programas de optimización de tal forma que los productores minimizan los costes en cada uno de los niveles de anidamiento, esto es, los costes de la producción total y doméstica y el coste del valor añadido y el coste en energía

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=2,3,4} p_i \cdot X_{ij} \\ \text{s.a. } E_j = \min_{i=2,3,4} \left\{ \frac{X_{ij}}{a_{ij}} \right\} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=2,3,4} p_i \cdot X_{ij} + p_j E_j + p_{V_j} VA_j \\ \text{s.a. } Y_j = \min_{i=2,3,4} \left\{ \frac{X_{ij}}{b_{ij}}, \frac{E_j}{e_j}, \frac{VA_j}{v_j} \right\} \end{array} \right.$$

Respecto a los tributos, hemos desagregado las cotizaciones pagadas por los empresarios, considerando que cada sector abona un tipo impositivo constante, T_j^{CSS} . También señalar que se ha establecido que el precio al consumidor final de cada uno de los bienes, p_j' , está gravado por un único tipo impositivo indirecto, T_j^{IP} . En este impuesto se han agrupado los impuestos sobre productos y producción, los impuestos que gravan las importaciones, el IVA, etc.

3.2 Sector Público

En el modelo el gobierno representa a todas las instituciones públicas: estatales, autonómicas y locales. Su principal papel es actuar como demandante de bienes y servicios y recaudador de impuestos, aunque sus ingresos provienen de distintas fuentes: los reportados por la renta de capital de su propiedad, $r \cdot K_G$, siendo r el coste del capital, por la recaudación de los distintos tipos de impuestos y los recibidos como transacciones netas con el resto del mundo, TRM^G .

Esta recaudación de impuestos está desglosada en: los obtenidos por impuestos indirectos a la producción, RTP , las aportaciones a la seguridad social por parte de los

empleadores, $RTCS$, la recaudación por impuestos a las sociedades, RSO , y por último la recaudación de impuestos directos a los consumidores sobre su renta, RD .

Como hemos señalado, el gobierno utiliza estos ingresos para financiar su gasto en consumo de bienes, C_j^G , además de realizar diversas transferencias con el resto de las instituciones, hogares en forma de prestaciones sociales, etc. y con las sociedades, que consideramos a ambas ponderadas por un índice de precios al consumo, ipc .

$$GP = \sum_{j=1}^{18} p_j^G C_j^G + ipc \cdot (TSP^H + TSP^{SO})$$

Tenemos que tener en cuenta que el gobierno de la Comunidad de Madrid, componente del sector público, aportará las ayudas que percibirán los sectores productivos⁵ y que en nuestro modelo debemos considerarlo como un gasto realizado por el sector público, R_{SP} .

En el modelo elegido hemos decidido mantener constante el nivel de actividad del gobierno, aunque el gasto público puede variar como resultado de los cambios en los precios. Esto es, se han considerado como variables exógenas las transferencias del gobierno a los hogares y el consumo público.

El déficit o superávit público queda determinado de manera endógena, como la diferencia entre sus ingresos y el gasto público, incluyendo su aportación al Plan Energético, destinándose a complementar el ahorro privado para financiar la inversión.

$$DP = r \cdot K_G + RTP + RTCS + RSO + RD - \sum_{j=1}^{27} p_j^G C_j^G - ipc \cdot (TSP^H + TSP^{SO} - TRM^G) - R_{SP}$$

3.3 Ahorro e Inversión

Si bien, tanto el ahorro como la inversión tienen un carácter dinámico, se incluyen en este modelo estático como cierre macroeconómico; definiendo la inversión como compra de bienes de capital y por tanto componente de la demanda final. Simplemente consideramos que el nivel total agregado de inversión coincide con el

⁵ En el equilibrio inicial supondremos que la cantidad aportada por la Comunidad de Madrid es cero, ya que se considera el año de referencia como el año en el que se inicia el periodo de la Política Energética.

ahorro total (ahorro privado, C_{AH} , ahorro de sociedades, AH_{SO} , superávit público y saldo comercial con el exterior, DRM), lo que representa un cierre del modelo neoclásico.

Sin embargo, aunque es habitual en este tipo de modelos considerar que el ahorro (exógeno) determina el nivel de inversión (endógena), hemos modificado este cierre considerando los niveles de inversión como variables exógenas y el ahorro de los consumidores y sociedades como endógenas. Esto se debe al tipo de simulaciones que realizaremos posteriormente.

$$\sum_{j=1}^{27} p'_j I_j = p_s C_{AH} + AH_{SO} + DP + DRM$$

3.4 Ayudas públicas al sector energético

La inyección de las ayudas procedentes de la Política Energética de la Comunidad de Madrid se ha modelizado como un shock directo en la demanda final de los bienes de los tres sectores energéticos de nuestro modelo: el sector 2 de Energías no renovables y los sectores 3 y 4 de Energías renovables.

