



**DECISIÓN MULTICRITERIO:  
LA AVENTURA CONTINÚA.  
NUEVOS RETOS, NUEVAS  
SOLUCIONES**

AMPARO MARÍA MÁRMOL CONDE  
AMELIA BILBAO TEROL  
ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN  
(COORDINADORES)

DECISIÓN MULTICRITERIO:  
LA AVENTURA CONTINÚA.  
NUEVOS RETOS,  
NUEVAS SOLUCIONES

AMPARO MARÍA MÁRMOL CONDE  
AMELIA BILBAO TEROL  
ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN  
(COORDINADORES)

DECISIÓN MULTICRITERIO:  
LA AVENTURA CONTINÚA.  
NUEVOS RETOS,  
NUEVAS SOLUCIONES



SEVILLA 2026

Colección Ciencia al Alcance

Núm.: 13

Comité editorial de  
la Editorial Universidad de Sevilla:

Elena Leal Abad  
(Directora)

Concepción Barrero Rodríguez

Rafael Fernández Chacón

María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado

Manuel Padilla Cruz

Marta Palenque

María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda

Marina Ramos Serrano

José-Leonardo Ruiz Sánchez

Antonio Tejedor Cabrera

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i RED2022-134540-T financiada por MICIU/  
AEI/10.13039/501100011033/.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Editorial Universidad de Sevilla 2026

c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.

Tlfnos.: 954 487 447; 954 487 451

Correo electrónico: eus4@us.es

Web: <https://editorial.us.es>

© Amparo María Mármol Conde, Amelia Bilbao Terol y  
Antonio Jiménez Martín, (coords.) 2026

© De los textos, los autores 2026

ISBN: 978-84-472-3176-8

DOI: <https://dx.doi.org/10.12795/9788447231768>

Diseño de cubierta y maquetación digital: Javier Rodríguez-Piñero Rengel

# Índice

## Prólogo

Begoña Vitoriano, Francisco Ruiz, Rafael Caballero. .... 14

## Introducción

Amparo María Mármol Conde, Amelia Bilbao Terol  
y Antonio Jiménez Martín ..... 17

## Equilibrando coste, preferencias y sostenibilidad en la planificación de menús saludables

Francisco Martos Barrachina, Laura Delgado Antequera  
y Mónica Hernández Huelin ..... 21

## Evaluación de programas de intervención basados en la actividad física y el deporte para la prevención del consumo de drogas: una perspectiva multicriterio

Marcos Asensio Hernández, Antonio Jiménez Martín,  
Pedro J. Jiménez Martín y Alberto Dorado Suárez ..... 47

## Diseño de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos que atiende a criterios sociales y a los principios de la economía circular

Carmen Galé Pola, Aitor Hernández González  
y Miguel Navarro Escobar ..... 67

<p>La decisión multicriterio al servicio del desarrollo sostenible          Gabriela M. Fernández Barberis, María Del Carmen          Escribano Ródenas y María Del Carmen García Centeno . . . . .</p>	87
<p>Emisiones contaminantes: decisiones estratégicas más allá          del beneficio económico          M<sup>a</sup> Ángeles Carballo Pou, Asunción Zapata Reina,          Luisa Monroy Berjillos y Amparo M<sup>a</sup> Mármol Conde . . . . .</p>	107
<p>La integración de factores económicos, sociales y          ambientales en la toma de decisiones en el mundo empresarial          Francisco Salas Molina, David Pla Santamaría          y Marisa Vercher Ferrándiz. . . . .</p>	125
<p>La reasignación de derechos de agua como          un problema multicriterio          María Del Mar Borrego Marín, Amparo Mármol Conde,          Victoriana Rubiales Caballero          y Miguel Ángel Hinojosa Ramos . . . . .</p>	141
<p>Mejorando la gestión forestal con técnicas multicriterio          Marta Ezquerro García, Marta Pardos Mínguez y          Luis Díaz Balteiro . . . . .</p>	159
<p>Ayuda a la decisión en la gestión de incendios forestales          Bibiana Granda Chico, Javier León Caballero,          M<sup>a</sup> Teresa Ortuño Sánchez, Adán Rodríguez Martínez,          Gregorio Tirado Domínguez y Begoña Vitoriano Villanueva . .</p>	177
<p>Utilización de técnicas multicriterio en red para la priorización          y valoración económica de servicios ecosistémicos          David Jorge García, Vicent Estruch Guitart,          Pablo Aragonés Beltrán y Juan Pascual Pastor Ferrando. . . . .</p>	197
<p>Modelos multicriterio para inversores socialmente responsables          Amelia Bilbao Terol, Mar Arenas Parra,          Verónica Cañal Fernández, Raquel Quiroga García          y Nieves Remo Díez. . . . .</p>	215

Metodologías multicriterio para la construcción de indicadores compuestos en economía Ana García Bernabeu, Adolfo Hilario Caballero y Javier Reig Mullor .....	237
Agregación ordinal de valoraciones cualitativas en la toma de decisiones multicriterio José Luis García Lapresta y David Pérez Román .....	253
Indicadores sintéticos basados en técnicas multicriterio: síntesis de las principales aplicaciones Francisco Javier Blancas Peral, Macarena Lozano-Oyola y Ignacio Contreras Rubio .....	273
Selección multicriterio de transporte público en Zaragoza con AHP. Identificación de grupos para un número elevado de actores Juan Aguarón Jóven, Alfredo Altuzarra Casas, María Teresa Escobar Urmeneta, José María Moreno Jiménez, Victoria Muerza Marín, Jorge Navarro López y Alberto Turón Lanuza .....	299
Una aproximación multicriterio para la apertura/cierre del tráfico aéreo español en la prevención de la expansión de pandemias Antonio Jiménez Martín, Gabriel A. Peña Delfín, Alfonso Mateos Caballero, Josefa Z. Hernández Diego y Carlos J. Pérez Sánchez .....	321
Reparto de costes en redes de capacidad. Un enfoque multicriterio Andrés Caro Chaparro y Miguel Ángel Hinojosa Ramos .....	339



## Prólogo

¿Decidir? ¿Quién no tiene que decidir varias veces al día? ¿Y quién no ha tenido que tomar decisiones que determinan el rumbo de su vida futura? En el ámbito empresarial y profesional, son múltiples las decisiones que se toman a diario, desde las decisiones operativas del día a día a las estratégicas que afectan al largo plazo; decisiones automatizadas o decisiones personalizadas. Sin embargo, aun siendo la capacidad de decidir una de las prerrogativas del ser humano, lo cierto es que no nos resulta nada fácil. Aparcar el instinto y concentrarnos en el estudio de una decisión es frecuentemente una fuente de estrés, ampliamente estudiada por la psicología. En cualquier caso, poseer la capacidad de decidir debe ser siempre preferible a no tenerla. Como decía Napoleón Bonaparte: «nada es más difícil, y por tanto más precioso, que poder decidir». Consecuentemente, cómo tomamos decisiones, cómo tomarlas para lograr el mejor resultado o cómo implementar esos procedimientos de toma de decisiones en sistemas automáticos es el objeto de múltiples estudios, cuyo fin último es mejorar el análisis y, con ello, obtener mejores resultados derivados de las decisiones tomadas.

¿Pueden las matemáticas ayudarnos a decidir? Aunque Platón dijo que «una buena decisión se basa en el conocimiento y no en los números», lo cierto es que la creciente complejidad de los entornos en los que se toman determinadas decisiones parece aconsejar el uso de herramientas de apoyo. Lord Kelvin acudió en ayuda de los números cuando estableció que «si puedes medir aquello de lo que estás hablando y expresarlo en números, entonces ya conoces algo al respecto». De modo que, quizás, las matemáticas y el conocimiento (y, por tanto, las decisiones) pueden ir de la mano.

La teoría de la decisión se puede decir que se remonta al siglo XVII con el estudio de Pascal sobre las decisiones frente a la incertidumbre y, en especial, en el siglo XVIII, cuando Daniel Bernoulli publica su Teoría sobre la medida del riesgo, donde se define por primera vez la función de utilidad y calcula la utilidad esperada. La discusión sobre esta metodología aplicada en la economía fue la base de la Teoría de juegos, que desarrollan John Von Neumann y Oskar Morgenstern en 1944 (*Game Theory and Economic Behaviour*), donde nace el concepto de maximización de la utilidad esperada y se desarrollan los de elección racional y preferencias individuales. Un poco más tarde, Howard Raiffa y Ralph Keeney sentaban las bases de la teoría de la decisión basada en modelos de valor. A la vez, se desarrollaba la teoría de la decisión para elecciones sociales, donde cabe destacar a Nicolas de Condorcet y su conocida paradoja o a Kenneth Arrow con su teorema de la imposibilidad.

El singular atractivo de dar un sentido racional a la toma de decisiones lleva a intentar reflejar las preferencias de los decisores, valorando las alternativas desde distintos puntos de vista. Así surge el ámbito de estudio y aplicación de la decisión con múltiples criterios o decisión multicriterio.

En España, aunque hubo grandes personalidades que dedicaron parte de su investigación a la teoría de la decisión como Sixto Ríos García o F. Javier Girón González-Torre, no es hasta el año 1997 cuando se crea el Grupo Español de Decisión Multicriterio. Para ese momento, investigadores de distintas partes de la geografía española ya se dedicaban a este campo, destacando Carlos Romero en Córdoba y luego en Madrid, María Victoria Rodríguez Uría en Gijón, Sixto Ríos Insua en Madrid, Francisco Ramón Fernández en Sevilla o Rafael Caballero en Málaga, entre otros. La Sociedad de Estadística e Investigación Operativa (SEIO) contaba con un Grupo de Trabajo en Decisión Multicriterio en el que se encontraban ese grupo de investigadores y que crecía rápidamente, llegando también a otras personas cuyos enfoques se iban orientando a otras disciplinas como la economía o la ingeniería, lo que llevó a la creación del citado Grupo Español en Decisión Multicriterio. Con el tiempo, el Grupo de Trabajo de la SEIO se mantiene como núcleo fundamental del Grupo Español de Decisión Multicriterio, pero este agrupa a otros muchos miembros de otras disciplinas.

La expansión y cohesión entre grupos lograda en el Grupo Español de Decisión Multicriterio no habría sido posible sin el liderazgo de las personas anteriormente mencionadas, a las que estamos enormemente agradecidos los miembros actuales. Gracias, Carlos,

María Victoria, Sixto, Paco Ramón y Rafa; no estaríamos escribiendo este prólogo sin vuestro trabajo, que nos habéis transmitido, y sin vuestra inspiración, contando ahora en activo solo con Rafa, coautor de este prólogo.

Pero tampoco habríamos llegado al nivel actual sin el apoyo de tres Redes Temáticas en Decisión Multicriterio, proyectos financiados por el Gobierno de España, que facilitaron nuestra actividad: las Redes de 2003 y 2005 (coordinadas desde la Universidad de Málaga), y la de 2006 (coordinada desde la Universidad de Sevilla). Estas Redes facilitaron la participación en actividades conjuntas de investigadores de toda España, dando cohesión al grupo y un gran crecimiento de la disciplina y del número de personas dedicadas a la decisión multicriterio.

Este crecimiento está patente también en el panorama internacional, siendo actualmente España el quinto país en número del directorio de la Sociedad Internacional de MCDM (solo detrás de India, Estados Unidos, Turquía y Brasil, países con una población muchísimo mayor que la española). Además, esta Sociedad ha premiado por dos veces a investigadores españoles con su prestigioso premio Georg Cantor: Carlos Romero en 2006 y Francisco Ruiz en 2024. ¡Enhorabuena a ambos! Aunque uno de ellos esté escribiendo este prólogo.

En la actualidad, el Grupo Español de Decisión Multicriterio (GEDM) lo forman alrededor de 250 investigadores pertenecientes a muy diversas áreas de conocimiento (Estadística e Investigación Operativa, Economía Aplicada, Métodos Cuantitativos para la Economía y Empresa, Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Ingeniería de Proyectos, Organización de Empresas, Economía Agraria, etc.) procedentes de 32 de universidades españolas (más la Universidade Regional de Blumenau) y centros de investigación. Se estructura en 30 nodos que se han formado atendiendo a criterios tanto de cercanía geográfica como de coincidencia en las líneas específicas de investigación.

El Grupo Español de Decisión Multicriterio tiene como objetivo principal la promoción de la decisión multicriterio, con dos funciones fundamentales. Por un lado, coordinar las tareas de los diferentes nodos y propiciar relaciones de colaboración entre ellos. Por otro lado, dar a conocer nuestra actividad investigadora y la decisión multicriterio en general, tanto a potenciales usuarios de las metodologías multicriterio, como a posibles nuevos miembros del grupo.

Y en ese trabajo de promoción, el Grupo Español de Decisión Multicriterio, después de años de sequía financiera, desde 2023 vuelve

a contar con una Red Temática que impulse el trabajo del grupo, coordinada en este caso por Begoña Vitoriano desde la Universidad Complutense de Madrid. Fruto de este impulso son, por ejemplo, la EURO PhD School on Multiple Criteria Decision Making: Methodologies and Applications to the Sustainable Development Goals, que tuvo lugar en noviembre de 2024 en la Universidad de Málaga con enorme éxito, o la Iberian Conference on MCDM/A (IMCDM/A), celebrada en la Universidade de Coimbra el 8 y 9 de mayo de 2025, primer congreso conjunto de España y Portugal en nuestro tema.

Fruto de las primeras Redes Temáticas fue el libro publicado por el Grupo Español de Decisión Multicriterio en el año 2005, *La aventura de decidir: una aproximación científica mediante casos reales*. En él se mostraban distintas aplicaciones de la decisión multicriterio desarrolladas por sus miembros con notable éxito.

Una aventura que ha seguido creciendo y que, 20 años después y fruto de esta otra Red Temática, da lugar a este nuevo libro, *Decisión multicriterio: la aventura continúa. Nuevos retos, nuevas soluciones*, en el que han participado 17 grupos de toda la geografía española, a los que no podemos sino agradecerles su colaboración. Por supuesto, nuestro mayor reconocimiento y agradecimiento es para los editores Amparo Mármol, Amelia Bilbao y Antonio Jiménez, por su implicación y su trabajo. Este libro recoge un compendio bastante completo de la investigación que actualmente se realiza en España en el campo de la decisión multicriterio y de sus aplicaciones a problemas de muy diverso ámbito. Con él, el Grupo Español de Decisión Multicriterio quiere invitar a sus lectores a conocer el enorme potencial de esta disciplina.

En un momento como el actual, en el que existen muchos medios para recabar información, en el que más se incide en la necesidad de tomar decisiones informadas, es básico proveer de metodologías que puedan aprovechar esa información para tomar las decisiones. Tener ingentes volúmenes de datos, si no se saben tratar e incorporar en el proceso de decisión, solo llevará a malas decisiones basadas en datos. La decisión multicriterio es fundamental, ahora más que nunca, para asesorar y diseñar sistemas que recojan fielmente las preferencias y eviten sesgos y decisiones poco apropiadas para los fines que se persiguen. En este libro, se presenta el uso de las metodologías de decisión multicriterio en contextos muy diferentes como base para el presente y el futuro de los sistemas diseñados para la toma de decisiones.

28 de febrero de 2025

Begoña Vitoriano, Francisco Ruiz, Rafael Caballero.

## Introducción

**D**ecisión multicriterio: la aventura continúa. Nuevos retos, nuevas soluciones es una obra colectiva desarrollada por investigadores de la Red Temática en Decisiones Multicriterio, financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación en la convocatoria de 2022.

El libro tiene como objetivo mostrar el potencial de las técnicas de decisión multicriterio a un público general no especializado, presentando diversas aplicaciones en la resolución de problemas complejos del mundo real. Los problemas analizados son de gran interés para la sociedad y abarcan diversos ámbitos. El contenido se estructura en cinco bloques correspondientes a salud, desarrollo sostenible, recursos naturales, economía y sociedad, y transporte.

El primer bloque, correspondiente a los capítulos 1 y 2, se centra en el campo de la salud. En primer lugar, se analiza la planificación de menús semanales saludables, abordando no solo cuestiones de salud, coste y preferencia, sino también su integración con políticas orientadas a fomentar hábitos de alimentación saludables desde edades tempranas y garantizar el acceso a opciones de alimentos nutritivos a precios asequibles. En el segundo capítulo, se propone una perspectiva multicriterio para la evaluación de programas de intervención basados en la actividad física y el deporte para la prevención del consumo de drogas. Esta evaluación incluye aspectos como los espacios deportivos que se van a utilizar, la experiencia y capacidad de las entidades solicitantes, y su propuesta técnica (personal, metodologías y difusión) y económica.

El bloque correspondiente a desarrollo sostenible abarca los capítulos del 3 al 6. En el primero de ellos se trata la gestión de residuos sólidos urbanos, en concreto, la localización de centros de

reciclaje y planificación del flujo de residuos desde las zonas donde se generan hasta los puntos donde, o bien se eliminan, o bien se reciclan. A continuación, se describe el uso de un modelo multicriterio para el análisis del grado de cumplimiento de las metas sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidas hace ya diez años, proporcionando una visión global de la situación de cada país en la actualidad. El siguiente capítulo trata el problema de la reducción de emisiones contaminantes, proponiéndose un modelo para la predicción de emisiones de la UE y EE. UU. a partir del objetivo de beneficio económico y del umbral de tolerancia de los ciudadanos. Finalmente, en el último capítulo se analiza la integración de factores económicos, sociales y ambientales en toma de decisiones en el mundo empresarial, utilizando como ejemplo ilustrativo el reciclaje de materiales textiles.

El bloque de recursos naturales, capítulos 7 al 10, comienza con un análisis sobre la asignación de derechos de agua en el caso particular de dos comunidades andaluzas de regantes centradas monocultivos (olivo y almendro), en dos escenarios: un año hidrológico normal y un año hidrológico seco, proponiéndose modelos de negociación para afrontar el problema. A continuación, se analiza el uso de técnicas multicriterio para la gestión forestal mediante un caso de estudio emblemático en la historia forestal de España: el monte Pinar de Valsaín, situado en la vertiente segoviana de la Sierra de Guadarrama. En el capítulo 9 se aborda el problema de los incendios forestales, describiéndose algunos problemas de decisión que pueden surgir en dos de sus fases de gestión: la fase de mitigación y prevención (acciones para evitar el inicio de un incendio), y la fase de respuesta (activación de protocolos tras la detección de un incendio). Finaliza el bloque analizando el uso de técnicas multicriterio en red en la priorización de servicios ecosistémicos, tomando como ejemplo el estudio realizado en el delta del Ebro.

En los ámbitos económico y social, capítulos 11 al 14, se presentan en primer lugar una aplicación sobre inversiones socialmente responsables, que integra consideraciones ambientales, sociales y de gobernanza corporativa para generar retornos financieros competitivos a largo plazo e impacto social positivo. A continuación, se aborda el diseño de indicadores compuestos para medir la calidad de vida en las regiones de España, así como para analizar fenómenos como la pobreza, el bienestar social, el desarrollo sostenible y la desigualdad de género. El capítulo 13 trata la modelización de escalas cualitativas no uniformes en *marketing* en el sector de la alimentación y bebidas mediante un cuestionario que analiza cuatro factores

relevantes de la compra del producto: intención de compra, atractivo del producto, singularidad y valor del precio percibido. Posteriormente, se analiza el papel que las técnicas de decisión multicriterio han jugado en la creación de medidas sintéticas y las principales aplicaciones prácticas para las que dichas medidas se han definido, mediante un análisis bibliométrico.

Finalmente, el bloque de problemas relacionados con el transporte, capítulos 15 al 17, comienza analizando la selección de la alternativa de transporte urbano preferido para la ciudad de Zaragoza, tomando como referencia las opciones consideradas por los distintos partidos políticos en sus programas electorales en las elecciones municipales celebradas en 2015. A continuación, se presenta un problema relativo a la gestión de la propagación de pandemias a través del tráfico aéreo de pasajeros en el que se decide sobre la posible apertura o cierre de las conexiones internacionales de los aeropuertos de un país, teniendo en cuenta los impactos epidemiológicos, económicos y político-sociales asociados. Para concluir, se aborda el problema del reparto de costes en una red de capacidad desde el punto de vista multicriterio, analizando reglas de reparto que surgen de los conceptos de solución de la teoría de juegos y se relacionan con algunas reglas de reparto clásicas.

El libro está redactado con un enfoque divulgativo, evitando expresiones matemáticas complejas, para que sea accesible a un público amplio interesado en estas temáticas.

Amparo María Mármol Conde, Amelia Bilbao Terol  
y Antonio Jiménez Martín



**Decisión multicriterio:  
la aventura continúa.  
Nuevos retos,  
nuevas soluciones**





# Equilibrando coste, preferencias y sostenibilidad en la planificación de menús saludables

FRANCISCO MARTOS BARRACHINA  
*Universidad de Málaga*

LAURA DELGADO ANTEQUERA  
*Universidad de Málaga*

MÓNICA HERNÁNDEZ HUELIN  
*Universidad de Málaga*

## INTRODUCCIÓN

De entre los problemas que forman parte de la vida cotidiana, pocos encajan tan bien en la definición de problema de decisión multicriterio como lo hace la elaboración de un menú semanal. Sí, un menú semanal de comidas, para casa. O para un hospital, un comedor escolar o una prisión, aunque por ahora pensemos en la casa. Este menú debe, en todo caso, tener en cuenta diversas consideraciones individuales y/o familiares. Por ponerlo en algún orden, podemos empezar por la nutrición. Y es que este menú debe ser nutritivo, porque queremos estar razonablemente sanos. Pero además debe gustarnos lo suficiente y no ser demasiado caro. Y debe respetar las consideraciones culturales del hogar, en cuanto a qué alimento puede tomarse o no y en qué momento del día o del año pueden tomarse. En la actualidad, a esto hay que sumarle, cada vez con más frecuencia, la consideración del impacto ambiental.

Es difícil definir formalmente en qué consiste una dieta equilibrada, pero puede entenderse como aquella que nos aporta cantidades adecuadas de nutrientes y energía, así como salud y, en definitiva, bienestar y calidad de vida. En cualquier caso, será la interacción de múltiples factores como la renta, el nivel de precios, los gustos y las creencias, las tradiciones culturales, y otros (geográficos, ambientales, sociales y económicos), lo que determine cómo diseñar ese «menú semanal» para un individuo, una familia o una población.

Es obvio, además, que nuestra dieta, ese menú semanal, tiene un papel muy importante en nuestras vidas. Tanto, que los hábitos de alimentación son uno de los principales factores de riesgo de muerte prematura e invalidez en el mundo. Sin embargo, no lo es tanto el diseño de políticas públicas que corrijan eficazmente el problema del mal diseño de los hábitos alimenticios (Murray *et al.*, 2024). Además, el papel de ese menú semanal (y de las decisiones que tomamos en torno a este) ha ido cobrando mayor importancia, como muestran numerosos estudios que indican que lo que comemos importa y que tiene grandes repercusiones sobre el medio ambiente y las economías a nivel local y global (Ritchie *et al.*, 2022).

El uso de técnicas matemáticas para diseñar ese menú que nos permita cubrir nuestras necesidades nutricionales y, además, con los menores costes posibles, se remonta a los años 40 del siglo XX. El pionero problema de la dieta desarrollado por George J. Stigler, en 1945, se enfrenta al desafío de la malnutrición y la subsistencia en la América del conflicto armado más importante de la historia y de los años de posguerra.

Si avanzamos hasta las primeras décadas del siglo XXI, los desafíos científicos relacionados con la alimentación son muy distintos. Es por lo que los planteamientos de lo que aparentemente es el mismo problema se presentan en una versión muy diferente. Por un lado, se ha producido desde los años 80 una homogeneización paulatina de la alimentación en las distintas economías desarrolladas, apareciendo una suerte de «dieta occidental» que ha ido ocupando parte del espacio de las dietas regionales tradicionales. Lamentablemente, esta nueva dieta conlleva un consumo excesivo de alimentos procesados y de la era industrial, que incluyen productos lácteos, cereales, azúcares y aceites vegetales refinados, carnes grasas, sal, y una combinación de estos alimentos. Así, este cambio en la alimentación ha provocado un aumento sin precedentes en la prevalencia de obesidad y de enfermedades no contagiosas (NCDs, por sus siglas en inglés) como enfermedades cardiovasculares, diabetes e hipertensión.

Las políticas públicas no han sido capaces de poner freno a esta tendencia. En los países más desarrollados del mundo, a pesar de la amplia disponibilidad de guías de alimentación y de salud y del alto grado de educación de sus ciudadanos acerca de la alimentación, los casos de obesidad y malnutrición siguen aumentando. Todo esto lleva a que ese menú semanal y su diseño tengan que responder también a una pregunta clave en todo este proceso: ¿por qué no nos alimentamos mejor y adoptamos hábitos más saludables?

Desde un punto de vista más técnico, el diseño de dietas humanas resulta un proceso complejo por la gran cantidad de factores a tener en cuenta. Que la dieta sea saludable (nutricionalmente adecuada y con buenos resultados en su impacto en nuestra salud) y asequible (que podamos pagarla) es solo el primer paso. La salubridad de una dieta es quizá el tema que históricamente más ha tratado la bibliografía científica. Tradicionalmente, la creación de dietas se ha centrado en cumplir con los requerimientos nutricionales y en adaptarse a las restricciones alimentarias impuestas por diversas patologías. A lo largo del tiempo, se han desarrollado numerosos modelos que pueden clasificarse en cuatro grandes categorías, según su enfoque principal: aquellos que buscan minimizar el coste de la dieta, los que priorizan la reducción del impacto ambiental, los que optimizan la palatabilidad y, finalmente, algunos modelos más ambiciosos que combinan varios de estos objetivos.

En este contexto, los modelos de diseño de dietas no solo deben abordar cuestiones de salud, coste y preferencia, sino también integrarse con políticas orientadas a fomentar hábitos de alimentación saludables desde edades tempranas y garantizar el acceso a opciones de alimentos nutritivos a precios más asequibles. A esto debemos añadir el cómo pueden encajar en un mundo más sostenible. Desde hace décadas, ha ido ganando fuerza la idea de que lo que comemos tiene un impacto directo en el planeta y cada vez es más evidente que necesitamos cambiar nuestros hábitos para cuidar el entorno. La necesidad de transitar hacia pautas de consumo y sistemas alimentarios más sostenibles cobró importancia en los años 80 y parece cada vez más evidente, pero lograrlo representa un desafío mayúsculo. Actualmente, la Agenda 2030<sup>1</sup> establece distintas pautas, organizadas en 17 objetivos, que deben contribuir a la hora de definir políticas que garanticen un futuro sostenible para todos. Cada uno de estos objetivos se interrelacionan entre sí e incorporan

---

1. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia. Con su lema para «no dejar a nadie atrás» resaltan la importancia de cumplir con cada uno de estos objetivos para 2030.

En general, la «sostenibilidad» se ha buscado y analizado en distintos ámbitos, donde se acepta que este concepto es, en sí, un término multidimensional que se apoya en tres pilares: uno económico, uno social y otro medioambiental. Concretamente, entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se especifican algunas metas que promueven el avance hacia sistemas alimentarios sostenibles. Así, aunque aún no se ha consensuado una definición de «dieta sostenible», la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura proporciona una definición (FAO, 2010):

Aquellas con bajos impactos ambientales que contribuyen a la seguridad nutricional y alimentaria, y a una vida saludable para generaciones presentes y futuras. Protegen y respetan la biodiversidad y los ecosistemas, son culturalmente aceptables, accesibles, y económicamente justas y asequibles. En definitiva, son nutricionalmente adecuadas y saludables, optimizando al mismo tiempo los recursos naturales y humanos.

De esta forma, algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos abordan esta problemática. Concretamente, el ODS 2 hace un llamamiento para poner fin al hambre y a todas las formas de *malnutrición* e incorpora algunas metas que tratan específicamente «la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos, el mantenimiento de los ecosistemas, la adaptación al cambio climático, la mejora de la calidad de los suelos o la conservación de la biodiversidad». También otros ODS plantean desafíos relacionados como la reducción del *desperdicio* alimentario (ODS 12), hacer sostenible la explotación pesquera (ODS 14 y 6), *preservar los ecosistemas* terrestres y luchar contra la desertificación (ODS 15), entre otros. La sostenibilidad de nuestra alimentación tiene también ramificaciones que tratan cuestiones tan diversas como la adecuada gestión del agua, el espacio y la energía, la situación sanitaria, la igualdad de género o el empleo decente. Por tanto, la manera en que se enfoquen todos estos objetivos repercutirá en las posibilidades de acabar con el hambre y con todas las formas de malnutrición.

Durante un tiempo, la preocupación por la lucha contra la pobreza (ODS 1) cambió el foco de interés que, durante muchos años,

había estado más concentrado en el estudio de dietas sostenibles y cultivos ecológicos. En el contexto actual se produce un retorno a la idea de que la sostenibilidad es un rasgo imprescindible en los sistemas de producción, distribución y consumo de alimentos. En el contexto europeo, es cada vez más frecuente el interés en promover políticas de actuación que nos lleven hacia una alimentación más sostenible, saludable, nutritiva y económica.

Por todo lo anterior, surge de manera natural considerar modelos con un enfoque multiobjetivo para el diseño de dietas sostenibles. En este sentido, se podría decir que todos estos planteamientos confluyen en el trabajo de Mertens *et al.* (2016), que presenta un nuevo concepto de dieta, definida sobre distintas dimensiones: sostenible ambientalmente, saludable, accesible para consumidores y que apoya también al sector agrícola, segura y estable en su oferta, y acorde con las preferencias alimentarias. A este tipo de dietas, por sus siglas en inglés, las denominamos dietas SHARP (*Sustainable, Healthy, Affordable, Reliable, Palatable*).

- (S) *Sostenible* implica el uso de recursos para que no se ponga en riesgo el bienestar de futuras generaciones.
- (H) *Saludable* en el sentido de que sean nutritivas y tengan un efecto positivo sobre nuestra salud.
- (A) *Asequible* se refiere a que sean asequibles para la población europea, de forma independiente del nivel de renta.
- (R) *Fiable* indica seguridad alimentaria y estabilidad en la cadena de suministros.
- (P) *Palatable* implica consistencia con las normas culturales y las preferencias de la población y/o individuo.

De esta forma, las dietas SHARP deberían generar opciones de un consumo sostenible, a la vez que nutricionalmente seguro y que pueda ser aplicado en cualquier ámbito o contexto. El interés científico por este tema y la vigencia que tiene es palpable. Un buen ejemplo es SUSFANS, un equipo europeo multidisciplinar de trabajo en el campo de la alimentación, cuya labor se centra en el asesoramiento sobre seguridad alimentaria y sostenibilidad, previsión y guía en la política europea de alimentación y el diseño de modelos y de métricas cuantitativas en el ámbito de las dietas. En sus años de trabajo, han diseñado un marco conceptual para el desarrollo de métricas de sostenibilidad de alimentación, una herramienta de visualización de datos cuantitativos en cambios de dietas, así como propuestas en términos de innovación en sistemas de producción y política, y han publicado un marco para fomentar la operatividad de los aspectos de salud de las dietas sostenibles.

De esta forma, se aprecia la sostenibilidad como una magnitud de enorme complejidad que, sumado a la fiabilidad (en términos de seguridad alimentaria y de la cadena de suministros), convierten un problema, *a priori*, global, en uno que debe resolverse teniendo en cuenta las características regionales y que, por tanto, tiene que ser capaz de adaptarse a estas.

En este trabajo se explica un modelo multiobjetivo utilizado para la planificación de dietas sostenibles, diseñado para la población española, integrando criterios clave como la nutrición, el coste, la sostenibilidad ambiental y la palatabilidad. Los aspectos nutricionales se incorporan en las restricciones del modelo, garantizando el cumplimiento de las recomendaciones internacionales para una dieta equilibrada. Además, hemos incluido la palatabilidad como un objetivo fundamental para asegurar que las dietas propuestas sean atractivas y fáciles de adoptar. Un componente esencial de nuestro enfoque ha sido la incorporación de aspectos clave de la dieta mediterránea, destacando su riqueza en alimentos frescos, de temporada, granos integrales, aceite de oliva y un alto consumo de frutas y verduras, adaptando estos principios a las particularidades culturales y socioeconómicas de España. Este modelo combina estas dimensiones mediante técnicas de optimización y técnicas metaheurísticas para ofrecer soluciones viables y sostenibles.

A continuación, se presentan las principales secciones de este trabajo. En la sección 2, se realiza un análisis de la literatura dedicada a la elaboración de menús sostenibles, destacando los enfoques más relevantes y su aplicabilidad en distintos contextos. La sección 3 se centra en el caso de España, estableciendo, además, las bases nutricionales de la dieta mediterránea que serán incorporadas en nuestra propuesta de modelización. Posteriormente, en la sección 4 se describe en detalle el modelo de dieta sostenible desarrollado, explicando su estructura, los criterios considerados y su resolución. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones, donde se resumen los principales hallazgos y se discuten las implicaciones de este trabajo.

## **1. DISTINTAS PROPUESTAS PARA PLANIFICAR MENÚS SOSTENIBLES**

Aunque la literatura no es muy amplia, sí existen algunos trabajos que formulan el problema del menú como un modelo de optimización multiobjetivo que aborda alguna o varias de las dimensiones de las dietas SHARP. Existe una tendencia muy generalizada, al

igual que en otros campos, en el estudio del diseño del menú guardando una consideración especial para la sostenibilidad, en particular desde una perspectiva ambiental. La literatura relacionada con el diseño de dietas SHARP estudia a menudo su versión continua, el problema de la dieta, en que las variables definidas son los alimentos (en crudo) y los resultados nos indican los gramos diarios o semanales a consumir de cada uno (Hernández *et al.*, 2021).

En esta línea, algunos trabajos aúnan el impacto ambiental y el económico de las dietas o incorporan de alguna forma la aceptabilidad de la dieta resultante. Esto se aplica, por ejemplo, en el trabajo de Macdiarmid *et al.* (2012), desde el Rowett Institute of Nutrition and Health (Reino Unido), en el que se define un modelo que muestra que la población británica puede seguir una dieta saludable que, sin ningún coste adicional, consigue reducir las emisiones de gases con efecto invernadero. Otros modelos que emplean datos de Nueva Zelanda, Dinamarca o Reino Unido se limitan a introducir cotas sobre factores ligados al impacto ambiental.

Por otro lado, Donati *et al.* (2016) consideran seis escenarios en función del objetivo perseguido en el modelo planteado. Estos se definen como: la minimización del coste total de la dieta, la minimización de las emisiones de dióxido de carbono, la minimización del consumo de agua, la minimización de la huella ecológica, la simultánea minimización de estos tres últimos objetivos y, por último, la minimización de todos a la vez. El problema se resuelve mediante la agregación de todos los objetivos, considerando que el económico tiene la misma importancia que la suma de los tres objetivos medioambientales.

Varios de estos trabajos buscan minimizar el número de cambios a realizar a partir de una dieta concreta, potenciando la aceptabilidad del resultado e introduciendo así otro de los objetivos clave de la modelización SHARP, la *palatabilidad*. En general, la *aceptabilidad* o palatabilidad de las dietas ha de contemplarse como un pilar sobre el que deben pivotar cualquier diseño de una dieta, ya que de nada sirve diseñar una dieta que al receptor (sea una población o un individuo) no le guste y que, por tanto, no vaya a seguir. En este sentido, con el fin de acercar este planteamiento a los patrones de consumo reales del ser humano, resulta conveniente trasladar los resultados desde el nivel de ingredientes hacia una propuesta de menú, con platos en lugar de ingredientes, y que pueda ser consumido en un horizonte temporal (Martos-Barrachina *et al.*, 2022). Además, se debe garantizar la capacidad de generar soluciones factibles adaptándose a distintos conjuntos de datos, en función de una variedad

de factores, como pueden ser la edad, el peso, las condiciones físicas, las creencias personales o una enfermedad como la diabetes.

Por ejemplo, encontramos distintos estudios que buscan dietas con determinados perfiles predefinidos según su grado de sostenibilidad o que desean establecer los motivos que llevan a una persona a decidir si seguir una dieta sana o sostenible o ninguna de éstas (Marty *et al.*, 2022; Duckworth *et al.*, 2022). Entre los modelos más usuales encontramos técnicas de programación lineal. Ya en los inicios del desarrollo del problema de la dieta, Dantzig (1963) y Stigler (1945) apreciaban la falta de palatabilidad en sus propios resultados, que pronto tuvieron su respuesta. Más tarde, Balintfy (1964) introdujo el problema de diseño de menús minimizando los costes, sujeto a una serie de restricciones nutricionales. Se considera pionero en introducir la palatabilidad en el problema de la dieta, pues los nuevos resultados se ofrecen como platos cocinados, en lugar de cantidades de ingredientes. El desarrollo de la computación permitió incluir otros aspectos como la textura, el color y otras propiedades estéticas que ayudaban a incrementar la palatabilidad de los menús, los cuales aprovechaban los avances en técnicas de programación lineal. Leung *et al.* (1992) define el problema de optimización de un menú para una familia hawaiana de 4 personas para una semana, utilizando 217 recetas locales para incrementar su aceptabilidad, y lo enmarca en un problema de programación entera minimizando el coste.

Finalmente, para la palatabilidad, también debemos tener en cuenta las costumbres culturales, por lo que se debe establecer una estructura diaria de ingestas. En el caso de la dieta mediterránea, se sigue un patrón con puntos en común en todos los países, incluido España. Este mismo formato es el que se considera para diseñar menús escolares o en centros para mayores. En el primer caso, Benvenuti *et al.* (2016) utiliza una base de 106 recetas propias de la cocina italiana, que se definen sobre 71 ingredientes dados por la ciudad de Roma. En esta ocasión, se presenta un modelo que minimiza la emisión de gases derivados del proceso, así como el agua consumida mientras se respetan todos los requerimientos nutricionales.

Por otro lado, el modelo presentado en Benvenuti *et al.* (2019) es más ambicioso y propone un menú de 2 semanas basado en 140 recetas, con el fin de minimizar costes y emisiones. De la misma forma, en Martos-Barrachina *et al.* (2024) se presenta un conjunto de menús eficientes, donde se persigue minimizar el coste y maximizar su similitud respecto a un menú de partida para un individuo. En general, la resolución de un problema de planificación de menú

suele considerarse como base para el diseño e implementación de la oferta de alimentos en instituciones sanitarias, prisiones, escuelas u hospitales. Y, como en muchos otros ámbitos, la mejora de la capacidad computacional ha impactado también en el abordaje y resolución de este problema, donde tradicionalmente solo se contemplaba el coste y dos conjuntos de restricciones para asegurar la palatabilidad y los requisitos nutricionales.