Con este propósito, la inyección directa de las ayudas recibidas por parte de la Comunidad de Madrid se realizará mediante el incremento de variables ad hoc que se han introducido en el modelo con el objeto de medir la aportación de dichas ayudas.

$$p'_j R_j = \varepsilon_j R_{SP} \quad j = 2, 3, 4$$

$$\sum_{j=2,3,4} p'_j R_j = R_{SP}$$

De manera que R_j medirá el shock directo en la demanda del bien correspondiente al sector productivo j -ésimo como resultado de la recepción directa de las ayudas. En consecuencia el incremento en términos monetarios de la demanda vendrá determinado por $p'_j R_j$, recordando que p'_j es el precio final de venta del bien.

Los coeficientes ε_j representarán la participación porcentual de cada una de las ramas energéticas sobre el total de los recursos que serán aportados por la Comunidad de Madrid, R_{SP} .

3.5 Emisiones

En el modelo asumimos que la totalidad de emisiones de gases de efecto invernadero de cada sector depende exclusivamente del consumo del sector en energías no renovables, considerando esta relación lineal⁶.

$$EM_j = \omega_j \cdot X_{2j}$$

Por tanto, la cantidad de gases emitidos por el sector j , EM_j , es proporcional a su consumo en energías no renovables, X_{2j} , siendo la constante ω_j las emisiones por unidad consumida, cuyo valor será obtenido en la calibración del modelo.

3.6 Equilibrio y Calibración

La noción de equilibrio utilizada es la extensión del concepto neoclásico de equilibrio de tipo Arrow-Debreu de carácter walrasiano, incluyendo el gobierno y el sector exterior. Este equilibrio queda plasmado como un determinado conjunto de precios de bienes y factores, de niveles de actividad tales que verifican que:

- Todos los mercados de factores y bienes se vacían.
- El consumidor maximiza su utilidad restringida a su renta disponible.
- El gobierno ajusta su déficit con respecto a sus ingresos y gastos.
- Cada uno de los sectores productivos tienen un comportamiento optimizador con sus restricciones tecnológicas de tal forma que dan lugar a beneficios nulos, dada la existencia de rendimientos de escala constante, y minimizan sus costes.
- Finalmente, se cumple la igualdad entre ahorro e inversión agregados.

Para la obtención de los valores numéricos de todos los parámetros y coeficientes de las funciones que describen las relaciones del modelo se ha utilizado como fuente principal y base de datos la actualización de la Matriz de Contabilidad

⁶ Si bien el carácter lineal ha sido utilizado en trabajos anteriores, entre otros Andre et al (2010), en éste hemos vinculado la emisiones al consumo en energías no renovables, en lugar de la producción total de cada sector.

Social de la Comunidad de Madrid del año 2002 al año 2008 a precios de adquisición. Los valores calibrados se determinan suponiendo que dicha matriz representa un equilibrio de la economía madrileña y tomando, como es habitual, el nivel de todos los precios unitarios.

Tenemos que señalar que las variables R_j ($j = 2,3,4$), que representan las ayudas de la Comunidad de Madrid son nulas en el equilibrio inicial, ya que entendemos que estos recursos no han sido todavía recibidos por los sectores energéticos.

Respecto a la obtención de los valores de las constantes ω_j que miden la cantidad de emisiones de gases de cada sector por unidad consumida de energías no renovables se obtiene mediante el vector inicial de emisiones contaminantes elaborado a partir de los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística.

Tabla 5. Emisiones iniciales

SECTORES PRODUCTIVOS	EMISIONES Ktep.	CONSUMO EN NO RENOVABLES (M €)	ω_j (Ktep/M €)
1. Agricultura y ganadería	456,51	18,77	24,3176
2. Energía no renovable y Minería	3.477,90	1.252,29	2,7772
3. Biomasa, RSU y Biogás	0,01	1,89	0,0078
4. Solar, Hidráulica, Eólica y Biocarburantes	0,00	0,26	0,0000
5. Metalurgia y productos metálicos	54,84	209,75	0,2615
6. Maquinaria industrial	100,78	33,72	2,9885
7. Material eléctrico y electrónico	38,91	85,15	0,4569
8. Material de transporte	203,97	48,28	4,2246
9. Alimentación	18,85	102,12	0,1845
10. Industria química	222,45	60,09	3,7020
11. Industria no metálica	4.489,30	658,08	6,8218
12. Industrias manufactureras (textil, papel,...)	4.942,23	418,37	11,8131
13. Construcción	761,06	529,52	1,4373
14. Comercio y Restauración	678,17	1.068,63	0,6346
15. Transportes y comunicaciones	11.027,14	2.461,70	4,4795
16. Servicios destinados a la venta (Inmobiliarias y alquileres, a empresas, recreativos y financieros)	110,42	1.460,11	0,0756
17. Servicios no destinados a la venta (educación, sanidad, personales y AP)	282,57	897,60	0,3148
18. Otros servicios	70,97	139,13	0,5101

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

4 Políticas óptimo-paretianas económicas y medioambientales

El objetivo de este apartado es presentar una metodología, como es la programación multiobjetivo junto con el modelo de equilibrio general aplicado, que nos permita determinar el conjunto de distribuciones óptimas o eficientes (en el sentido paretiano) de los recursos que la Comunidad de Madrid va a destinar durante los próximos años en su política energética.