Como se mencionaba previamente, los avances en técnicas de computación han permitido trabajar en nuevos algoritmos para desarrollar aproximaciones sobre el diseño de los menús. Para ello se han introducido modelos de soporte de decisiones para profesionales con la evaluación de los menús en problemas que incorporan múltiples objetivos (Petot *et al.*, 1998; Marling *et al.*, 1999). También se ha extendido el uso de estrategias metaheurísticas definidas sobre una población, como es el caso de Syahputra *et al.* (2017) para diseñar el menú de pacientes diabéticos o Marrero *et al.* (2020), quienes compararon un algoritmo memético con una estrategia híbrida para generar un menú saludable, equilibrado y económico en una cafetería de escuela, aunque solo contempla una ingesta diaria.

## 2. EL CASO ESPAÑOL Y LA DIETA MEDITERRÁNEA

Aunque los modelos de planificación de dietas sostenibles buscan responder a desafíos globales, su aplicación práctica varía significativamente según el contexto local. En el caso de España, resulta crucial analizar cómo estos modelos se adaptan a los patrones alimentarios y las particularidades culturales del país. La dieta española, tradicionalmente vinculada a la dieta mediterránea, se enfrenta hoy a tensiones derivadas de cambios en los hábitos de consumo, la globalización y los retos ambientales, lo que pone de manifiesto la necesidad de integrar estos enfoques sostenibles en el día a día de la población.

Así, en los últimos años, los patrones alimenticios en España han experimentado una notable transformación, alejándose en parte de la tradicional dieta mediterránea, considerada un elemento clave de la identidad cultural española. Este cambio responde a diversos factores, como la aceleración de los estilos de vida, la influencia de alimentos ultraprocesados y las dinámicas del mercado global. En este contexto, resulta esencial analizar la situación actual de la dieta en España, basándonos en los datos más recientes del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, así como en los informes de la

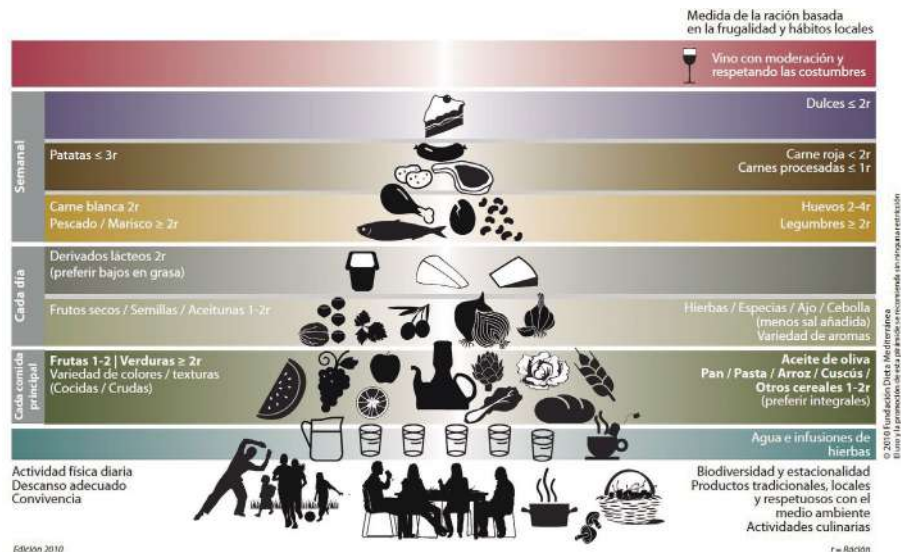


Figura 1.1. Pirámide de la Dieta Mediterránea. Fuente: Fundación Dieta Mediterránea

Fundación Española de Nutrición y la Fundación de la Dieta Mediterránea<sup>2</sup>, para entender mejor los retos y oportunidades que plantea esta transición.

Para ello, conviene esclarecer cuáles son los estándares que establece la dieta mediterránea, que avalan su importancia en la definición de patrones de consumo saludables. Originalmente, esta dieta se caracteriza por una alimentación rica en frutas, verduras, cereales integrales, pescado, legumbres, frutos secos y semillas y un moderado aporte de carnes blancas. Además, el aceite de oliva constituye la principal grasa, sustituyendo a otras como la mantequilla u otras grasas animales. Un buen resumen de ello es la conocida «pirámide mediterránea», que se distribuye como se muestra en la [figura 1.1](#).

En concreto, de la [figura 1.1](#) se deducen algunos aspectos clave en la dieta mediterránea a tener en cuenta son los siguientes:

- Los carbohidratos son la principal fuente de energía y deberían representar entre el 55-60% de las calorías diarias, priorizando carbohidratos complejos y fibra, mientras que los azúcares libres deberían limitarse a menos del 10% de la ingesta calórica total o, idealmente, al 5%, debido a su relación con la obesidad y otras enfermedades crónicas. Es preferible optar por granos integrales como trigo integral, avena

2. <https://dietamediterranea.com>

- y cebada, evitando productos ricos en azúcares añadidos como bebidas azucaradas, bollería y salsas.
- En cuanto al sodio, se recomienda no superar los 5 gramos al día, preferentemente en forma de sal yodada, para reducir el riesgo de hipertensión y enfermedades cardiovasculares.
  - En el caso de frutas y verduras, se aconseja consumir al menos 400 gramos diarios, equivalentes a cinco porciones, lo que contribuye a una dieta rica en fibra, antioxidantes y micronutrientes, ayudando a prevenir enfermedades crónicas como el sobrepeso y la diabetes.
  - Los productos lácteos, como leche, yogur y queso, son valiosos por su contenido en calcio, esencial para la salud ósea, aunque se debe moderar el consumo de queso debido a su alto contenido en grasas saturadas. Aunque controvertidos, son considerados alimentos equilibrados y su consumo moderado es recomendado.
  - Las proteínas deberían representar entre un 10-15% de las calorías diarias o 0,7 gramos por kilogramo de peso corporal, priorizando carnes magras, pescado, aves, legumbres y frutos secos y limitando la carne roja y procesada por su contenido en grasas saturadas y sal.
  - Las grasas no deben superar el 30% de la ingesta calórica, con menos del 10% provenientes de grasas saturadas. Las fuentes saludables incluyen aceite de oliva, frutos secos, semillas y pescado azul, mientras que los aceites refinados y la mantequilla deben limitarse.
  - Respecto al alcohol, aunque la dieta mediterránea permite un consumo moderado de vino tinto por sus posibles beneficios, estudios recientes indican que cualquier cantidad puede ser perjudicial para la salud debido a su alto contenido calórico, riesgo de adicción y asociación con diversas enfermedades, incluyendo cáncer y enfermedades cardiovasculares.

Por otro lado, los patrones de la dieta mediterránea no solo abordan aspectos nutritivos, sino que también conlleva adoptar aquellos hábitos de consumo y cocina tradicionales de la región del mar Mediterráneo. De esta forma, se fomenta el consumo de productos locales, frescos y de temporada para promover alternativas más sostenibles.

España es uno de los países que bordean el mar Mediterráneo y cuenta con tradiciones culinarias profundamente arraigadas que se alinean con los principios de la dieta mediterránea. Sin embargo,

como ya hemos mencionado previamente, es importante señalar que los patrones dietéticos han evolucionado con el tiempo, influenciados por diversos factores como la globalización, la urbanización y los cambios en el estilo de vida y la disponibilidad de alimentos.

Concretamente, como se refleja en la [tabla 1.1](#), estos cambios recogen un incremento en el consumo de procesados y azúcares, así como se reduce la ingesta de frutas, verduras y otros cereales que, en su momento, fueron la base de la dieta mediterránea.

Tabla 1.1. Comparación de la situación actual en España, frente a la recomendación de la Dieta Mediterránea

Grupo	Recomendación	Consumo España (2020)
Carbohidratos	55-60% del total de energía	Por debajo de lo recomendado (máx. 45%)
Azúcar	Por debajo del 10% del consumo calórico total	16% del total de kcal consumidas
Sal	Por debajo de 5g al día	8g al día
Frutas y verduras	Superior a 400g al día	Alrededor de 370g al día
Lácteos	Consumo moderado	Unos 300g al día
Proteína	10-15% de la energía total	15-17% de la energía total
Grasas	Alrededor de 30% del consumo total de calorías	38% del total calórico consumido
Alcohol	Moderado o nulo	2% del total de calorías consumidas

De esta forma, implementando estrategias comprensivas y basadas en la evidencia, España tiene potencia para reconducir la tendencia negativa hacia hábitos de vida más saludables con dietas sostenibles. Sin embargo, todos los expertos convergen en la misma conclusión: «Ninguna dieta del mundo funciona, lo que funciona es dar opciones y que cada uno pinte su propio cuadro» (Ojeda, 2024). Es aquí donde el planteamiento del problema del diseño del menú cobra más sentido. Y es que una buena planificación puede ayudar incluso a la hora de realizar una lista de la compra, que puede

contribuir a minimizar el coste y el volumen de desperdicio, a la vez que se integran elementos locales y/o de temporada.

Así, se ratifica el problema del diseño del menú como un problema de decisión multicriterio, para el que resulta necesario proporcionar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, a nivel personal y también para los nutricionistas profesionales, en la elaboración de un menú saludable y sostenible. Esta es la línea propuesta en nuestro trabajo, para el que se añaden otras exigencias propias de una dieta sana, como la calidad de la grasa y otras características propias de la dieta mediterránea, ya que nuestro menú se centra en la población española como población objetivo de este estudio.

### 3. DEL PROBLEMA A LA SOLUCIÓN: NUESTRO MODELO PROPUESTO

A partir de ahora, trabajaremos con un conjunto de recetas o platos y no con alimentos de forma individual. Para ello, resulta necesario definir cantidades estándar para la ingesta de cada plato (como se indica en la [tabla 1.2](#)), de forma que transforme una posible solución por cantidades de alimentos en un problema definido por platos cocinados, es decir: el problema del diseño del menú para D-días.

Tabla 1.2. Definición de cantidades según categoría de plato

Categoría	Snacks	Vaso de bebida fría	Taza de bebida caliente	Fruta	Dulces y postres	Pan	Plato Principal
Cantidad sugerida (g)	30	200-250	175-200	100	80-100	75-100	200-250

Para ello, siguiendo los estándares de consumo en España, se organizan las ingestas en una estructura diaria, tal y como se indica en la [tabla 1.3](#). Así, cada día se define como un desayuno, un almuerzo –que es la comida más copiosa del día e incluye un bollo de 100 g de pan–, una cena y una porción de frutos secos como *snack*.

Tabla 1.3. Distribución de ingestas

Desayuno	Almuerzo	Cena	Extra
Bebida caliente Zum o fruta Desayuno principal	Pan Bebida fría Entrante Plato principal Postre	Bebida fría Plato principal Postre	<i>Snack</i>

Para la elaboración de los distintos menús, nos apoyaremos en dos bases de datos relacionadas. La primera, formada por 275 alimentos, de los que se conocen los valores nutricionales y han sido clasificados en 14 categorías. Y, por otro lado, una base de 227 recetas tradicionales españolas, las cuales son etiquetadas según su consumo, enmarcado en la estructura de ingestas diarias.

Para afrontar el problema, se considera que las soluciones han de mostrar no solo si un plato se consume o no, sino también el día y el momento de la ingesta sobre el que se planifica el menú. Por tanto, un *menú factible* verifica una serie de condiciones que podemos agrupar en tres grandes grupos:

1. *Nutricionales*: Por un lado, apoyándonos en los estándares de la dieta mediterránea, se han establecido cantidades mínimas y/o máximas para el consumo de fruta, pescados, aceite, legumbres y frutos secos, mientras se han definido límites superiores para la mantequilla, los dulces, la carne roja y procesadas (embutidos).

Tabla 1.4. Limitaciones dieta mediterránea  
(por gramo y día y grupo de alimentos)

Alimento o categoría (g)	Consumo mínimo (g/día)	Consumo máximo (g/día)
Carne roja		50
Carne procesada		20
Pescado	40	
Verdura	300	
Fruta	250	
AOVE	25	
Mantequilla		10
Legumbres	6,5	

Alimento o categoría (g)	Consumo mínimo (g/día)	Consumo máximo (g/día)
Frutos secos	22	
Dulces		15

Además, se han añadido algunas restricciones adicionales con el fin de ajustar el consumo de procesados y carnes. Así, se impone que la ingesta de carnes rojas ha de ser inferior a la de carne blanca y se motiva un mayor consumo de pescados que de carne.

Por último, también se contemplan en el modelo limitaciones en términos de grasas. Se conoce que esta puede ser: saturada (AGS), monoinsaturada (AGM) y polinsaturada (AGP). En general, las grasas polinsaturadas y monoinsaturadas contribuyen a reducir los niveles de colesterol y protegen de enfermedades cardiovasculares, frente a las saturadas que hacen los alimentos más sabrosos o palatables.

2. *Estructura* de las ingestas diarias. Tal y como aparece en la [tabla 1.3](#).
3. *Se ha tratado de fomentar la variedad en el menú* limitando el número de veces que se puede consumir un plato en el horizonte temporal, tratando de no repetir proteína animal en el mismo día y permitiendo cierta flexibilidad en la energía diaria consumida (siempre y cuando se cubra la energía completa en el horizonte temporal).

Hay que tener en cuenta que, aunque nuestro modelo sea flexible y pueda ser modificado, para las instancias resueltas se ha utilizado el perfil de una mujer activa de unos 30 años de edad. Este perfil da lugar a unos requisitos nutricionales específicos que se detallan en la [tabla 1.5](#).

Tabla 1.5. Requisitos nutricionales expresados como cantidades diarias (Moreiras et al., 2022)

Nutriente	Consumo mínimo (día)	Consumo máximo (día)
Energía (Kcal)	1840	2300
Fibra (g)	25	
Colesterol (mg)		300
Calcio (mg)	750	

Nutriente	Consumo mínimo (día)	Consumo máximo (día)
Hierro (mg)	14	
Magnesio (mg)	330	
Sodio (mg)		2000
Potasio (mg)	2000	
Fósforo (mg)	700	
Niacina (mg)	15	
Folato (µg)	400	
Vit. B12 (µg)	2	
Vit. C (mg)	80	
Vit. A (µg)	800	
Vit. D (µg)	5	
Vit. E (mg)	12	

Las restricciones derivadas de esta tabla dependen de los ingredientes. Así, combinando las bases de datos de platos e ingredientes, se pueden conocer los valores nutricionales de cada plato de nuestra base de datos, multiplicando estos por la cantidad a consumir de cada alimento en cada receta.

A continuación, otras características propias de una dieta saludable incorporan restricciones que delimitan la energía que puede ser obtenida desde cada uno de los macronutrientes. Nótese que estas restricciones se definen en términos proporcionales respecto a la energía consumida.

Tabla 1.6. Macronutrientes obtenidos de la energía total

Macronutrientes (% total energía)	Cota inferior	Cota superior
Proteínas	10%	20%
Carbohidratos	40%	60%
Azúcar	-	15%
Grasas	25%	40%

De esta tabla se deduce que las proteínas deben aportar entre un 10 y un 20% del total de la energía consumida, las grasas entre un 25 y un 40% y, como fuente principal de la energía, se encuentran los carbohidratos, aportando entre el 40 y 60%, donde la energía procedente del azúcar está acotada por un 15%.

Una vez establecidas las limitaciones que definen la factibilidad de los menús que deseamos generar, procedemos a formular las funciones objetivo de este problema, que nos llevará al diseño de un menú factible y lo mejor posible en términos de estas funciones. Concretamente, se abordará:

1. Minimizar el *coste del menú*: el coste de cada plato es el resultado de sumar el coste de sus ingredientes.
2. Como se ha comentado previamente, la *palatabilidad* constituye un objetivo difícil de formular matemáticamente. En este caso, la palatabilidad se aborda mediante la construcción de menús lo más «cercaños» o «similares» a un menú de referencia (CM), que corresponde con el consumo actual de una persona en D días. Las diferencias entre el menú de referencia y la solución eficiente generada mostrarían las modificaciones que tendría que realizar un individuo con el fin de acercar su consumo hacia una dieta más saludable, a la vez que se intenta conservar sus preferencias personales en términos de hábitos de consumo. Para abordar esta problemática, se propone una función llamada de «similitud», que refleja el volumen de cambios a realizar por el individuo, por grupos de platos, desde su menú inicial (CM) al menú propuesto por el modelo.
3. Finalmente, el *impacto ambiental* de un menú –tal y como ocurría con el coste– se define como la suma de emisiones por ingredientes sugeridos. Concretamente, se considera la emisión de gases de efecto invernadero como representante para este objetivo, aunque también se puede contemplar el uso de agua u otros recursos.

Por último, establecemos un horizonte temporal de D=15 días y se considera un menú de partida (CM), que presumiblemente es el actual que consume una persona con el perfil establecido, que destaca verduras, frutas y lácteos, seguido de hidratos de carbono y un reducido consumo de legumbres, huevos y dulces. A pesar de que no presenta ningún consumo alarmante que lo aleje de un hábito saludable, los menús eficientes generados han de marcar una transición hacia un patrón más saludable –asociado a la dieta mediterránea– a la vez que se reduzca el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero.

Toma\Día	Día 1	Día 2	Día 3
Bebida D	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar
Principal D	Pitufo de jamón cocido con aceite y tomate	Bol de cereales con leche semidesnatada	Sándwich jamón cocido y queso
Fruta D	Zumo de naranja y zanahoria	Zumo de naranja y zanahoria	Zumo de naranja y zanahoria
Bebida A	Agua	Agua	Agua
Primero A	Paella de pollo y verduras	Paella de pollo y verduras	Ensalada malagueña
Pan A	Bollo de pan blanco (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)
Segundo A	Berenjenas a la plancha	Champiñones a la plancha	Solomillo al Pedro Ximenez (*añadir caldo) con patatas fritas
Postre A	Zumo de naranja, piña y fresa	Ración de ciruelas	Yogurt
Bebida C	Agua	Agua	Agua
Principal C	Dorada a la plancha con ensalada mixta	Bacalao a la plancha con ensalada mixta	Bacalao a la plancha con ensalada mixta
Postre C	Ración de fresas	Yogurt con nueces	Yogurt con cereales
Frutos secos	Almendras	Mezcla fruto seco	Nuez pelada

Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar
Tostadas de mantequilla y mermelada	Pitufu de jamón cocido con aceite y tomate	Tostadas de mantequilla y mermelada	Pitufu de jamón cocido con aceite y tomate
Zumo de sandía y fresa	Zumo de sandía y fresa	Zumo de sandía y fresa	Zumo de manzana y uva
Agua	Agua	Caña de cerveza	Caña de cerveza
Ensalada malagueña	Sopa de cebolla	Crema de verduras	Sopa de cebolla
Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)
Ensalada simple de espinacas	Espárragos a la plancha con mayonesa	Tofu al pil pil con ensalada mixta y arroz	Conejo al ajillo con patatas
Ración de ciruelas	Ración de coco	Ración de granada	Ración de sandía
Agua	Copa de vino	Copa de vino	Agua
Espárragos salteados al ajo	Espárragos a la plancha con mayonesa	Ensalada simple de acelgas	Atún a la plancha con ensalada mixta
Ración de mango	Yogurt con nueces	Yogurt con nueces	Ración de fresas
Almendras	Cacahuets fritos con sal	Mezcla fruto seco	Almendras

Figura 1.2. Menú inicial de 7 días (CM). Fuente: Elaboración propia

Toma\Día	Día 1	Día 2	Día 3
Bebida D	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar
Principal D	Pitufo de jamón cocido con aceite y tomate	Pan con aceite	Pan con aceite
Fruta D	Zumo de manzana granny y pera	Zumo de naranja y zanahoria	Zumo de sandía y fresa
Bebida A.	Agua	Agua	Agua
Primero A	Ensalada simple de acelgas	Puré de puerros y espinacas	Tortilla de patatas
Pan A	Bollo de pan blanco (100 g)	Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)
Segundo A	Berenjenas a la plancha	Croquetas de atún con arroz	Hamburguesa de cerdo con arroz
Postre A	Yogurt con nueces	Yogurt con chocolate	Ración de melón
Bebida C	Agua	Agua	Agua
Principal C	Lenguado a la plancha con ensalada mixta	Revuelto de acelgas	Dorada a la plancha con ensalada mixta
Postre C	Ración de mango	Yogurt	Ración de mango
Frutos secos	Almendras	Avellana	Mezcla fruto seco

Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar
Pitufo de jamón cocido con aceite y tomate	Pan con aceite	Bol de cereales con leche semidesnatada	Tostadas de mantequilla y mermelada
Zumo de naranja, piña y fresa	Mix de frutas veraniegas	Ración de naranja	Zumo de naranja y zanahoria
Agua	Agua	Agua	Caña de cerveza
Ensalada simple de espinacas	Cazuelita de verduras	Crema de verduras	Ensalada simple de acelgas
Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)	Bollo de pan integral (100 g)	Bollo de pan blanco (100 g)
Croquetas de bacalao con arroz	Albóndigas en salsa de almendra con arroz	Hamburguesa de pollo con patatas fritas	Tofu al pil-pil con ensalada mixta
Ración de Fresas	Yogurt con frutas	Yogurt con nueces	Ración de melón
Agua	Caña de cerveza	Caña de cerveza	Agua
Sopa de cebolla	Bacalao a la plancha con ensalada mixta	Tortilla de espinacas	Dorada a la plancha con ensalada mixta
Ración de sandía	Ración de mango	Ración de fresas	Ración de mango
Almendras	Avellana	Cacahuets fritos con sal	Almendras

Figura 1.3. Menú solución de 7 días (87% de Similitud). Fuente: Elaboración propia

A *priori*, este menú (CM) presenta un coste diario de 5,86€ y una emisión de gases de efecto invernadero que ascienden a 82,1 kg de CO<sub>2</sub> (o equivalente), mientras el valor de la similitud de este menú es –por defecto– 1, ya que buscamos un menú lo más similar a este.

Una vez definidos todos los elementos del modelo, generamos un conjunto de menús eficientes que cumplan todas estas condiciones. Para ello, se ha utilizado una combinación de técnicas de decisión multicriterio con estrategias metaheurísticas, las cuales se emplean para abordar problemas combinatorios complicados. Aunque no garantizan la solución óptima, ofrecen resultados de alta calidad en un tiempo razonable, lo que las hace ideales para problemas prácticos donde métodos exactos serían inviables por el elevado tiempo de ejecución. En nuestro caso concreto, se trata de un problema combinatorio no lineal que contempla un gran número de variables, así como múltiples objetivos, lo que hace que sea necesaria la utilización de este tipo de técnicas.

En concreto, tras la resolución, se han obtenido más de 170 000 menús factibles únicos, de los cuales 1100 son eficientes, lo cual supone una amplia gama de opciones dietéticas, cada una optimizada con un énfasis único en el coste, el impacto ambiental y la palatabilidad.

Un análisis individualizado del valor en los objetivos de cada una de estas soluciones eficientes nos muestra cómo, en el peor de los casos, entre los menús eficientes generados se presentan mejoras en el coste del menú de partida y en el volumen de emisiones de carbono. En concreto, para los menús generados, el coste diario<sup>3</sup> oscila entre los 3,57€ y los 5,18€. Por otro lado, los menús eficientes presentan un impacto ambiental que oscila entre los 53 y los 70 kg de CO<sub>2</sub> (frente a los más de 80 que presentaba el menú de referencia). Entre el conjunto de menús eficientes obtenidos se aprecia cierta relación de los márgenes obtenidos de emisiones con los valores que presenta el menú de partida (CM), que es elevado (82,095 kg de CO<sub>2</sub>). En concreto, aquellos menús eficientes cuya similitud con el menú de referencia supera el 70% presentan emisiones más altas. Con el fin de maximizar la similitud con el menú de partida, los menús de la frontera de Pareto presentan valores entre el 63% y el 87% de similitud, lo cual resalta la bondad del método para no alterar mucho del consumo de partida de un individuo concreto.

---

3. En este trabajo, el coste (por gramo de alimento) que se toma como referencia es del año 2018.

Este mismo procedimiento se puede realizar tomando un menú de partida distinto, a partir del cual se podría generar un conjunto eficiente de menús que atiendan a los objetivos establecidos. Con esta muestra hemos querido resaltar que es posible implementar una herramienta que contribuya en la toma de decisiones del consumo individual de una persona hacia una dieta más sostenible y saludable con el menor volumen de cambio posible en sus hábitos alimentarios.

## CONCLUSIONES

El problema de la planificación de menús es un problema de optimización combinatoria que surge en un contexto tanto individual como industrial, del diseño de menús, la planificación de dietas y la gestión de la cadena de suministro de alimentos. El objetivo principal de este problema es encontrar un conjunto de comidas que satisfaga las necesidades nutricionales de un grupo de individuos, minimizando al mismo tiempo el coste y el impacto ambiental de las comidas.

Este problema ha atraído una atención considerable en el campo de la investigación operativa y la ciencia de la nutrición. Con su naturaleza multifacética, el presente trabajo aborda objetivos como la nutrición, el coste, la sostenibilidad y la palatabilidad. Más allá, este trabajo busca introducir explícitamente la sostenibilidad ambiental como un objetivo del problema utilizando datos de análisis de ciclo de vida (como el uso de la tierra, el consumo de agua o los gases de efecto invernadero) de los alimentos presentes en los planes de menú. Los resultados muestran que los menús SHARP son posibles y pueden ser atractivos para la población en general. Esto no quiere decir que introducirlos y que sean aceptados por un gran porcentaje de la población pueda ser una cuestión trivial, pero los resultados obtenidos ponen de manifiesto que existen herramientas que pueden contribuir a su diseño e implementación.

Este problema es, además, la raíz de toda una serie adicional de problemas, entre los que cobra relevancia el «problema de la lista de la compra», en el que la solución tiene dos vertientes: una en cuanto a lo que nos acabamos comiendo y otra en cuanto a lo que compramos, algo que guarda estrecha relación con la reducción de desperdicio de comida. Este problema tiene en cuenta cuestiones como el espacio de almacenamiento, los tamaños y cantidades disponibles para comprar y las fechas de caducidad de los alimentos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2022-139543 OB-C42, Metodologías para la búsqueda de soluciones en problemas con criterios económicos, sociales y medioambientales. Una aproximación multicriterio. Asimismo, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Trinidad Gómez Núñez y Rafael Caballero Fernández, cuya contribución ha sido fundamental a lo largo de estos años de trabajo en el Problema de la Dieta y el Problema del Menú. Su apoyo, conocimientos y valiosas discusiones han enriquecido significativamente nuestro trabajo y han sido clave en la consecución de resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benvenuti, L., De Santis, A., Santesarti, F. y Tocca, L. (2016): «An optimal plan for food consumption with minimal environmental impact: the case of school lunch menus», *Journal of Cleaner Production*, 129, 704-713.
- Benvenuti, L., De Santis, A., Di Sero, A. y Franco, N. (2019): «Concurrent economic and environmental impacts of food consumption: are low emissions diets affordable?», *Journal of Cleaner Production*, 236, 117645.
- Burlingame, B. y Dernini, S. (2012): *Biodiversity and sustainable diets: united against hunger*. Roma: Food and Agriculture Organization (FAO) of United Nations.
- Dantzig, G. (1969): *Linear programming and extensions*. Princeton: Princeton University Press.
- Donati, M., Menozzi, D., Zighetti, C., Rosi, A., Zinetti, A. y Scazzina, F. (2016): «Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives», *Appetite*, 106, 48-57.
- Duckworth, J. J., Randle, M., McGale, L. S., Jones, A., Doherty, B., Halford, J. C. y Christiansen, P. (2022): «Do front-of-pack 'green labels' increase sustainable food choice and willingness-to-pay in UK consumers?», *Journal of Cleaner Production*, 371, 133466.
- Hernández, M., Gómez, T., Delgado-Antequera, L. y Caballero, R. (2021): «Using multiobjective optimization models to establish healthy diets in Spain following Mediterranean Standards», *Operational Research*, 21(3), 1927-1961.
- Leung, P., Wanitprapha, K. y Quinn, L. A. (1995): «A recipe-based, diet-planning modelling system», *British Journal of Nutrition*, 74(2), 151-162.
- Macdiarmid, J. I., Kyle, J., Horgan, G. W., Loe, J., Fyfe, C., Johnstone, A. y McNeill, G. (2012): «Sustainable diets for the future: can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet?», *The American Journal of Clinical Nutrition*, 96(3), 632-639.

- Marling, C. R., Petot, G. J. y Sterling, L. S. (1999): «Integrating case-based and rule-based reasoning to meet multiple design constraints», *Computational Intelligence*, 15(3), 308-332.
- Martos-Barrachina, F., Delgado-Antequera, L., Hernández, M. y Caballero, R. (2022): «An extensive search algorithm to find feasible healthy menus for humans», *Operational Research*, 22, 5231-5267.
- Martos-Barrachina, F., Delgado-Antequera, L. y Hernández, M. (2024): «A novel cost-palatability bi-objective approach to the menu planning problem with an innovative similarity metric using a path relinking algorithm», *Journal of the Operational Research Society*, 76(1), 1-13.
- Marty, L., Chambaron, S., de Lauzon-Guillain, B. y Nicklaus, S. (2022): «The motivational roots of sustainable diets: Analysis of food choice motives associated to health, environmental and socio-cultural aspects of diet sustainability in a sample of French adults», *Cleaner and Responsible Consumption*, 5, 100059.
- Marrero, A., Segredo, E., León, C. y Segura, C. (2020): «A memetic decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm applied to a constrained menu planning problem», *Mathematics*, 8(11), 1960.
- Mertens, E., Kuijsten, A., Geleijnse, J. M., van't Veer, P., Trolle, E., Tetens, I., Dofková, M., Mistura, L., D'Addezio, L., Ferrari, M., Dubuisson, C. y Favret, S. (2016): Protocol for defining the nutritional adequacy of total diets and foods consumed in EU countries. La Haya: Strengthening European Food and Nutrition Security (SUSFANS).
- Moreiras, O., Carbajal, A., Cabrera, L. y Cuadrado, C. (2022): *Tablas de composición de alimentos. Guía de prácticas*. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Murray, C. J. (2024): «Findings from the Global Burden of Disease Study 2021», *The Lancet*, 403 (10440), 2259-2262.
- Petot, G. J., Marling, C. y Sterling, L. (1998): «An artificial intelligence system for computer-assisted menu planning», *Journal of the American Dietetic Association*, 98(9), 1009-1014.
- Ojeda, P. (2024): «Ninguna dieta del mundo funciona, lo que funciona es dar opciones y que cada uno pinte su propio cuadro», *ABC*, 26 de noviembre de 2024.
- Ritchie, H., Rosado, P. y Roser, M. (2022): *Environmental impacts of food production. Our world in data*. Londres: Global Change Data Lab.
- Stigler, G. J. (1945): «The cost of subsistence», *Journal of Farm Economics*, 27(2), 303-314.
- Syahputra, M. F., Felicia, V., Rahmat, R. F. y Budiarto, R. (2017): «Scheduling diet for diabetes mellitus patients using genetic algorithm», *Journal of Physics: Conference Series*, 801(1), 012033.



# Evaluación de programas de intervención basados en la actividad física y el deporte para la prevención del consumo de drogas: una perspectiva multicriterio

MARCOS ASENSIO HERNÁNDEZ  
*Universidad Politécnica de Madrid*

ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN  
*Universidad Politécnica de Madrid*

PEDRO J. JIMÉNEZ MARTÍN  
*Universidad Politécnica de Madrid*

ALBERTO DORADO SUÁREZ  
*Universidad de Castilla-La Mancha*

## INTRODUCCIÓN

Las sociedades desarrolladas han tenido que afrontar graves problemáticas relacionadas con el consumo de sustancias: el consumo de heroína en la década de 1970, el de cocaína en la década de 1980 o el consumo de metanfetaminas, opioides y otras nuevas sustancias psicoactivas en décadas posteriores. El consumo y el desarrollo de

trastornos psicológicos que conlleva representan una problemática con severas consecuencias no solo para los individuos que las consumen, sino también para sus familias y la sociedad en su conjunto.

La gravedad de este fenómeno ha situado a la prevención y el tratamiento en una prioridad para los países desarrollados. Para ello, se crearon organismos de carácter nacional e internacional dedicados a abordar el consumo de drogas. Los principales organismos, siguiendo el orden cronológico de su creación, son: el National Institute on Drug Abuse (NIDA), fundado en Estados Unidos en 1974; el Plan Nacional sobre Drogas (PNSD), establecido en España en 1985; el Canadian Centre on Substance Use and Addiction (CCSA), creado en Canadá en 1988; la Substance Abuse and Mental Health Services Administration (SAMHSA), inaugurada en Estados Unidos en 1992; el European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction (EMCDDA, actualmente European Union Drugs Agency, EUDA), establecido en Europa en 1993, y, finalmente, con alcance internacional, la United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), creada en 1997.

Aunque se han logrado importantes avances en esta materia, el consumo de drogas sigue siendo un fenómeno dinámico marcado por la constante aparición de nuevas sustancias, la evolución de las redes de tráfico y distribución y los cambios en las tendencias de consumo, haciendo que este problema continúe siendo un desafío en nuestra sociedad que exige esfuerzos sostenidos y enfoques innovadores para desarrollar soluciones efectivas.

## 1. EL CONSUMO DE DROGAS EN EL MUNDO Y EN ESPAÑA

Periódicamente, los organismos mencionados en el apartado anterior elaboran informes estadísticos sobre la prevalencia del consumo de diferentes drogas. Según el *Informe Mundial sobre las Drogas* de 2023 de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (ONUDD, 2023) la tendencia del consumo en la población en 2021 aumentó un 23% con respecto a la década anterior. En Europa, el Informe Europeo sobre Drogas elaborado por el Observatorio Europeo de las Drogas y las Toxicomanías en 2022 (OEDT, 2022) estimó que el 19,1% de los jóvenes entre 15 y 24 años consumieron cannabis en el último año. En España, el Observatorio Español de las Drogas y las Adicciones (OEDA, 2022) publicó en 2022 el *Informe sobre alcohol, tabaco y drogas ilegales en España*, en el cual se registraron 774 defunciones por consumo de drogas en 2020, la cifra más alta de las últimas dos décadas.

Aunque el consumo de drogas puede ser un problema para cualquier persona, su impacto durante la adolescencia es especialmente relevante por implicar riesgos específicos. Puede afectar al desarrollo cerebral, provocando consecuencias psicológicas graves y duraderas y, además, se asocia con otras problemáticas como las conductas sexuales de riesgo, el comportamiento agresivo, el bajo rendimiento académico o el abandono escolar.

El *Plan nacional sobre drogas* realiza desde 1994 de manera bianual la *Encuesta sobre el uso de drogas en enseñanzas secundarias en España (ESTUDES)* para conocer la situación y las tendencias del consumo de drogas y otras adicciones entre los estudiantes de 14 a 18 años que cursan enseñanzas secundarias. La encuesta publicada en el año 2023 (OEDA, 2023) destaca que las drogas más consumidas en los últimos 12 meses fueron el alcohol (73,6%), el tabaco (27,7%) y el cannabis (21,8%). Uno de los datos más relevantes en esta encuesta es la edad de inicio del consumo de cada sustancia. El consumo de alcohol se inicia a los 13,9 años; el del tabaco y los hipnose-dantes, a los 14,1 años, y el del cannabis, a los 14,9 años. El adolescente se inicia con un consumo experimental que puede, o no, progresar a otros niveles de consumo más frecuentes a lo largo de su vida. Una posible solución al problema del consumo de drogas es evitar que se produzca el inicio del consumo durante la adolescencia o retrasarlo todo lo posible. Las acciones orientadas a estos fines se denominan *estrategias de prevención*.

## 2. LA PREVENCIÓN DEL CONSUMO DE DROGAS

Según los estándares europeos de calidad para la prevención de drogodependencias elaborados por la EUDA en 2011 (Brotherhood y Summall, 2011), los objetivos de la prevención deben impedir que las personas comiencen a consumir drogas, evitar que el consumo experimental avance a un consumo regular y/o desarrollar intervenciones tempranas para patrones de consumo de riesgo; aunque también pueden centrarse en la reducción del consumo de drogas y sus consecuencias negativas.

Las estrategias de prevención pueden ser muy variadas, desde una decisión política para elaborar una propuesta legislativa hasta el diseño e implementación de un programa de prevención dirigido a adolescentes. En España, todas las acciones y estrategias enfocadas a la prevención se recogen en la *Estrategia Nacional sobre Adicciones*,

elaborada por el *Plan Nacional sobre Drogas*, permitiendo una actuación coordinada y organizada en materia de prevención.

En este capítulo nos centraremos en presentar las estrategias de prevención enfocadas al ámbito educativo o de ocio, implementadas mediante programas dirigidos a adolescentes y cuyo objetivo principal es evitar o retrasar la edad de inicio del consumo de drogas.

Un programa es un conjunto organizado de acciones enfocadas a cumplir los objetivos de prevención, compuesto por una serie de sesiones con actividades dirigidas a la población diana y basadas en teorías psicológicas centradas en el cambio de comportamiento. Los contenidos de estas sesiones y actividades abordan aspectos psicológicos clave que contribuyen a reducir la probabilidad de consumo futuro en el adolescente: habilidades sociales y personales, habilidades para rechazar el consumo, creencias, actitudes, influencias sociales, etc.

Como podrá imaginar el lector, el diseño de un programa social de este tipo no se limita a buenas intenciones; es un proceso complejo que requiere de una investigación previa exhaustiva sobre las características y necesidades de la población y comunidad destinataria. Además, implica un cuidadoso proceso de planificación y toma de decisiones, en el que se define la estructura, los contenidos, las actividades del programa y las estrategias o técnicas a utilizar, asegurando su adecuación a los recursos disponibles.

En la actualidad, la evidencia científica sobre prevención ha permitido diseñar programas que han logrado resultados muy positivos. En este contexto, diversos organismos, investigadores y responsables políticos han identificado la *actividad física y el deporte* (AFD) como una estrategia innovadora y prometedora que podría utilizarse en el ámbito de la prevención.