Este enfoque creemos que puede resultar enriquecedor ya que posibilita el análisis de la Política Energética madrileña en el periodo 2004-2012, teniendo en cuenta de manera conjunta múltiples objetivos públicos que pudieran ser contrapuestos, como son, por un lado objetivos de tipo económico (déficit público, incremento del PIB, etc) y por otros objetivos medioambientales (emisiones de gases contaminantes a la atmosfera).

Antes de presentar la aplicación de esta metodología matemática a nuestro estudio, hemos considerado conveniente describir brevemente, algunas de sus principales características.

4.1 Programación Multiobjetivo

Un programa de optimización multiobjetivo puede ser escrito de la forma⁷

$$\begin{array}{l} \text{Min } f(x) = (f_1(x), \dots, f_p(x)) \\ \text{s.a. } x \in \Omega \end{array} \Bigg\} (P)$$

En la mayoría de los problemas, los distintos objetivos serán contrapuestos, lo cual implica que no exista un punto x_0 factible que sea óptimo de todas y cada una de las funciones objetivos. Este hecho hace que sea necesario definir un concepto de óptimo más débil que los programas escalares, ya que de no hacerlo así prácticamente la totalidad de los programas multiobjetivo carecerían de solución.

⁷ Para describir los programas multiobjetivo se ha considerado que el objetivo es la minimización de cada una de las funciones objetivo. Este hecho no hace que se pierda generalidad ya que la maximización de alguna de las funciones es equivalente a la minimización del negativo de dicha función.

4.1.1 Optimalidad Paretiana

Consideremos el orden usual o natural de \mathbb{R}^p definido de la siguiente forma:

$$\text{Dados } \bar{u} \in \mathbb{R}^p \text{ y } \bar{v} \in \mathbb{R}^p \text{ diremos } \bar{u} \leq \bar{v} \text{ si } u_i \leq v_i \quad \forall i = 1, \dots, p$$

Este orden nos posibilita la definición de óptimos para programas multiobjetivo:

DEFINICIÓN 1: Diremos que un punto factible x_0 es un *óptimo de Pareto* o *solución del programa (P)* si no existe ningún otro punto factible, x , tal que

$$f(x) \leq f(x_0) \text{ y } f(x) \neq f(x_0)$$

Esto es,

$$f_i(x) \leq f_i(x_0) \quad \forall i = 1, \dots, p \quad \text{con algún } j \text{ que } f_j(x) < f_j(x_0)$$

Consideraremos, por tanto que estamos en una situación óptima (en el sentido de Pareto) cuando no es posible mejorar alguno de los objetivos sin empeorar en algún otro.⁸

4.1.2 Curva eficiente

Otra consecuencia de que el orden de \mathbb{R}^p sea un orden parcial es que el valor de las imágenes de dos óptimos de Pareto no han de coincidir a diferencia de lo que ocurre en la programación escalar. Dichos valores no son comparables con el orden de \mathbb{R}^p . Este hecho motiva la siguiente definición:

DEFINICIÓN 2: Se denomina *línea o curva eficiente* del programa multiobjetivo (P) al siguiente subconjunto de \mathbb{R}^p

$$Eff = \{f(x_0) \mid x_0 \text{ es óptimo de Pareto}\}$$

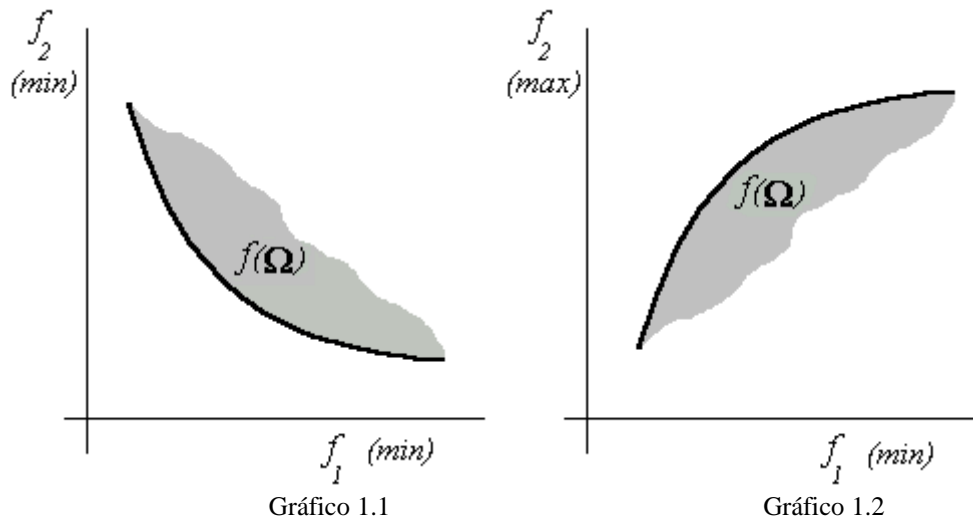
A continuación se representan gráficamente diferentes tipos de curvas eficientes para programas con dos objetivos. La figura 1.1 se trata de un programa en el que se minimizan los dos objetivos y la figura 1.2 representa la curva eficiente al maximizarse uno de los objetivos y minimizarse el otro.