### 3. EL USO DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE EN EL ÁMBITO DE LA PREVENCIÓN

La AFD ofrece un contexto privilegiado para la promoción de valores sociales y personales, el desarrollo de conductas saludables y el cambio de comportamiento. El interés de organismos nacionales e internacionales por utilizar el deporte como estrategia de prevención del consumo de drogas ha crecido en los últimos años. En 2016, el CCSA realizó una revisión sobre los programas de prevención basados en AFD más importantes de Canadá y a nivel internacional (McKiernan, 2016). En 2018, la ONUDD y la Organización Mundial de

la Salud destacaron en sus *Normas Internacionales sobre Prevención del Consumo de Drogas* la necesidad de comprender mejor cómo utilizar la AFD para la prevención (ONUDD/OMS, 2018). Esta misma organización lanzó en 2020 el programa *Line up, live up* para prevenir la delincuencia juvenil a través del deporte (Sanders, 2020).

En el ámbito de la investigación, solamente se han encontrado tres revisiones sistemáticas publicadas en revistas científicas sobre programas de prevención basados en AFD: la revisión de Simonton *et al.* (2018), que incluyó quince programas, la de Thompson *et al.* (2020) con cinco programas, y la de Klamert *et al.* (2023), que incluyó un total de 28 programas. Como se puede observar, el empleo de la AFD en el ámbito de la prevención es un tema de gran relevancia y actualidad.

Las conclusiones de las revisiones anteriormente mencionadas fueron positivas, coincidiendo en que el deporte puede ser una herramienta óptima para evitar el consumo de drogas o reducir las intenciones de consumo en el futuro. Sin embargo, no todos los programas incluidos en las revisiones empleaban la AFD de la misma manera, ni todos fueron igual de efectivos. En Asensio-Hernández *et al.* (2024), se llevó a cabo un análisis de los programas recopilados en las tres revisiones mencionadas previamente, identificando tres tipos de enfoques o paradigmas según la forma en que utilizaban la AFD para lograr la prevención:

El primer paradigma se denomina *deporte preventivo* porque defendía la idea de que la mera práctica de AFD, sin necesidad de modificación alguna, puede proteger frente a conductas problemáticas como el consumo de drogas. El único contenido de estos programas es, por tanto, la práctica de AFD (entrenamiento de la condición física, yoga).

El segundo paradigma se denomina *prevención combinada con deporte*, ya que incluye la AFD como un complemento o componente adicional del programa de prevención. En algunos casos, se limita únicamente a la práctica deportiva, mientras que en otros se incorporan contenidos educativos relacionados con la AFD. En estos programas las sesiones de práctica de AFD complementan las sesiones de prevención en el aula, pudiendo tratar contenidos educativos sobre AFD en estas últimas.

Por último, el tercer paradigma recibe la denominación de *prevención a través del deporte*. Desde este enfoque, la AFD no es un fin en sí mismo o un complemento de la prevención, sino un medio para lograr el cambio. Es decir, siguiendo los nuevos modelos pedagógico-psicológicos basados en AFD, la AFD puede adaptarse o

modificarse en base a fundamentos psicológicos con el objetivo de incorporar estrategias y contenidos específicamente orientados a la prevención. Este tipo de programas utilizan el contexto y los elementos de la AFD (entrenador, capitanes, referentes deportivos, sesiones prácticas, espacios deportivos, valores y normas del equipo, etc.) para trabajar contenidos educativos relacionados con la prevención.

Al analizar la efectividad de las intervenciones según el paradigma empleado, se encontró que los programas basados en el paradigma de *deporte preventivo* no lograron resultados significativos en el consumo actual de drogas o en las intenciones de consumo futuras. Por el contrario, los programas diseñados desde los paradigmas de *prevención combinada con deporte* y *prevención a través del deporte* mostraron resultados positivos en estas variables, destacando ligeramente el paradigma de prevención a través del deporte.

#### **4. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE PREVENCIÓN BASADOS EN AFD: UN DESAFÍO DEL FUTURO**

Es evidente que el consumo de drogas es un problema vigente en la sociedad y que su solución exige tomar buenas decisiones y planificar acciones organizadas en materia de prevención. El interés actual en los programas de prevención basados en AFD hace que los organismos responsables de financiarlos se enfrenten a un gran reto, no solo por la complejidad que supone identificar las variables que conforman un buen programa de intervención, sino por los riesgos que conlleva tomar una mala decisión y apoyar iniciativas que conlleven una pérdida de tiempo, de recursos económicos o que generen efectos adversos en sus participantes.

Evaluar programas de prevención basados en AFD no es una tarea que deba tomarse a la ligera. Seleccionar los mejores programas de entre los muchos posibles exige tener en cuenta multitud de criterios y preferencias. Esta situación debería alentar a los profesionales del ámbito a seguir investigando, preparando el camino hacia un futuro en el que estos programas sean una opción segura para mejorar la sociedad.

Por lo tanto, el problema de evaluar programas de prevención basados en AFD se trata de un problema de decisión multicriterio complejo, para cuya resolución proponemos el uso de la metodología de análisis de decisiones, cuyas características generales se describen en la próxima sección.

## 5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DECISIONES

El objetivo de la metodología del análisis de decisiones (AD) es estructurar y simplificar la tarea de tomar decisiones (Belton, 1990; Keeney y Raiffa, 1976). El AD se desarrolla partiendo del supuesto de que las alternativas analizadas (programas de intervención) resultarán atractivas para el experto en función de:

- Los valores que las alternativas proporcionan en los criterios de evaluación.
- Las preferencias de los decisores sobre los mismos.

Se identificará la información existente, datos recopilados, modelos y juicios profesionales para cuantificar los valores/impactos de las alternativas, mientras que se utilizará la teoría de la utilidad para cuantificar las preferencias de los decisores.

En definitiva, el AD proporciona procedimientos bien fundamentados para formalizar e integrar la experiencia, los juicios y las preferencias de los expertos en la evaluación de alternativas en problemas de decisión complejos.

La metodología del AD consta de los siguientes pasos:

- Estructurar el problema: construir una jerarquía de objetivos y establecer atributos que indiquen en qué medida se alcanzan los objetivos de nivel inferior.
- Identificar las alternativas a analizar (programas de intervención) y los valores que alcanzan en términos de los atributos identificados en el paso anterior.
- Cuantificar las preferencias de los decisores, lo que implica cuantificar las preferencias de los decisores sobre los posibles valores de las alternativas en los distintos atributos, así como identificar la importancia relativa de los mismos.
- Evaluar los programas de intervención mediante una función de utilidad aditiva multiatributo.
- Realizar análisis de sensibilidad para comprobar la robustez de los resultados e identificar los elementos que son más críticos en el proceso de evaluación.

En la próxima sección se describe cómo se ha estructurado el problema de evaluación de programas de prevención del consumo de drogas basados en AFD, mediante la construcción de una jerarquía de objetivos en la que se integran todos aquellos que sean relevantes para la evaluación. En la sección 4 se describe el proceso de cuantificación de las preferencias del decisor y la evaluación de los programas de prevención. Finalmente, en la sección 5 se presentan algunas conclusiones.

## 6. ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA PARA LA EVALUACIÓN DE PROGRAMAS DE PREVENCIÓN DEL CONSUMO DE DROGAS BASADOS EN AFD

El primer paso en el ciclo de AD es la estructuración del problema en una jerarquía de objetivos. Se trata de responder a la pregunta: ¿cuáles son las características y aspectos clave a considerar para diseñar un programa de prevención basado en AFD?

Para formular el problema y construir una jerarquía de objetivos se ha utilizado la evidencia científica en materia de prevención recopilada en forma de manuales por los organismos nacionales e internacionales de referencia. Además, se han consultado otras publicaciones científicas, como artículos y libros, especialmente en temas relacionados con la AFD aplicados a la prevención, un ámbito en el que la evidencia disponible sigue siendo limitada.

La jerarquía de objetivos consta de cuatro dimensiones: los espacios deportivos donde se va a desarrollar el programa, las características de la entidad solicitante, la propuesta técnica y la propuesta económica, véase la [figura 2.1](#). En las siguientes subsecciones, se describen detalladamente cada una de ellas y los distintos subobjetivos considerados en cada uno de ellos.

### 6.1. Espacios deportivos

Cualquier programa de prevención debe planificar los espacios e infraestructuras donde se va a desarrollar. Este aspecto adquiere mayor relevancia cuando el programa incluye AFD, pues condicionará la variedad de actividades que puedan realizarse y planteará nuevos desafíos en términos de gestión. Esta dimensión incluye cinco aspectos fundamentales: (a) cantidad de espacios y polivalencia, (b) titularidad en la gestión de los espacios, (c) fórmula administrativa en la gestión de los espacios y (d) la utilización de entornos naturales.

La *cantidad de instalaciones* utilizadas y su carácter *polivalente* permitirán mayor variedad de actividades, pudiendo adaptarse mejor a los gustos de los participantes y a las necesidades de los profesionales del programa.

La *titularidad de las instalaciones*, pública o privada, puede ser una preferencia clave para el organismo convocante y financiador. Además, el tipo de titularidad puede afectar a la oferta de actividades, a la coordinación entre servicios de la misma entidad o a la gestión de los espacios.

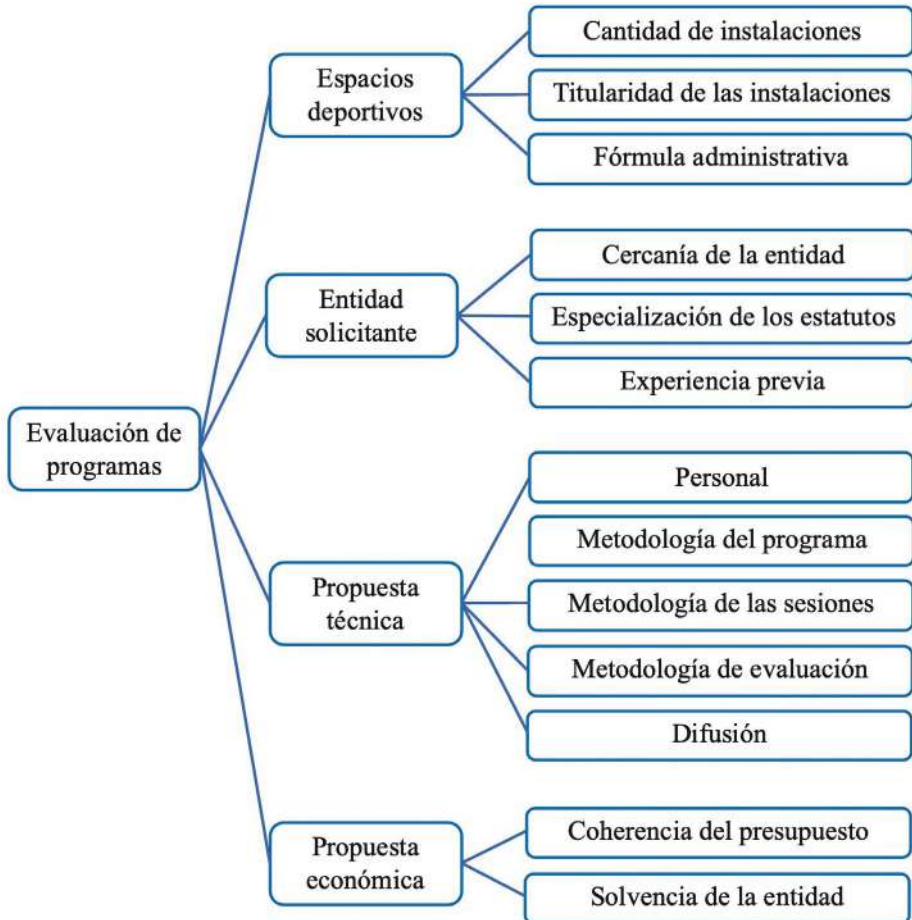


Figura 2.1. Estructuración del problema en una jerarquía de objetivos

Relacionado con el punto anterior, la *fórmula administrativa de gestión* determinará los procedimientos elegidos para llevar a cabo las labores de gestión de entre los tipificados por la legislación vigente. Las diferentes fórmulas de gestión: directa, indirecta, concesión, etc., determinarán la libertad para toma de decisiones respecto a la organización y uso de espacios.

Aunque es un tema relativamente reciente, la literatura disponible hasta el momento sugiere que el contacto con *entornos naturales* promueve la práctica de AFD y fomenta el desarrollo de actitudes saludables. Desde una perspectiva pedagógica los entornos naturales ofrecen un contexto óptimo para el desarrollo educativo. Por estos motivos, los espacios naturales son una oportunidad para el diseño de actividades o programas de prevención del consumo de drogas.

## 6.2. Características de la entidad solicitante

La entidad que propone el programa puede presentar características que influyan en el éxito de este. En este apartado se hablará de: (a) la cercanía de la entidad a la población diana (ámbito territorial y colaboraciones con entidades del barrio), (b) la especialización en los estatutos y (c) la experiencia previa de la entidad.

Cuando la entidad que implementa el programa se encuentra ubicada en el mismo barrio que la población destinataria puede beneficiarse de diversas ventajas. Una entidad que forma parte del tejido social del barrio generará mayor confianza en los participantes y sus familias, tendrá un mayor conocimiento sobre la población y la problemática e incluso ya llevará a cabo acciones coordinadas con otras entidades para abordar problemas sociales de la comunidad. Por ello, para evaluar la *cercanía de la entidad a la población diana* se comprobará el *ámbito territorial* en el que se ubica la entidad (dentro o fuera del barrio) y las *colaboraciones con otras entidades* locales del barrio que haya realizado en los últimos años: comercios y servicios locales, polideportivos, asociaciones de vecinos, policías de barrio, etc.

Por otro lado, se valorará positivamente que los *estatutos* de la organización indiquen que uno de los objetivos o fines de creación de la organización fue actuar frente al consumo de drogas. Es decir, que la entidad ha sido creada específicamente con ese propósito.

Por último, se tendrá en cuenta la *experiencia previa de la entidad* en la solución del problema. En primer lugar, se valorará la *experiencia realizando programas de prevención*: la cantidad de programas realizados, su duración, el tipo de convocatoria en la que se consiguieron y la financiación recibida. En segundo lugar, se preguntará por las *colaboraciones con otras entidades especializadas* en la problemática del consumo de drogas: cantidad y duración de las colaboraciones y titularidad de las entidades con las que se ha colaborado.

## 6.3. Propuesta técnica

La propuesta técnica recoge cuatro grandes subdimensiones: aspectos relacionados con el personal implicado en el desarrollo del programa, con la metodología del programa, la metodología de las sesiones de intervención y la metodología de la evaluación.

### 6.3.1. Personal

Los aspectos relacionados con el personal que se han incluido en este apartado han sido: (a) trabajadores implicados en el programa, (b) organigrama, (c), formación específica previa, (d) Plan de Igualdad, (e) Plan de Voluntariado y (f) asesoría externa de expertos.

La magnitud del proyecto determinará la cantidad de tareas y perfiles necesarios para poder implementarlo. Para evaluar la calidad de los *trabajadores implicados en el programa* se han clasificado los diferentes perfiles en tres grupos según su relevancia para el éxito del programa: imprescindibles, convenientes y complementarios. En la categoría de perfiles imprescindibles se incluyen los profesionales encargados del desarrollo de las sesiones, sin los cuales el programa no podría cumplir su función principal. Los perfiles en la categoría de convenientes trabajan en colaboración con los perfiles imprescindibles, apoyando o complementando su trabajo. Por último, en la categoría de perfiles complementarios se han incluido a otros profesionales que pueden encontrarse dentro de una entidad social o proyecto, pero cuya relevancia es menor a la de los anteriores.

Para evaluar a los miembros de los equipos de trabajo en cada uno de los perfiles se valorará la cantidad de trabajadores implicados, la calidad de su formación y de su experiencia (participación en proyectos en prevención del consumo de drogas).

Al igual que en una empresa, la entidad que implementa el programa deberá contar con un *organigrama* en el que se represente cada departamento y categoría profesional, sus funciones y vías de comunicación. Un organigrama deficiente puede dar lugar a falta de coordinación o solapamiento de tareas y funciones de cada perfil, afectando al desarrollo del programa.

Es responsabilidad de los promotores asegurar las competencias o los conocimientos necesarios para desarrollar el programa en sus trabajadores, por ello se tendrá en cuenta la realización de *formaciones o cursos específicos previos* a la implementación del programa.

Tanto las empresas como las organizaciones sociales deberán respetar la igualdad de trato y de oportunidades en el ámbito laboral, debiendo adoptar las medidas necesarias para evitar discriminaciones de cualquier tipo. Valorar el *Plan de Igualdad* permitirá conocer las medidas y objetivos propuestos para alcanzar esta igualdad y suprimir cualquier tipo de discriminación.

La entidad puede recurrir a personal externo para mejorar el desarrollo del programa. El *Plan de Voluntariado* permitirá cubrir ciertas necesidades del programa, implicando a la comunidad en la

solución del problema. La *asesoría externa de expertos* ayudará a resolver dudas puntuales, tomar decisiones críticas o revisar procesos clave.

### 6.3.2. Metodología del programa

La metodología del programa incluye los principales aspectos que conforman un programa: (a) la fundamentación, (b) el paradigma con el que se utiliza la AFD, (c) los objetivos y contenidos del programa, (d) la estructura del programa y (e) el marco normativo.

Un *programa fundamentado* es aquel que ha sido diseñado en base a la evidencia científica actual. En el ámbito de la prevención existen modelos y teorías que permiten comprender los factores biopsicosociales relacionados con el consumo, clarificar los mecanismos del cambio y elegir la estrategia de intervención más adecuada. Así mismo, desde el ámbito de la AFD también existen modelos pedagógicos o teorías enfocadas al cambio del comportamiento. La correcta fundamentación del programa evita diseñar programas basados en «buenas intenciones» o en la creencia subjetiva de los profesionales sobre lo que funciona y lo que no.

Como ya se ha mencionado previamente, no todas las formas de utilizar la AFD son igual de efectivas en prevención. Por esta razón, se tendrá en cuenta el *tipo de paradigma* utilizado: deporte preventivo (basados únicamente en la práctica de AFD), prevención combinada con deporte (la AFD se utiliza como complemento del programa de prevención a nivel práctico y/o educativo) y prevención a través del deporte (la AFD se modifica en base a fundamentos psicológicos para trabajar los contenidos de prevención).

Una de las primeras tareas al diseñar un programa es plantear los objetivos que se pretenden conseguir y, en base a estos, establecer unos contenidos que trabajar. Los *objetivos y contenidos* parten de un nivel general para concretarse en niveles cada vez más específicos. Su correcto planteamiento ayudará a orientar las acciones y la evaluación del programa hacia los resultados esperados y a definir las estrategias y técnicas necesarias. En la actualidad existe evidencia clara sobre los objetivos y contenidos que debe incluir un buen programa de prevención.

Los objetivos y contenidos planteados se trabajarán mediante un número determinado de sesiones. La duración total del programa, la cantidad de sesiones establecidas, su duración y la frecuencia

de implementación, son aspectos clave para evaluar la *estructura del programa*.

Finalmente, la metodología del programa incluye el *marco normativo* establecido: una estrategia que recoge las normas de comportamiento, obligaciones y las condiciones que deben cumplir los participantes durante el proceso. Este aspecto, aunque de carácter transversal, será fundamental para asegurar un adecuado desarrollo del programa.

### 6.3.3. Metodología de las sesiones de intervención

La metodología de las sesiones recoge los aspectos básicos relacionados con las sesiones del programa: (a) diseño de la sesión, (b) adaptación a las características de los participantes y (c) estrategias para fomentar la adherencia.

Como se ha mencionado, el diseño de un programa consta de un conjunto de sesiones a través de las cuales se trabajan los objetivos y contenidos propuestos. Para evaluar el *diseño de una sesión* se deben tener en cuenta varios elementos: los objetivos y contenidos planteados en las sesiones, la estructura de las sesiones y las técnicas para el cambio de comportamiento utilizadas. Los objetivos y contenidos trabajados en las sesiones deben coincidir con los planteados en el programa y abordarse de manera coherente y progresiva. Además, la sesión debe tener una estructura adecuada, comenzando con una parte inicial dedicada a despertar el interés de los participantes, una parte central donde se trabajarán los contenidos principales aplicando las técnicas correspondientes y un cierre donde se recojan las ideas más importantes.

Además, se valorará que el diseño de las sesiones tenga en cuenta la *edad, sexo, género, etnia de los participantes* y el *tipo de droga* sobre la que se pretende prevenir. El fenómeno del consumo de drogas puede ser muy variado dependiendo del tipo de droga consumida y de las características de la persona que las consume. Los aspectos mencionados influirán en la edad de inicio del consumo, el patrón de consumo, la forma de adquisición, las creencias y la percepción del riesgo, los efectos, etc. Tener en cuenta estas características será crucial para diseñar un programa que se ajuste a las necesidades de los participantes.

Las sesiones, además de estar bien diseñadas, deben ser motivantes y atractivas para los participantes, favoreciendo la adherencia al programa. La adherencia se refiere al proceso que garantiza que

todos los participantes permanezcan en la intervención hasta que esta haya terminado y/o se hayan alcanzado los objetivos. Algunas estrategias para mantener el interés de los participantes y *fomentar la adherencia* son: la variedad de la AFD, las actividades en entornos naturales, las actividades especiales y las actividades con entidades del barrio.

La *variedad de AFD* puede entenderse como la práctica de diferentes deportes, logrando satisfacer las preferencias de todos los participantes y evitando la monotonía y el abandono. Además, se favorecerá un carácter inclusivo, facilitando la participación al mayor número de personas independientemente de su habilidad. Para ello pueden incluirse deporte minoritarios, no tradicionales o deportes alternativos. En este contexto, merece una mención especial la *AFD realizada en entornos naturales*, por las razones ya expuestas en un apartado anterior.

Como complemento a las sesiones, se pueden planificar *actividades especiales* que rompan con la rutina, aportando novedad y motivando a los participantes a seguir con el programa; pueden ser de carácter puramente recreativo o incluir contenidos educativos. Aunque pueden realizarse en los espacios comúnmente utilizados, suelen implicar el desplazamiento a otras instalaciones.

Por último, el programa puede incluir *actividades que conecten a la población diana con las entidades del barrio o comunidad*. De este modo se contribuirá a generar oportunidades para la implicación prosocial y comunitaria, favoreciendo un sentimiento de integración social en los participantes y el reconocimiento por parte de la comunidad.

#### 6.3.4. Metodología de la evaluación

La evaluación es el proceso de recogida, análisis e interpretación de información relativa al funcionamiento del programa y de sus efectos, pero también de la población diana, su contexto y la problemática del consumo. En este apartado se han incluido los siguientes aspectos relacionados con la evaluación: (a) evaluación inicial, (b) evaluación centrada en resultados, (c) técnicas de medición, (d) evaluación de la satisfacción y (e) plan de seguimiento y control.

La *evaluación inicial o de las necesidades* se realiza antes de diseñar el programa y sirve para obtener información sobre la población diana, permitiendo diseñar un programa ajustado a las necesidades reales de los destinatarios.

La evaluación de los resultados se centra en el análisis de los efectos de la intervención, es decir, sirve para examinar si la intervención cumplió los objetivos previstos. Este complejo proceso requiere tener en cuenta varios aspectos: indicadores de resultados, instrumentos de medición, enfoque seleccionado (cualitativo o cuantitativo), temporalización, proceso de recogida de información y de procesamiento de los datos (análisis estadístico).

Los *instrumentos o técnicas de medición* utilizados para recoger información deben ser los adecuados para medir los indicadores previstos, además de cumplir con los criterios de objetividad, la fiabilidad y la validez.

*Evaluar la satisfacción* de los participantes, miembros del personal y entidades colaboradoras sobre el proyecto puede servir para conocer los puntos fuertes y débiles y establecer mejoras futuras a diferentes niveles.

El *plan de seguimiento y control* permite la monitorización de la implementación del programa, verificando que el plan original se cumple según lo previsto y tomando decisiones en consecuencia.

### 6.3.5. Difusión

En el apartado de difusión se han incluido aspectos como: (a) la captación de participantes, (b) la publicidad mediante tecnologías de la información y la comunicación y (c) la difusión social, especializada y científica de los resultados.

La *captación* se refiere al proceso de selección y reclutamiento de los individuos que participarán en el programa. Este paso puede presentar importantes desafíos, ya que el fracaso en la captación de participantes podría llevar a la cancelación del programa.

La entidad proponente puede utilizar la *publicidad mediante las tecnologías de la información y comunicación* (TIC) para dar a conocer el programa, generar confianza en la comunidad o despertar el interés en otras entidades, aumentando las posibilidades de colaboración.

Una vez finalizado el programa es el momento de comunicar los resultados y las conclusiones sobre el rendimiento del programa. Por un lado, se evaluará la *difusión de los resultados a la sociedad* (público general), con la intención de dar a conocer la labor realizada a la comunidad y entidades de interés. Por otro lado, los resultados se difundirán en *medios especializados* en la temática o medios del *ámbito científico*. De este modo, se contribuirá a la creación de

conocimiento, la mejora de futuras prácticas o la toma de decisiones a nivel político.

#### 6.4. Propuesta económica

Los dos aspectos que permitirán evaluar la propuesta económica serán, en primer lugar, la *coherencia del presupuesto* presentado. Dentro de una propuesta económica, la planificación eficiente de los recursos (costes) y capacidades de financiación (presupuesto disponible) ocupan un lugar de relevancia. El presupuesto total debe ser coherente con la estructura del programa permitiendo cumplir los objetivos planteados. Además, un presupuesto claro ayuda a monitorear el uso de recursos a lo largo de la implementación, ayudando a identificar desviaciones y tomar decisiones a tiempo. En definitiva, un presupuesto bien elaborado aumentará la confianza en la viabilidad financiera del programa.

En segundo lugar, se valorará la *solvencia de la entidad proponente*. Los proyectos deben diseñarse pensando en asegurar su sostenibilidad en el tiempo. Una alta solvencia por parte de la entidad proponente permitirá continuar con el programa una vez finalice la subvención o ayuda económica. El mayor indicador de solvencia son los fondos económicos con los que cuenta la entidad, aunque también pueden tenerse en cuenta otros indicadores como la cantidad de fuentes de financiación o el desarrollo de planes para recaudar financiación adicional.

### 7. CUANTIFICACIÓN DE LAS PREFERENCIAS DE LOS DECISORES Y EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE PREVENCIÓN

Una vez construida la jerarquía de objetivos, el siguiente paso en el ciclo del AD es la *identificación de atributos* en los objetivos del nivel más bajo de la misma para identificar el nivel en el que lo alcanzan las estrategias de prevención, para lo cual se puede utilizar una escala continua o discreta.

Por ejemplo, para evaluar la *fórmula administrativa de gestión de los espacios* (criterio perteneciente a *espacios deportivos*, véase la [figura 2.2](#)) se utiliza una *escala discreta nominal con los siguientes valores*: a) gestión directa, b) concesiones, c) gestión indirecta, d) gestión directa y concesiones (a+b), e) gestión directa y gestión indirecta (a+c), f) concesiones y gestión indirecta (b+c). Por otro lado,

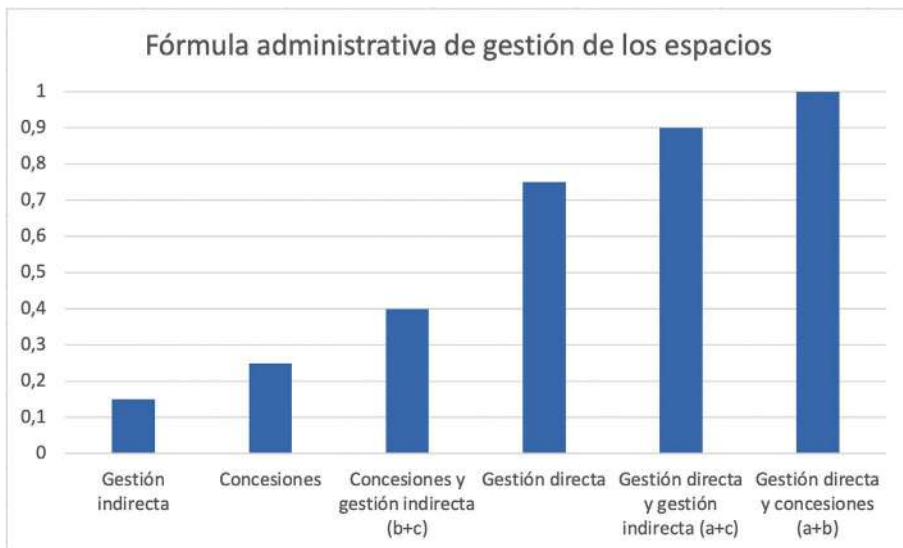


Figura 2.2. Fórmula administrativa de gestión de los espacios

para evaluar la *financiación recibida* (criterio que forma parte de la evaluación de *experiencia previa* de la entidad solicitante), se utiliza una escala continua entre 5000 y 50 000 euros.

A continuación, en el siguiente paso del AD se deben *identificar los programas de evaluación*, que serán aquellos que concurren en la convocatoria correspondiente, y se identificarán los valores que tienen en cada uno de los atributos de nuestra jerarquía de objetivos, valores que deberán ser proporcionados por la entidad solicitante.

Respecto a la *cuantificación de las preferencias de los decisores*. En primer lugar, se tienen que cuantificar las preferencias de los decisores sobre los posibles valores de los distintos atributos, para lo que se usa la *Teoría de la Utilidad* (von Neumann y Morgenstern, 1947). El decisor tendrá que construir para los atributos continuos una función de utilidad, que asigna a los distintos valores del atributo (rango de valores) un valor (utilidad) entre 0 y 1, donde el 0 representa el valor del atributo menos preferido y 1 el valor más preferido. Por ejemplo, en el atributo *financiación recibida* se ha establecido una función lineal creciente entre 5000 (valor menos preferido, con utilidad 0) y 50 000 (valor más preferido, con utilidad 1).

En el caso de que el atributo sea discreto, se proporcionará directamente un valor entre 0 y 1 para cada valor posible del atributo representando las preferencias del decisor. Por ejemplo, en el atributo

*fórmula administrativa de gestión de los espacios* las utilidades asignadas se muestran en la [figura 2.2](#).

Por otro lado, se deben calcular la *importancia relativa* (pesos) que tienen los objetivos en la jerarquía, en sus distintas ramas y niveles. Para ello, se pueden utilizar distintos métodos (Chergui y Jiménez-Martín, 2024) en los que se le pedirá al decisor que proporcione cierta información, como la asignación directa de los pesos (si el decisor lo tiene claro), o bien que simplemente ordene de más a menos importantes los objetivos bajo consideración (ordenación por importancia), pudiendo, además, proporcionar información adicional sobre la diferencia entre los elementos de la ordenación, como, por ejemplo, que el primero sea mucho más importante que el segundo, pero el segundo solamente un poco más importante que el tercero...

En la evaluación de los programas de intervención, distintos expertos que han participado en el proceso de modelización del problema han establecido, por ejemplo, que dentro de la *propuesta técnica*, el objetivo más importante sea el *personal*, seguido de la *metodología del programa* y de la *metodología de las sesiones de intervención* (ambas al mismo nivel) y estas, a su vez, seguidas de la *metodología de evaluación* y de la *difusión* (ambas al mismo nivel). Además, se considera que es mayor la diferencia que existe entre la importancia del *personal* y las *metodologías del programa* y de *las sesiones de intervención*, que la diferencia entre las *metodologías del programa* y de *las sesiones de intervención* y la *metodología de evaluación* y la *difusión*.

A continuación, se *evalúan los programas de intervención* mediante un modelo en utilidad multiratributo aditivo (Fisburn, 1967; Stewart, 1996), que adopta la siguiente forma:

$$u(P^i) = \sum_{j=1}^n w_j u_j(v_{ij}),$$

donde  $v_{ij}$  es el valor que tiene el programa de intervención  $P^i$  en el atributo  $j$ -ésimo  $u_j$  es la utilidad asociada al mismo valor, es decir, la preferencia que tiene el decisor sobre el mismo y  $w_j$  es el peso del atributo  $j$ -ésimo en la decisión.

A partir de estos valores de utilidad obtenidos para los distintos programas de intervención se pueden ordenar los mismos del más al menos preferido y se podrá tomar la decisión de a cuántos financiar en función del presupuesto disponible.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se afronta el problema de la evaluación de programas de intervención basados en la actividad física y el deporte para la prevención del consumo de drogas, un problema que continúa siendo un desafío en nuestra sociedad y que exige esfuerzos sostenidos y enfoques innovadores para desarrollar soluciones efectivas.

Se ha mostrado como la metodología de *análisis de decisiones* puede ayudar a estructurar el problema, en el que hay que considerar múltiples criterios asociados a los espacios deportivos donde se va a desarrollar el programa, las características de la entidad solicitante, la propuesta técnica y la propuesta económica; así como a mejorar la comprensión del mismo y facilitar su resolución mediante su descomposición en tareas sencillas, que incluyen la estructuración del problema, la identificación de los programas de intervención y los valores que proporcionan, la cuantificación de las preferencias de los decisores y la evaluación de los programas.

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2021-122209OB-C31 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y el proyecto PID2024-155179NB-C22 financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (España).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asensio-Hernández, M., Jiménez-Martín, P. J. y Jiménez-Martín, A. (2024): «Physical-sport activity interventions to prevent drug use: effectiveness according to the paradigm», *Substance Use and Misuse* (en revisión).
- Belton, V. (1990): «Multiple criteria decision analysis - Practically the only way to choose», en L. C. Hendry y R. W. Englese (eds.), *Operational research tutorial papers*. Birmingham: Operational Research Society, 53-101.
- Brotherhood, A. y Summall, H. (2011): *European drug prevention quality standards. A manual for prevention professionals*. Luxemburgo: European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction.
- Chergui, Z. y Jiménez-Martín, A. (2024): «On ordinal information-based weighting methods and comparison analyses», *Information*, 14, 527.
- Fishburn, P.C. (1967): «Additive utilities with finite sets: applications in the management sciences», *Natural Research Logistics Quarterly*, 14, 1-13.

- Keeney, R. L. y Raiffa, H. (1976): *Decision with multiple objectives: Preferences and value-tradeoffs*. Nueva York: Wiley.
- Klamert, L., Bedi, G., Craike, M., Kidd, S., Pascoe, M. y Parker, A. (2023): «Physical activity interventions for young people with increased risk of problematic substance use: A systematic review including different intervention formats», *Mental Health and Physical Activity*, 25, 1-10.
- McKiernan, A. (2016): *Youth sport programs that address substance use: an environmental scan*. Ottawa: Canadian Centre on Substance Abuse.
- Observatorio Español de las Drogas y las Adicciones (OEDA) (2022): *Alcohol, tabaco y drogas ilegales en España*. Plan Nacional sobre Drogas. Madrid: Ministerio de Sanidad.
- Observatorio Español de las Drogas y las Adicciones (OEDA) (2023): *Encuesta sobre uso de drogas en enseñanzas secundarias en España (ESTUDES): 1994-2023*. Plan Nacional sobre Drogas. Madrid: Ministerio de Sanidad.
- Observatorio Europeo de las Drogas y las Toxicomanías (OEDT) (2022): *Informe europeo sobre drogas 2022: tendencias y novedades*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito y la Organización Mundial de la Salud (ONUDD/OMS) (2018): *Normas internacionales sobre prevención del consumo de drogas (segunda edición)*. UNODC y OMS. Viena: United Nations Office on Drugs and Crime.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (ONUDD) (2023): *World drug report 2023*. Viena: United Nations Publication.
- Sanders, B. (2020): *Youth crime prevention through sport: Insights from the ONODC "line up live up" pilot programme*. Viena: United Nations Office on Drugs and Crime.
- Simonton, A., Young, C. y Johnson, K. (2018): «Physical activity interventions to decrease substance use in youth: a review of literature», *Substance Use & Misuse*, 53(12), 2052-2068.
- Stewart, T. J. (1996): «Robustness of additive value function method in MCDM», *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5, 301-309.
- Thompson, T., Horrell, J., Taylor, A., Wanner, A., Husk, K., Wei, Y., Creanor, S., Kandiyali, R., Neale, J., Sinclair, J. Nasser, M. y Wallace, G. (2020): «Physical activity and the prevention, reduction, and treatment of alcohol and other drug use across the lifespan (The PHASE review): A systematic review», *Mental Health and Physical Activity*, 19, 100360.
- Von Neumann, J. y Morgenstern, O. (1947): *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press.

# Diseño de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos que atiende a criterios sociales y a los principios de la economía circular

CARMEN GALÉ POLA  
*Universidad de Zaragoza*

AITOR HERNÁNDEZ GONZÁLEZ  
*Universidad de Zaragoza*

MIGUEL NAVARRO ESCOBAR  
*Universidad de Zaragoza*

## INTRODUCCIÓN

La Real Academia Española proporciona varias definiciones de la palabra «residuo». La más adecuada en el contexto de este trabajo es: «material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación». Son muchos los organismos públicos y privados que dan una definición en esta línea. Por ejemplo, la DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 (Parlamento Europeo, 2008), entiende por residuo «cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse». Con ambas definiciones quedan claros los aspectos que caracterizan a los residuos:

son desechos que se derivan de ciertas actividades productivas o de consumo y que han dejado de ser útiles para su propósito original. Sin embargo, una corriente cada vez más sólida defiende la necesidad de reaprovechar, en la medida de lo posible, estos residuos valorizados como nuevos recursos. Existen muchos tipos de residuos. En este trabajo nos centraremos en los residuos sólidos urbanos o *Municipal Solid Waste* (MSW) en inglés, que son aquellos residuos que se generan en hogares, comercios, instituciones y a partir de la actividad de los distintos servicios públicos (United Nations Environment Programme, 2024; World Bank Group, 2018). Normalmente, se suelen excluir de este tipo de residuos los generados en industrias o en construcción, los peligrosos o los derivados de actividades sanitarias.

Este trabajo se centra en la gestión de residuos, la cual se define, de manera amplia, como el proceso logístico que abarca las actividades de recogida, transporte, tratamiento y eliminación de los residuos, así como la posible valorización y reincorporación de estos al ciclo económico para su reaprovechamiento como recursos. La gestión de residuos es un componente clave para la transición desde un modelo de consumo lineal, basado en producir, usar y tirar, hacia un modelo de consumo cíclico más sostenible. Este concepto de economía circular está influenciado por el trabajo de Boulding (1966), que sostenía que para que la economía y el medio ambiente coexistan en equilibrio, la Tierra debe ser vista como un sistema cíclico cerrado. La popularización de este concepto en su forma contemporánea se debe a la fundación Ellen MacArthur con el apoyo de la consultora McKinsey, que fueron coautores de una serie de informes sobre el tema (EMF, 2013).