⁸ Debemos señalar que la optimalidad paretiana no implica que

$$f(x_0) \leq f(x) \quad \forall x \in \Omega$$

ya que el orden de \mathbb{R}^p (con $p > 1$) no es un orden total y por tanto existirán puntos no comparables.

Gráfico 2. Curvas eficientes.



4.1.3 Método de las ponderaciones

Existen diversos métodos para la obtención de las soluciones de programas multiobjetivo que se basan en la resolución de programas escalares cuyas soluciones coinciden con los óptimos de Pareto del programa multiobjetivo original. En este trabajo describiremos el método denominado de las ponderaciones y enunciaremos sus principales propiedades.

Dado el programa multiobjetivo (P) y $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_p) \in \mathbb{R}^p$ no negativo ($\alpha_i \geq 0 \forall i = 1, \dots, p$) consideremos el siguiente programa escalar

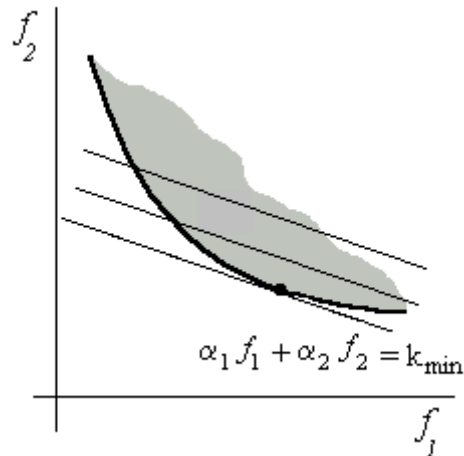
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \\ \text{s.a. } x \in \Omega \end{array} \right\} P_\alpha$$

Las proposiciones que a continuación enunciamos permiten, bajo ciertas condiciones y mediante la resolución del programa escalarizado anterior, obtener la línea eficiente del programa multiobjetivo original.

PROPOSICIÓN 1. Si α es positivo, es decir, $\alpha_i > 0 \forall i = 1, \dots, p$ y x_0 es un óptimo global del programa escalarizado (P_α) entonces x_0 es solución del programa multiobjetivo (P) y al punto x_0 se le denomina solución propia.

En la figura 2, que aparece a continuación, se ilustra la proposición anterior. Las curvas de nivel de la función escalarizada ($\alpha_1 > 0$ y $\alpha_2 > 0$) alcanzan su valor mínimo en uno de los óptimos de Pareto.

Gráfico 3. Curvas de nivel de la función escalarizada.



PROPOSICIÓN 2. Si α es no negativo, es decir, $\alpha_i \geq 0 \forall i = 1, \dots, p$ no nulo y x_0 es solución (óptimo global) única del programa escalarizado (P_α) entonces x_0 es solución del programa multiobjetivo (P).

PROPOSICIÓN 3. Si el conjunto factible y las funciones objetivo del programa multiobjetivo son convexas, para cada solución x_0 del programa multiobjetivo (P), existen $\alpha_1, \dots, \alpha_p \geq 0$, con al menos alguno de ellos no nulo, tales que x_0 es óptimo global del programa escalarizado P_α

Las tres proposiciones nos permite mediante el método de las ponderaciones obtener la línea eficiente completa del programa multiobjetivo en el caso de que éste sea convexo. En efecto, si el programa multiobjetivo (P) es convexo, para resolverlo basta solucionar los programas escalares (P) con α no negativos. Todas las soluciones (óptimos globales) que correspondan a un α positivo son ya soluciones del programa (P) (óptimos de Pareto), así como las que correspondan a un α no negativo, siempre que sean únicas. Finalmente, de la última proposición se deduce que todas las soluciones del programa multiobjetivo están entre las soluciones de los programas escalarizados. para α no negativos.

Además, sin pérdida de generalidad podemos tomar los escalares α_i tales que su suma sea uno. De esta forma podemos interpretar que cada uno de los escalares α_i es el "peso" que el decisor da a cada uno de los objetivos, ya que cuanto mayor sea el valor de α_i menor será el valor alcanzado por la función objetivo, f_i , en el óptimo propio.

En las figuras siguientes se ilustra la proposición que acabamos de demostrar. En la figura 3.1 podemos observar que la curva eficiente es convexa y que el óptimo de Pareto x_0 es un mínimo de la función escalarizada $\alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x)$. En la figura 4 se observa que los óptimos de Pareto x_1 y x_2 pueden ser hallados mediante la escalarización de los objetivos, mientras que el óptimo paretiano x_0 no es solución de ningún programa escalarizado. (El programa de la figura 3.2 no es convexo).

Gráfico 4. Soluciones de los programas ponderados.

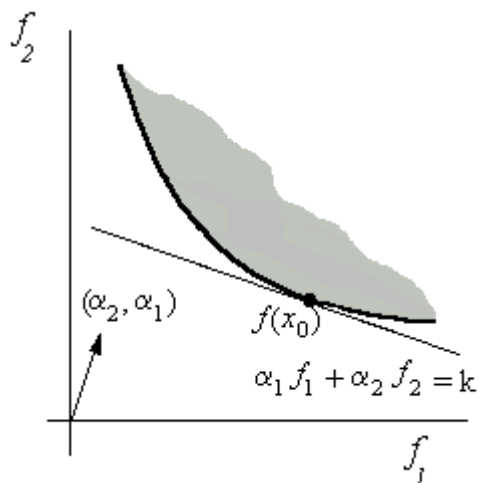


Gráfico 3.1

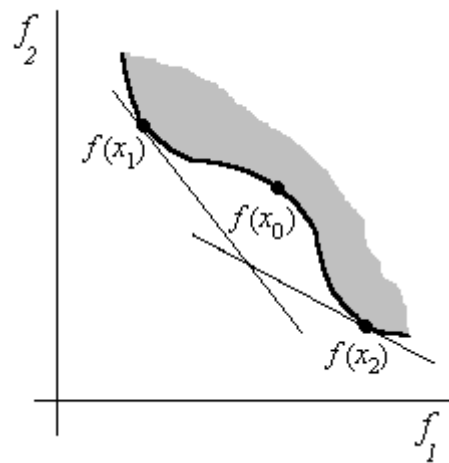


Gráfico 3.2

Una vez descrita la metodología matemática que utilizaremos, describiremos brevemente las principales características de la Política Energética de la Comunidad de Madrid que pretendemos analizar.

4.2 Política Energética de Comunidad de Madrid

Los objetivos medioambientales del Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012 se pueden resumir en las siguientes acciones:

Se espera incrementar la producción energética de las renovables desde el nivel inicial de unos 203 ktep/año, a un nivel prácticamente doble, de 406 ktep/año. Para ello se prevé una inversión total de 774 M€, que contarían con ayudas del Plan por valor de más de 100 M€.

En concreto, el presupuesto público para llevarlo a cabo asciende a 123 M€, que deberán repartirse casi uniformemente a lo largo del Plan, con valores anuales entre 13 y 17 M€. En la modelización que planteamos en el siguiente epígrafe se recogen exclusivamente las ayudas públicas del Plan (123 M€) que serán invertidas tanto en energías renovables como no renovables y se analizará la eficiencia medioambiental, medida en emisiones equivalentes de CO₂, de cada una de las opciones de inversión.

4.3 Modelización de la Política Energética de la Comunidad de Madrid

Como hemos comentado plantearemos la Política Energética como un problema de decisión para la Comunidad de Madrid. De esta forma asumiremos que el propósito del sector público debe ser determinar la distribución de sus ayudas entre los sectores energéticos de tal forma que dicha distribución sea eficiente, es decir, al menos óptima paretiana respecto a sus objetivos, por un lado medioambientales y por otro económicos.

Respecto a los instrumentos de decisión que el sector público dispone para realizar dicha tarea, hemos asumido que las únicas *variables de decisión* de que dispone la Comunidad de Madrid para llevar a cabo una política eficiente es el reparto de las ayudas entre los tres sectores energéticos. Esto se traduce en nuestro modelo en determinar los valores que representan los porcentajes que recibirán cada uno de las ramas sobre el total de los recursos públicos asignados.