Durante la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) celebrada en septiembre de 2015 en la ciudad de Nueva York, los líderes mundiales adoptaron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos 17 objetivos engloban una serie de metas e indicadores que suponen, en palabras de la propia ONU, «un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad». Son varios los ODS que se relacionan con la gestión de residuos.

El ODS 11, «Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles» y en concreto su meta número 6, que dice: «De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y a la gestión de los desechos municipales y de otro tipo», ponen de manifiesto la importancia que

adquiere la gestión de residuos, en general, y de residuos municipales, en particular, como herramienta para disminuir el impacto que, individualmente y como sociedad, provocamos en el entorno que nos rodea. Asociada a la meta 11.6, el indicador 11.6.1, «Proporción de desechos sólidos urbanos recogidos periódicamente y con una descarga final adecuada respecto del total de desechos sólidos urbanos generados, desglosada por ciudad», permite evaluar el grado de cumplimiento de este objetivo en cada ciudad.

Por otro lado, el ODS 12, «Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles», y, en particular, las metas 12.4 y 12.5, hacen referencia a conseguir una gestión de residuos ecológicamente racional y, aún más importante, hacen referencia a la adopción de las bien conocidas 3R: reducir, reutilizar y reciclar. El indicador 12.5.1, «Tasa nacional de reciclado, en toneladas de material reciclado», permite evaluar cómo de bien (o de mal) están llevando a cabo la gestión de los residuos sólidos urbanos los diferentes países. Por ejemplo, en el caso de España, el Instituto Nacional de Estadística (INE) es el organismo encargado de realizar las *Estadísticas sobre recogida y tratamiento de residuos*. Según los datos del INE, se observa una tendencia general al alza en el porcentaje de residuos reciclados en España. En 2015, solo el 29,79% de los residuos se enviaban a plantas de reciclaje, mientras que el 57,76% terminaba en vertederos y el 12,45% se incineraba. En contraste, las últimas cifras publicadas correspondientes al año 2022 muestran que la tasa de reciclaje ha aumentado hasta el 42,92%, mientras que los residuos enviados a vertederos e incinerados han disminuido al 46,82% y 10,26%, respectivamente. Estos datos reflejan los avances realizados en España en relación con la gestión de residuos. Sin embargo, aún existe un amplio margen de mejora.

La creciente importancia que han adquirido la sostenibilidad y las políticas contra el cambio climático para la sociedad ha motivado que, en las últimas décadas, la comunidad científica se interese por los problemas relacionados con la gestión de residuos sólidos urbanos. A la hora de tomar decisiones, cada vez se tienen más en cuenta criterios no solo económicos, sino también sociales y medioambientales. Por tanto, la formulación de modelos matemáticos que contribuyan al diseño y optimización de sistemas de gestión de residuos y que, además, contemplen varios objetivos o criterios simultáneamente, resulta una herramienta muy útil para la toma de decisiones por parte de las instituciones responsables de la planificación de los procesos logísticos involucrados en la gestión de residuos. La utilidad de este tipo de modelos matemáticos queda reflejada en trabajos

como el de Minciardi *et al.* (2008), el de Santibañez-Aguilar *et al.* (2013) o en la reciente revisión realizada por Sandoval-Reyes *et al.* (2024), la cual incluye numerosas referencias sobre el tema en cuestión.

La contribución principal de este capítulo es presentar un modelo de optimización multiobjetivo para determinar la localización de centros de reciclaje y para planificar el flujo de los residuos desde las zonas donde se generan hasta los puntos donde, o bien se eliminan, o bien se reciclan para ser reintroducidos de nuevo al ciclo productivo en forma de material reciclado. La necesidad de atender a las preocupaciones expresadas por las instituciones públicas, las empresas y la ciudadanía, así como el interés por contemplar los principios de la economía circular, justifican la definición de múltiples objetivos para evaluar el desempeño del sistema de gestión. Concretamente, en este modelo se definen cinco objetivos: el beneficio económico del gestor, la cantidad de residuos enviados al vertedero, las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas a lo largo de todo el proceso de gestión, la satisfacción de los usuarios que adquieren el material reciclado y el bienestar social.

El resto del capítulo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2, se describe el modelo de optimización multiobjetivo formulado. En la sección 3, se presenta un caso de estudio en el que se diseñan varios sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos para la Comunidad Autónoma de Aragón a partir de la resolución del modelo matemático propuesto en la sección 2. Cada sistema de gestión diseñado deriva de la aplicación de una técnica propia del tratamiento de problemas de optimización matemática con múltiples objetivos. Finalmente, el capítulo concluye con una sección 4 de conclusiones.

## **1. UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

En muchas localidades de España, la ciudadanía tiene la posibilidad de clasificar los residuos utilizando cuatro contenedores específicos según el tipo de residuo: envases, papel y cartón, vidrio y restos orgánicos. Además, existe un quinto contenedor denominado de tipo mixto, que se utiliza para tirar residuos que, o bien no han sido clasificados, o bien no se corresponden con ninguno de los cuatro tipos anteriores. Cuando los residuos han sido clasificados por la ciudadanía, estos se transportan directamente desde la zona donde se han generado hasta el correspondiente centro de reciclaje. Por el

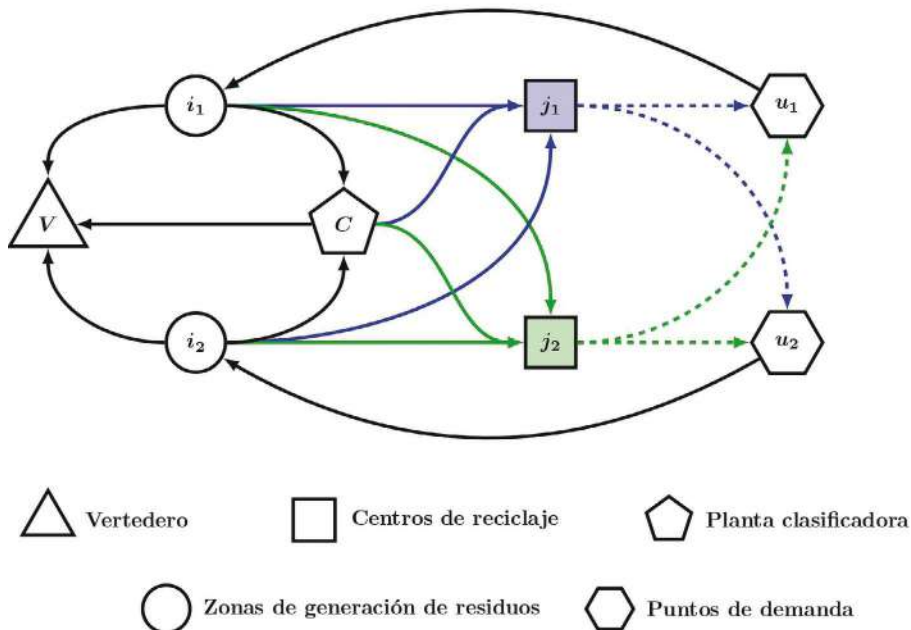


Figura 3.1: Diagrama de flujo de un sistema de gestión de residuos

contrario, los residuos que no han sido clasificados se envían o bien a una planta clasificadora para separar los que son reciclables, o bien directamente a los vertederos para su posterior incineración. Una vez los residuos reciclables han sido transformados en material reciclado, este se envía desde cada centro de reciclaje hasta los puntos de demanda. De esta manera, el material reciclado vuelve a introducirse en el ciclo económico en forma de recursos. Finalmente, el material reciclado adquirido por los usuarios que lo demandan volverá a ser desechado tras su uso en alguna de las zonas de generación de residuos.

En la [figura 3.1](#) se muestra en forma de grafo un esquema del proceso descrito anteriormente. Para facilitar su comprensión se ha simplificado, considerando únicamente dos tipos de residuos reciclables, dos zonas de generación de residuos, dos centros de reciclaje (uno para cada tipo de residuo reciclable), dos usuarios que demandan ambos tipos de material reciclado, un vertedero y una planta clasificadora. Los nodos del grafo representan los diferentes elementos del sistema. Los círculos son las dos zonas de generación de residuos, denotadas por  $i_1$  e  $i_2$ . Los cuadrados son los dos centros de reciclaje, denotados por  $j_1$  y  $j_2$  y diferenciados con dos colores, azul y

verde, uno para cada tipo de residuo reciclable. Los hexágonos son los puntos de demanda de material reciclado denotados por  $u_1$  y  $u_2$ . Finalmente, los pentágonos representan el vertedero, denotado por  $V$ , y la planta clasificadora, denotada por  $C$ . Por otro lado, los arcos del grafo representan las conexiones entre los diferentes elementos del sistema. En azul y verde se colorean los arcos por donde circulan los dos tipos de residuos reciclables (línea continua) o los dos tipos de material reciclado correspondiente (línea discontinua). En negro se colorean los arcos por donde circulan residuos sin clasificar.

En el sistema de gestión de residuos que se va a diseñar se asume que cada centro de reciclaje está dedicado a un único tipo de residuo y que tiene una capacidad máxima en cuanto a cantidad de residuos que puede tratar en el horizonte temporal de planificación. Se asume también que en cada localización potencial solo se puede abrir un centro de reciclaje para cada tipo de residuo y que las plantas de clasificación y los vertederos tienen capacidad suficiente para asimilar todos los residuos que reciben.

Para la formulación del modelo de optimización multiobjetivo es necesaria la definición de una serie de conjuntos: un conjunto  $I$  de zonas de generación de residuos, un conjunto  $K$  de tipos de residuos reciclables, un conjunto  $J$  de localizaciones potenciales para abrir centros de reciclaje, un conjunto  $C$  de plantas clasificadoras, un conjunto  $V$  de vertederos y, finalmente, un conjunto  $U$  de usuarios que adquieren el material reciclado.

El modelo propuesto no solo decide sobre el proceso logístico del flujo de residuos desde su generación hasta su eliminación o reintroducción en el ciclo económico, sino que también determina las localizaciones óptimas para abrir centros de reciclaje. Las variables de decisión del modelo relativas a la localización de centros de reciclaje son binarias: para cada localización  $j$  y cada tipo de residuo reciclable  $k$ , se define una variable binaria que toma valor 1 si en la localización  $j$  se abre un centro de reciclaje para residuos de tipo  $k$  y toma valor 0 en caso contrario. Las variables de decisión del modelo que hacen referencia al flujo de los residuos entre los diferentes elementos del sistema son continuas no negativas. Además, se definen algunas variables auxiliares: una variable entera que mide el número máximo de centros de reciclaje abiertos en una misma localización y una familia de variables continuas no negativas que miden la demanda no satisfecha de material reciclado.

Los valores que toman las variables de decisión han de verificar un conjunto de restricciones para ser solución factible del problema, esto es, para proporcionar un sistema de gestión de residuos viable.

Las restricciones del modelo se pueden clasificar en diferentes bloques de restricciones según su propósito:

- Un **primer bloque** de restricciones garantiza el correcto flujo de los residuos desde las zonas donde se generan hasta su primer destino, ya sea el vertedero, una planta clasificadora si son residuos no clasificados o un centro de reciclaje si son residuos previamente clasificados por la ciudadanía.
- Un **segundo bloque** de restricciones evita que se envíen residuos reciclables a una localización donde no se ha abierto un centro de reciclaje adecuado para ellos, y en caso de haber un centro de reciclaje apropiado, que la cantidad enviada no supere la capacidad del centro.
- Un **tercer bloque** de restricciones controla que la cantidad total de residuos reciclables enviados desde las plantas clasificadoras a los centros de reciclaje sea la correcta atendiendo a la cantidad de residuos sin clasificar recibidos en la planta y a unos parámetros que miden la proporción de residuos reciclables de cada tipo que se obtienen por unidad de residuo sin clasificar.
- Un **cuarto bloque** de restricciones garantiza que la cantidad de material reciclado obtenido en cada centro de reciclaje es la correcta atendiendo a la cantidad de residuos recibida en dicho centro y a un parámetro de pérdida de material en el proceso de reciclaje.
- Un **quinto bloque** de restricciones asegura que no se supere la cantidad de material reciclado demandada por los usuarios.

Además de las restricciones descritas anteriormente, se pueden incorporar otro tipo de restricciones que reflejen otras características del sistema de gestión de residuos. Por ejemplo, limitar el número de centros de reciclaje abiertos para cada tipo de residuo o establecer un límite en el presupuesto destinado a la apertura de centros de reciclaje.

Finalmente, se definen cinco funciones objetivo para el modelo, cada una con un acrónimo para hacer referencia a ellas de aquí en adelante:

- **Objetivo 1: Beneficio económico (eco):** La primera función objetivo mide el beneficio neto del gestor del sistema, calculado como la diferencia entre los ingresos generados por la venta del material reciclado y los costes asociados a las diferentes etapas de la gestión de residuos (transporte, clasificación, reciclaje o incineración).

- **Objetivo 2: Economía circular (ce):** La segunda función objetivo mide la cantidad de residuos enviados a los vertederos y que luego son incinerados. Esta función permite evaluar en qué medida el sistema de gestión de residuos cumple con los principios de la economía circular.
- **Objetivo 3: Aspectos medioambientales (CO<sub>2</sub>):** La tercera función objetivo mide la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera durante todo el proceso de gestión, incluyendo el transporte en sus distintas etapas y la incineración de los residuos.
- **Objetivo 4: Satisfacción de los usuarios (sat):** La cuarta función objetivo mide la demanda de material reciclado de los usuarios que no se satisface.
- **Objetivo 5: Bienestar social (soc):** La quinta función objetivo mide el número máximo de centros de reciclaje que se abren en una misma localización.

El problema de optimización consiste en determinar dónde se abren centros de reciclaje para cada tipo de residuos, y los flujos de residuos y material reciclado con el fin de maximizar el beneficio económico del gestor, minimizar la cantidad de residuos enviados a vertederos, minimizar la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera durante todo el proceso, minimizar la demanda de material reciclado no satisfecha y minimizar el número máximo de centros de reciclaje abiertos en una misma localización para promover una distribución equilibrada de los centros. El modelo formulado para resolver el problema es un modelo de optimización multiobjetivo lineal entero mixto y extiende varios de los modelos propuestos en la literatura al incorporar simultáneamente decisiones sobre la localización de los centros de reciclaje y múltiples objetivos.

## 2. CASO DE ESTUDIO EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN

La Comunidad Autónoma de Aragón cuenta con una geografía diversa y, en concreto, con una estructura demográfica muy característica. Por un lado, nos encontramos con zonas densamente pobladas. Según datos del Instituto Aragonés de Estadística (2022), alrededor del 50,74% de la población de Aragón vive en la ciudad de Zaragoza. Este porcentaje asciende hasta el 57,09% si se considera toda la Comarca Central, donde se ubica dicha ciudad. Por otro lado, nos encontramos con pequeños núcleos rurales dispersos y con escasa población. Como consecuencia de la variabilidad en el número de habitantes entre localidades, las necesidades de estas pueden ser

totalmente diferentes y un buen sistema de gestión de residuos sólidos urbanos debe considerar tanto las características propias de zonas densamente pobladas, en las que se produce una gran cantidad de residuos, como las de zonas poco pobladas, donde la producción de residuos es escasa. Por ello, la Comunidad Autónoma de Aragón constituye un caso de estudio de gran interés para analizar las soluciones obtenidas al resolver el modelo de optimización multiobjetivo propuesto en la sección 2. En el siguiente apartado se describen los datos utilizados en el planteamiento del problema de optimización. Aunque los datos son realistas, se han aplicado las simplificaciones necesarias para garantizar que el problema es tratable y, a la vez, ilustrativo.

## 2.1. Datos de entrada en el caso de estudio

La Comunidad Autónoma de Aragón se divide en 3 provincias: Huesca, Zaragoza y Teruel. A su vez, cada provincia se subdivide en comarcas, cada una con su capital: 10 en la provincia de Huesca, 13 en la de Zaragoza y 10 en la de Teruel. En esta división territorial se basan los parámetros del modelo de optimización relacionados con localizaciones geográficas:

- Se consideran como zonas de generación de residuos las 33 capitales de comarca.
- Estas 33 capitales, junto con otras 12 localizaciones intermedias entre dos o más capitales, son las localizaciones potenciales donde se pueden abrir centros de reciclaje.
- Se consideran los 8 vertederos existentes en la comunidad ubicados en: Zaragoza, Huesca, Teruel, Calatayud, Barbastro, Ejea de los Caballeros, Alcañiz y Fraga.
- Las plantas clasificadoras se sitúan en las tres capitales provinciales.
- Se consideran 15 usuarios demandantes de material reciclado, localizados en los 15 municipios más poblados de la comunidad: Zaragoza, Huesca, Teruel, Calatayud, Utebo, Monzón, Barbastro, Ejea de los Caballeros, Alcañiz, Fraga, Cuarte de Huerva, Jaca, Tarazona, Caspe y Binéfar.

En la [figura 3.2](#) se señalan sobre el mapa de Aragón las localizaciones potenciales donde abrir centros de reciclaje: las 33 capitales de comarca (en azul) junto con las 12 localizaciones intermedias (en rojo).

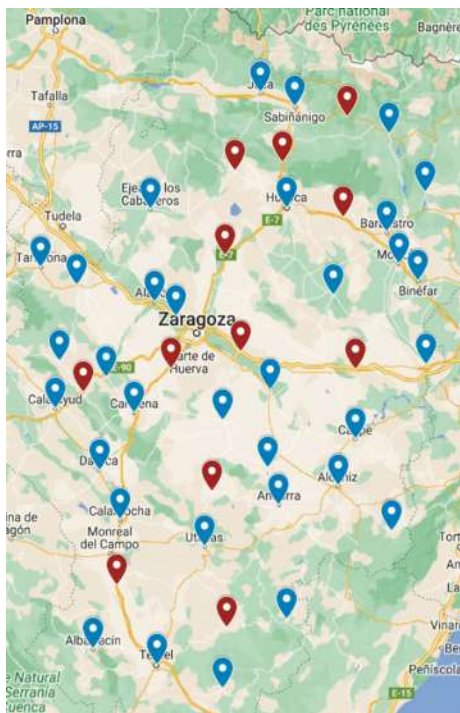


Figura 3.2. Localizaciones potenciales donde abrir centros de reciclaje. Elaborado con My Maps de Google®

El resto de los parámetros del modelo de optimización se basa en datos reales obtenidos de instituciones públicas o de trabajos publicados en la literatura:

- Se consideran cuatro tipos de residuos reciclables: vidrio, papel y cartón, envases, y restos orgánicos. En las zonas donde se generan, los ciudadanos disponen de cuatro contenedores para clasificarlos, además de un contenedor mixto donde depositar cualquier tipo de residuo, reciclable o no.
- El Instituto de Estadística de Aragón proporciona datos sobre el total de toneladas de cada tipo de residuo recogidas en el año 2022. Se asigna a cada zona de generación o capital de comarca una cantidad de residuos de cada tipo proporcional al número de habitantes de dicha comarca.
- Para el cálculo de las distancias entre las ubicaciones geográficas se utiliza Google Maps® junto con un *script* de Python que automatiza el proceso.
- Los costes de transporte por tonelada de cada tipo de residuo entre dos ubicaciones se calculan a partir de la distancia entre dichas ubicaciones y de los datos proporcionados por

el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible relativos al coste de transporte de mercancías por carretera.