Respecto a los *objetivos perseguidos* por la Comunidad de Madrid, hemos considerado un programa biobjetivo:

- Como objetivo económico hemos asumido que la política de ayudas energéticas debe suponer el menor incremento en el déficit público. Esto, en

términos del modelo de equilibrio planteado en el apartado anterior, supone la maximización del superavit público, DP , tras la inyección de los recursos públicos a los sectores productivos, que se traduce en el siguiente programa de optimización uniobjetivo:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max } DP(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ \text{s.a. } \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 \in F \end{array} \right\} (P_1)$$

- El objetivo medioambiental de la política energética regional será la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. En nuestro modelo, hemos considerado la totalidad de emisiones de gases contaminantes como la suma de la cantidad de gases emitidos por cada sector, E_j , y en consecuencia el objetivo regional medioambiental será la minimización de dichas emisiones:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{j=1}^{18} E_j(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ \text{s.a. } \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 \in F \end{array} \right\} (P_2)$$

El conjunto factible, F , tendrá que representar el conjunto de todas las políticas energéticas regionales posibles. En términos de la modelización este quedará determinado por el cumplimiento de todas las ecuaciones del modelo desarrollado, lo que implica una situación de equilibrio de la economía regional tras la recepción de las ayudas públicas a los tres sectores energéticos, cuyo presupuesto asciende a 123 millones de euros. Por ello, debemos añadir la restricción al conjunto factible $R_{SP} = 123$, lo que supone el llevar a cabo dicha política de ayudas

$$F \equiv \left\{ \begin{array}{l} p'_j R_j = \varepsilon_j R_{SP} \quad j = 2, 3, 4 \\ EM_j = \omega_j \cdot X_{2j} \quad j = 1, \dots, 18 \\ R_{SP} = 123 \\ \text{Resto de ecuaciones del MEGA} \end{array} \right.$$

Antes de plantear la programación multiobjetivo, hemos realizado la resolución de cada uno de los programas de optimización uniobjetivo por separado, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6. Resultados Programas Uniobjetivo.

OBJETIVOS			Inversión en energía	
	Δ Emisión (Ktep)s	Δ Superavit Público (M €)	No renovables ε_2	Renovables $\varepsilon_3 + \varepsilon_4$
Max. Superavit	25,07	-72,27	100%	0%
Min. Emisiones	-3,38	-89,40	0%	100%

Fuente: Elaboración propia

Si observamos la tabla anterior, podemos señalar que ambos objetivos son contrapuestos puesto que la maximización del superávit público (equivalente a un incremento mínimo del déficit de 72 M.€) nos lleva al nivel más alto de emisiones posible, un incremento de emisiones de 25,07 Ktep respecto a la situación inicial. Mientras que la minimización de emisiones, obteniéndose una reducción del 3,38 Ktep conlleva un máximo incremento del déficit público en 89 M.€ tras la inversión en política energética.

Además podemos ver que la solución del programa de optimización exclusivamente en términos económicos (P_1) coincide con $\varepsilon_2 = 1$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$. Esto implica que para obtener el máximo superávit (menor incremento del déficit público), la totalidad de ayudas públicas deben dirigirse al sector de energías no renovables. Sin embargo, al resolver el programa de optimización medioambiental nos damos cuenta, como es lógico, que para obtener el mínimo nivel de emisiones todos los recursos procedentes de la Comunidad de Madrid han de ser recibidos por sectores de energías renovables ($\varepsilon_2 = 0$, $\varepsilon_3 + \varepsilon_4 = 1$) al ser estas menos contaminantes.

Una vez analizado cada uno de los objetivos por separado, a continuación detallamos el programa multiobjetivo desarrollado.

4.3.1 Curva eficiente económico-medioambiental

Tal y como acabamos de comprobar, la optimización de los objetivos de forma simultánea no es posible ya que el punto ideal no es factible. Esto es, no es posible una distribución de recursos entre las ramas energéticas que permita alcanzar un mínimo incremento del déficit público a la vez que conseguir el valor mínimo de emisiones de gases de efecto invernadero.

En este primer trabajo calculamos el conjunto total de políticas eficientes, es decir, el conjunto de distribuciones entre los tres sectores de energía del total de ayudas procedentes del sector público madrileño a través de su Política Energética, del tal forma que dichos repartos sean óptimos en el sentido Paretiano.

A continuación detallamos el programa biobjetivo económico-medioambiental propuesto: la maximización del superávit público (equivalente a la minimización del déficit público) y la minimización de emisiones de gases contaminantes.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{j=1}^{18} E_j(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ \text{Max } DP(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ \text{s.a. } p'_j R_j = \varepsilon_j R_{SP} \quad j = 2, 3, 4 \\ EM_j = \omega_j \cdot X_{2j} \quad j = 1, \dots, 18 \\ R_{SP} = 123 \\ \text{Resto de ecuaciones del MEGA} \end{array} \right\} (P)$$

Tenemos que señalar que utilizando el método de las ponderaciones descrito en el apartado anterior, podemos obtener la curva eficiente en su totalidad ya que el programa (P) es convexo, dado que tanto las funciones objetivo como el conjunto factible son convexos, al ser todas las ecuaciones del MEGA funciones convexas.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min } \alpha \sum_{j=1}^{18} E_j(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) - (1 - \alpha) DP(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ \text{s.a. } p'_j R_j = \varepsilon_j R_{SP} \quad j = 2, 3, 4 \\ EM_j = \omega_j \cdot X_{2j} \quad j = 1, \dots, 18 \\ R_{SP} = 123 \\ \text{Resto de ecuaciones del MEGA} \end{array} \right\} (P_\alpha)$$

Una vez resuelto los programas (P_α) recogemos en la tabla siguiente algunos de los resultados.

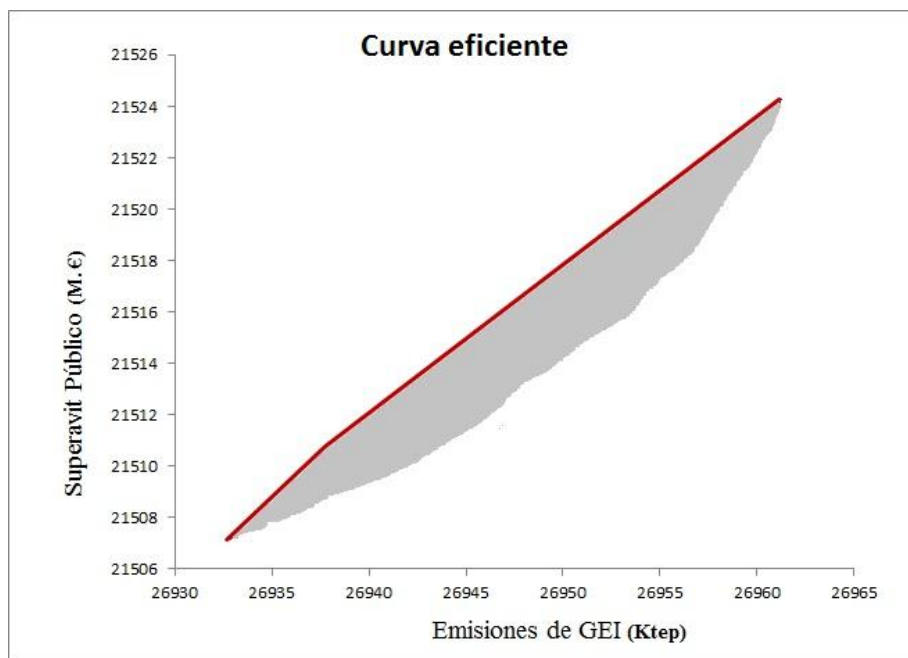
Podemos darnos cuenta que el valor de α es el peso que el decisor le da al objetivo medioambiental. En consecuencia, según vamos disminuyendo este valor, mayor es el porcentaje de las ayudas a las energías no renovables y menor a las renovables, perdiéndose optimalidad en el objetivo medioambiental para ganarla en el objetivo del superávit público.

Tabla 7. Resumen de resultados de los programas ponderados.

α	OBJETIVOS		Inversión en energía	
	Δ Emisiones (ktep)	Δ superavit Público (M €)	No renovables ε_2	Renovables $\varepsilon_3 + \varepsilon_4$
1	-3,382	-89,40		100%
0,9	-0,536	-87,36		100%
0,8	2,310	-85,42	2,7%	97,3%
0,7	5,155	-83,77	14,9%	85,1%
0,6	8,001	-82,13	27,0%	73,0%
0,5	10,846	-80,49	39,2%	60,8%
0,4	13,692	-78,84	51,4%	48,6%
0,3	16,538	-77,20	63,5%	36,5%
0,2	19,383	-75,56	75,7%	24,3%
0,1	22,229	-73,92	87,8%	12,2%
0	25,075	-72,27	100,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico se representa la totalidad de la curva eficiente convexa, representada como combinación de los dos objetivos:

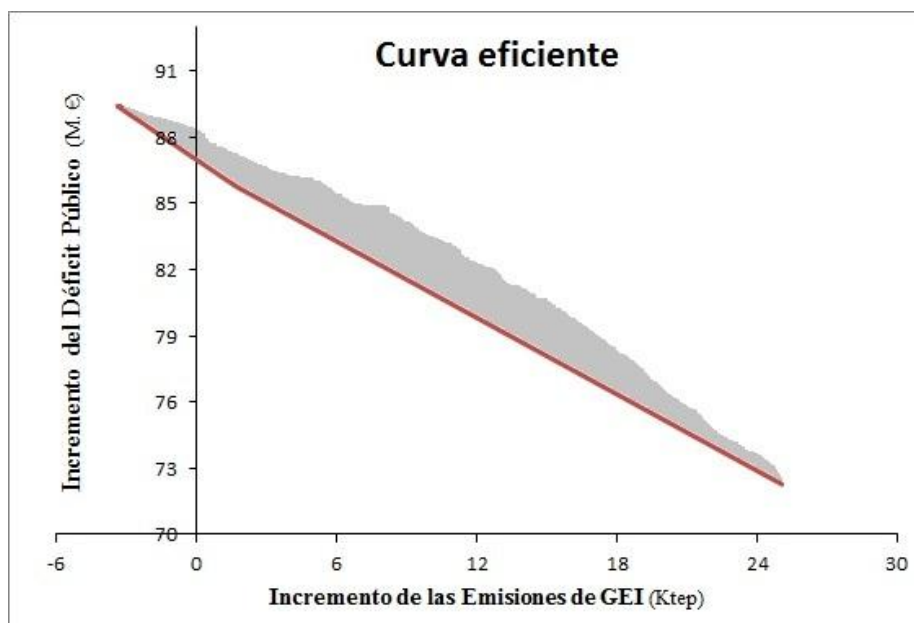
Gráfico 5. Curva eficiente económico-medioambiental⁹

Fuente: Elaboración propia

⁹ La obtención de la curva eficiente se ha obtenido con la resolución de los programas escalanzados mediante la programación con el software GAMS, tomando incremento de α de 0,01

En el último gráfico representamos la curva eficiente en términos de incrementos del déficit público y de emisiones de gases contaminantes con relación al equilibrio inicial (anterior a la inyección de las ayudas energéticas)

Gráfico 6. Curva eficiente económico-medioambiental (en términos de incrementos)



Fuente: Elaboración propia

5 Conclusiones

Las decisiones en política económica conllevan en ocasiones enfrentarse a objetivos contrapuestos. En el caso de los objetivos medioambientales, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero supone realizar un esfuerzo económico de inversión en energías más limpias.

Al enfrentarse a objetivos contrapuestos, la programación multiobjetivo nos proporciona una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones. El trabajo que hemos realizado, que presentamos en su versión preliminar, nos proporciona resultados que nos permiten cuantificar el esfuerzo económico necesario en función de lo ambiciosos que sean los objetivos medioambientales.

Nuestro propósito como mejora de este primer trabajo es la aplicación de nuevas herramientas, como son la programación por metas y la programación por compromiso, que nos permitan presentar al decisor un conjunto de “soluciones

óptimas” menor que la totalidad de la curva eficiente paretiana, es decir, proponer al decisor un número más reducido de posibles repartos de las ayudas energéticas. Aunque debemos tener en cuenta que este tipo de herramientas no nos llevará a la propuesta de una única *distribución óptima*, quedando por tanto la última decisión del reparto en manos del decisor.

BIBLIOGRAFÍA

André, F.J.; Cardenete, M.A.; Romero, C. (2010): “Designing Public Policies”, *Springer Verlag*.

André, F.J.; Cardenete, M.A.; Romero, C. (2009): “A goal programming approach for a Joint design of macroeconomic and environmental policies: a methodological proposal and an application to the spanish economy”, *Environmental Management*, 43, pp. 888-898.

Arregui Portillo, G. y Gómez Prieto, J. (2009): *Energías renovables y empleo en la Comunidad de Madrid: Situación actual*, Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud de Comisiones Obreras (ISTAS-CCOO).

Cámara, A.; Flores, M.; Fuentes, P. (2011): “Análisis económico y medioambiental del sector eléctrico en España”, *Estudios de Economía Aplicada*, 29-2, pp. 493-514.

Cámara, A.; Medina, A. y Monrobel, J. R. (2010): *Evolución de la estructura económica de la Comunidad de Madrid en el quinquenio 2000-2005*, XXXVI Reunión de Estudios Regionales, Badajoz.

Cardenete, M. A.; González, J. M.; Pablo-Romero, M. P.; Román, R. (2010): “Impacto de un incremento de la capacidad de generación de energía a partir de biomasa en plantas de co-generación en Andalucía”, *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 10, 2, pp. 159-182.

Cardenete, M. A. y Sancho, F. (2006): “Elaboración de una matriz de contabilidad social a través del método de entropía cruzada: España 1995”, *Estadística Española*, 48 (161), pp. 67-100.

Comunidad de Madrid (2004): *Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012*, Consejería de Economía.

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2009): *Balance Energético de la Comunidad de Madrid 2008*.

IECM (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid): *Marco Input-Output de la Comunidad de Madrid 2005*.

IECM (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid): *Contabilidad Regional de la Comunidad de Madrid 2005*.

Kehoe, T. J.; Manresa, A.; Polo, C; Sancho, F. (1988): “Una Matriz de Contabilidad Social de la economía española”, *Estadística Española*, 30 (117), pp. 5-33.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2010): *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera*.

Monrobel, J.R. (2010): *Elaboración de un modelo de equilibrio general aplicado a la Comunidad de Madrid. Estimación del impacto de los Fondos Europeos 2007-2013 en la economía de la región*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.

Robinson, S.; Cattaneo, A. Y El-Said, M. (2001): “Updating and Estimating a Social Accounting Matrix Using Cross Entropy Method”, *Economic Systems Research*, vol. 13, 1, pp. 47-64.