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del transporte por tonelada de cada tipo de residuo entre dos ubicaciones se calculan a partir de la distancia entre dichas ubicaciones y de los datos proporcionados por la *European Environment Agency*.
- Finalmente, los parámetros restantes se han definido a partir de datos del Gobierno de Aragón y de los trabajos de Santibañez-Aguilar *et al.* (2013) y de Allevi *et al.* (2021).

El problema de optimización multiobjetivo para el caso de estudio incluye 10 840 variables, de las cuales 180 son variables binarias y 11 351 restricciones, sin contar las restricciones de signo para las variables de decisión.

## 2.2. Resolución del modelo y análisis de resultados

En problemas de optimización con múltiples objetivos, estos suelen estar en conflicto entre sí y, habitualmente, no es posible encontrar una solución óptima que alcance el mejor valor posible en todos los objetivos. En este contexto, se introduce el concepto de solución eficiente. Se dice que una solución es eficiente si no existe otra solución que mejore al menos un objetivo sin empeorar otro (Ehrgott, 2005).

Los métodos diseñados para resolver problemas de optimización multiobjetivo siguen, en general, dos enfoques principales: calcular el conjunto de soluciones eficientes o proponer una única solución que se ajuste a las necesidades del decisor. En el caso de estudio se utilizan cuatro técnicas diferentes para abordar el problema de optimización multiobjetivo propuesto: la aproximación lexicográfica, programación por metas, el método de las  $\epsilon$ -restricciones y el método de la suma ponderada (Ehrgott, 2005). Cada una de las técnicas aborda el modelo multiobjetivo mediante la resolución de uno o varios modelos con un solo objetivo. Para la resolución de los problemas de optimización se ha utilizado el software de optimización Gurobi junto con la API para Python.

Tres de las técnicas empleadas proporcionan una única solución, la información relativa a estas soluciones se incluye en la [tabla 3.1](#). En la primera fila se muestra la notación utilizada para identificar cada solución. **LEX-ECO** y **LEX-CE** son soluciones obtenidas con la aproximación lexicográfica, **META** es la solución dada por programación meta y finalmente,  **$\epsilon$ -RES**, obtenida por el método de las  $\epsilon$ -restricciones. La información incluida se refiere al valor de las cinco

funciones objetivo y el porcentaje de residuos reciclados. En los siguientes apartados se describe con detalle cómo se han obtenido estas soluciones. Con el método de la suma ponderada, calcularemos varias soluciones eficientes.

Tabla 3.1. Valores de las funciones objetivo y porcentaje de residuos reciclados en cada una de las soluciones

	LEX-ECO	LEX-CE	META	$\epsilon$ -RES
eco (miles €)	7 029,75	-55 383,82	-29 564,20	0,00
ce (kton)	512,27	0,00	132,15	430,77
CO <sub>2</sub> ( CO <sub>2</sub> )	898,38	114,94	307,87	770,88
sat (kton)	623,78	167,34	285,08	551,15
soc	3	1	2	1
Residuos reciclados (%)	14,63	100,00	77,98	28,21

### 2.2.1. Aproximación lexicográfica

Este método es especialmente útil cuando el decisor es capaz de establecer prioridades entre las funciones objetivo determinando un orden de preferencia entre ellas. Con esta aproximación, primero se optimiza la función objetivo de mayor preferencia, obteniendo el valor óptimo para dicha función objetivo. A continuación, de entre las soluciones que proporcionan ese valor óptimo para la primera función objetivo, se seleccionan aquellas que proporcionan el mejor valor para la segunda función objetivo más preferida. Así sucesivamente hasta que se han optimizado todas las funciones objetivo. Esta manera de optimizar las funciones objetivo, basada en un orden de preferencia, permite buscar en cada paso la mejor solución posible, sin empeorar los objetivos ya optimizados.

Esta aproximación tiene interés cuando el problema de optimización tiene muchas soluciones óptimas debido a sus características o a su estructura. Las cinco funciones objetivo definidas para nuestro modelo dan lugar a 120 posibles ordenaciones diferentes de las mismas, es decir el modelo se puede resolver de 120 maneras diferentes con la aproximación lexicográfica. Atendiendo a las características de los objetivos se han elegido dos de estas ordenaciones para resolver el modelo y comparar las soluciones obtenidas. La primera, que

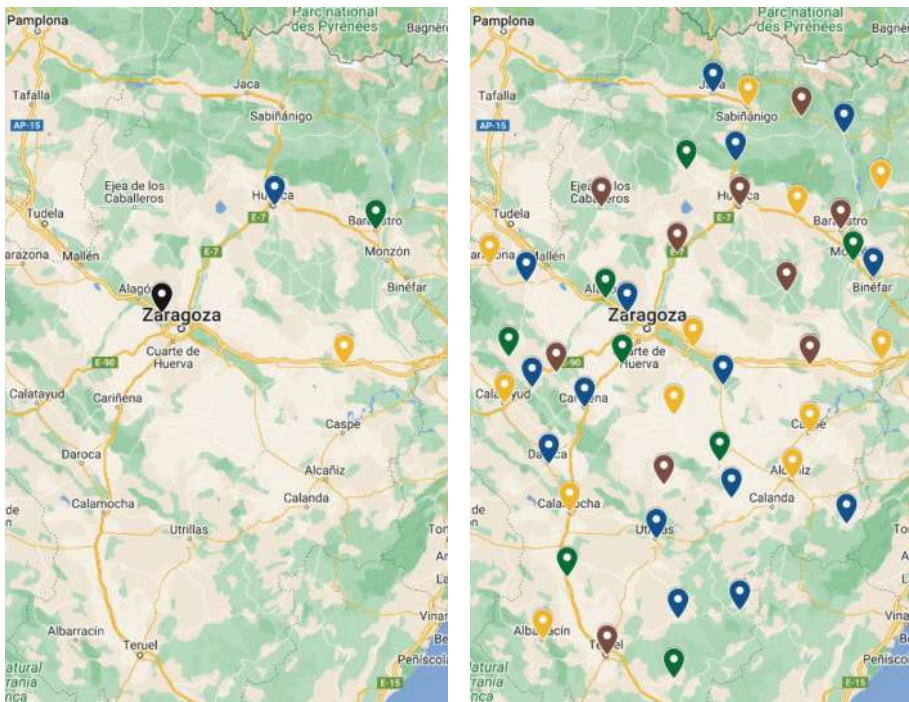


Figura 3.3. Localización de centros de reciclaje con código de color. Elaborado con My Maps de Google® a) Solución LEX-ECO b) Solución LEX-CE

denotaremos **LEX-ECO**, considera la siguiente ordenación de funciones objetivo, **eco-sat-ce-soc-CO<sub>2</sub>**. La segunda ordenación seleccionada **ce-soc-sat-CO<sub>2</sub>-eco**, prioriza los principios de la economía circular y la denotaremos por **LEX-CE**.

La solución **LEX-ECO** proporciona el mejor valor posible desde el punto de vista económico, beneficios de algo más de 7 millones de euros, y considera la satisfacción de los usuarios y la economía circular como segunda y tercera prioridad respectivamente. Los centros de reciclaje abiertos en esta solución se muestran en el mapa de la [figura 3.3\(a\)](#) con el siguiente código de color: papel (azul), vidrio (verde), envases (amarillo), orgánico (marrón), varios centros de reciclaje (negro). En Utebo, capital de la comarca que incluye la ciudad de Zaragoza, se abren centros de reciclaje para papel y cartón, vidrio y restos orgánicos; en Huesca se abre un centro de reciclaje para papel y cartón; en Barbastro uno para vidrio, y en una ubicación intermedia entre Fraga, Caspe y Sariñena, uno para envases. Como en esta ordenación de los objetivos el criterio económico está en primer lugar, la solución obtenida tiende a abrir pocos centros de reciclaje,

ya que esto supone una gran inversión por parte del gestor, en este caso, la Administración pública, y es mucho más barato emplear los vertederos existentes y la incineración para la eliminación de los residuos. Esto provoca que solo se reciclen un 14,63% de los residuos generados.

Por otro lado, la segunda solución, **LEX-CE**, prioriza la economía circular seguida del bienestar social y relega el beneficio económico al último lugar. Esta solución difiere mucho de la anterior, como ya se puede observar en el mapa de la [figura 3.3\(b\)](#). En esta solución se abren muchos centros de reciclaje con los que procesar tantos residuos como sea posible. Esto reduce drásticamente las emisiones generadas por la incineración. Además, como el bienestar social está en segundo lugar, la distribución de estos centros de reciclaje se hace de manera uniforme por todo el territorio de la comunidad. Esto también ayuda a reducir las emisiones correspondientes al transporte debido a que las distancias que recorren los residuos desde las zonas donde se generan hasta donde son procesados son menores. El total de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la solución **LEX-CE** es 114.94 kton frente a las casi 900 kton de la solución **LEX-ECO**. Por tanto, la solución **LEX-CE** es más sostenible: se recicla todo lo posible y se generan solamente un 12,79% de las emisiones generadas en la primera solución. Sin embargo, el gasto se dispara, provocando unas pérdidas de más de 55 millones de euros.

De la resolución de ambos modelos se obtienen conclusiones de gran interés, que ayudan a comprender el comportamiento del sistema de gestión de residuos y confirman lo esperado. En primer lugar, se observa que, si el objetivo principal del modelo es el beneficio económico, no es rentable clasificar los residuos que se han depositado en el contenedor mixto y únicamente se reciclan los residuos clasificados previamente por los ciudadanos. Y, en segundo lugar, priorizar la sostenibilidad y el bienestar social requiere de una gran inversión por parte de las administraciones públicas.

### 2.2.2. Programación por metas

Este método aborda el problema multiobjetivo mediante la definición de metas específicas o niveles deseados para cada función objetivo establecidos por el decisor. Posteriormente, se resuelve un problema de optimización que minimiza la suma de las desviaciones a las metas. Este enfoque busca soluciones que equilibren

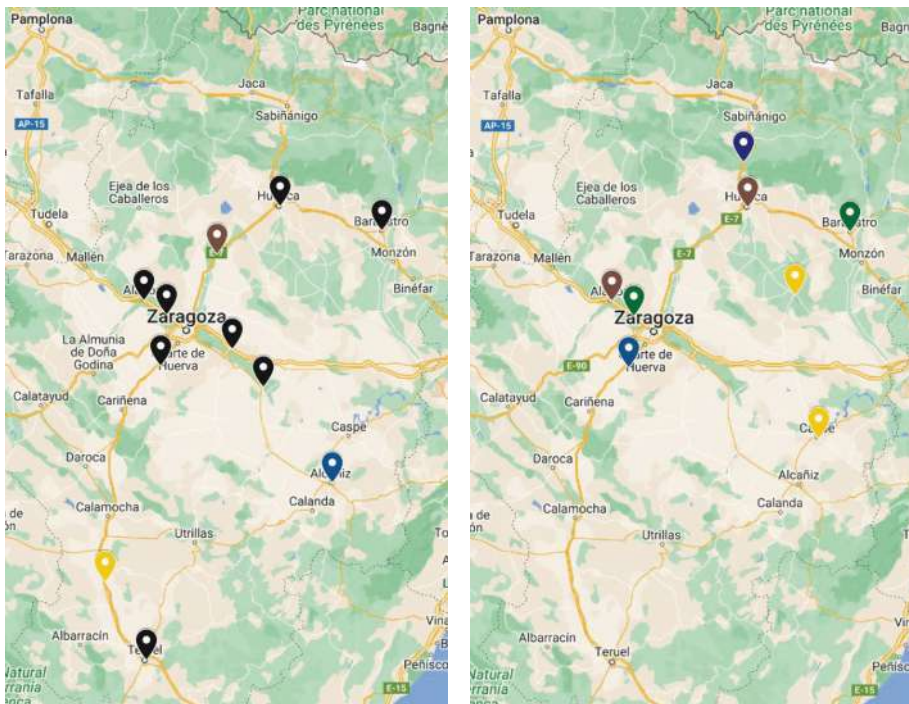


Figura 3.4. Localización de centros de reciclaje con código de color. Elaborado con My Maps de Google® a) Solución META b) Solución  $\epsilon$ -RES

la consecución de los valores deseados para todos los objetivos de forma simultánea, logrando un balance razonable entre ellos.

Resolver el modelo del caso de estudio con la aproximación lexicográfica y diferentes ordenaciones de las funciones objetivo proporciona información valiosa sobre el rango de valores en el que se mueven estas funciones, así como sus valores óptimos. Esta información es muy útil para establecer metas realistas y coherentes con el contexto del problema que se está resolviendo. En el caso de estudio, se ha definido como meta para la función objetivo **eco** el valor máximo obtenido del beneficio, dado por la solución **LEX-ECO**, 7029,75 miles de euros. Para las funciones objetivo **ce**, **sat** y **soc** se han definido como metas, 0 kton, 167,34 kton y 1, respectivamente, que coinciden con los valores óptimos, dados por la solución **LEX-CE**. En el caso de las emisiones, se ha calculado el valor óptimo de la función objetivo **CO<sub>2</sub>**, 49,56 kton, para establecer la meta.

La solución **META** (véase la tabla 3.1) es una solución más sostenible que la solución **LEX-ECO**: se reciclan el 77,98% del total de residuos generados frente a un 14,63% y las emisiones generadas son

solo un 34,27% de las generadas en la solución **LEX-ECO**. Por otro lado, la solución **META** es menos costosa que la solución **LEX-CE**: las pérdidas económicas se reducen a 29 millones de euros, en comparación con los 55 millones de euros de **LEX-CE**. En cuanto a los centros de reciclaje abiertos (figura 3.4(a)), se construyen como máximo dos centros en las ubicaciones seleccionadas. Cabe destacar la concentración de centros de reciclaje en los alrededores de la ciudad de Zaragoza, que coinciden con las zonas más pobladas.

### 2.2.3. Método de las $\epsilon$ -restricciones

Este método permite al decisor imponer restricciones sobre los valores que considera innegociables en cada uno de los objetivos. Esta técnica consiste en resolver el modelo utilizando una de las funciones objetivo, mientras que las demás se incluyen en el conjunto de restricciones. Para cada función objetivo  $f$ , se establece un valor  $\epsilon$ , de manera que, si la función objetivo se maximiza, la restricción correspondiente es:  $f \geq \epsilon$ , y si se minimiza, la restricción es  $f \leq \epsilon$ .

En el caso de estudio, asumimos que para el gobierno o institución encargado de la gestión de los residuos es importante conocer qué cantidad de residuos pueden llegar a ser reciclados mientras no se incurre en pérdidas económicas y se garantiza el bienestar social construyendo como máximo una planta en cada ubicación. Por tanto, para resolver el modelo con esta técnica, se ha elegido como función objetivo **ce** e incluido una restricción para garantizar que **eco** es mayor o igual que 0 y que **soc** es menor o igual que 1. Las restricciones correspondientes a **CO<sub>2</sub>** y **sat** imponen cotas superiores sobre estos objetivos: 850 kton y 600 kton, respectivamente.

Sin incurrir en pérdidas económicas, en la solución  $\epsilon$ -RES se recicla el 28,21% de los residuos generados y se consiguen disminuir un 14,20% las emisiones de CO<sub>2</sub> comparando con la solución **LEX-ECO**. Los centros de reciclaje abiertos (figura 3.4(b)) son pocos: uno en seis capitales comarcales y uno en dos ubicaciones intermedias, ninguna de ellas en la provincia de Teruel debido a su baja producción de residuos.

### 2.2.4. Método de la suma ponderada

La última técnica utilizada para abordar el modelo multiobjetivo es el método de la suma ponderada. Este método consiste en definir una única función objetivo igual a la suma ponderada de todas las

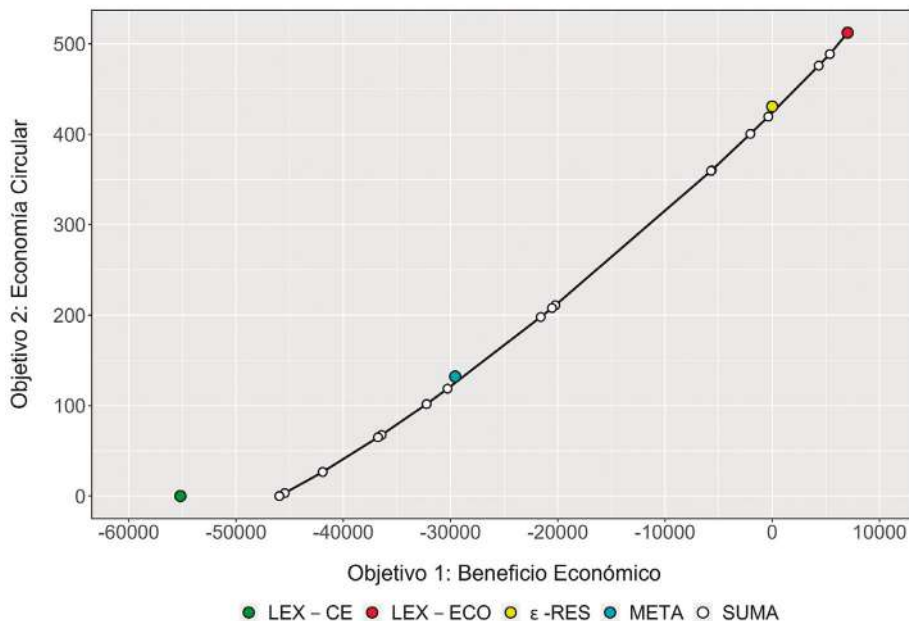


Figura 3.5. Representación de las soluciones en el espacio de las funciones objetivo eco y ce

funciones objetivo. Al resolver el modelo con diferentes valores para los pesos se obtiene un conjunto de soluciones eficientes.

A modo ilustrativo y para facilitar la representación gráfica, se han elegido dos de los cinco objetivos: **eco** y **ce**, debido a la alta conflictividad entre ellos. El modelo se ha resuelto con 40 combinaciones diferentes de los pesos, muchas de las cuales proporcionan la misma solución. Los resultados se representan gráficamente en la [figura 3.5](#). En el eje horizontal se encuentra el valor de **eco** y, en el eje vertical, el valor de **ce**. Las soluciones obtenidas con el método de la suma ponderada se representan con puntos blancos conectados con una línea negra. De izquierda a derecha en el gráfico, el peso del objetivo **eco** va desde 0,3 a 0,7 y el correspondiente peso del objetivo **ce** de 0,7 a 0,3. Se observa cómo la disminución de las pérdidas económicas lleva consigo un aumento de la cantidad de residuos que son enviados a vertedero.

A diferencia de las soluciones obtenidas con el método de la suma ponderada, las soluciones obtenidas en los apartados anteriores atienden a los cinco objetivos. En cualquier caso, en la [figura 3.5](#) se han representado las soluciones **LEX-ECO**, en rojo, **LEX-CE**, en verde, **META**, en azul y  $\epsilon$ -RES, en amarillo, para mostrar qué posición

ocupan en el espacio de las funciones **eco** y **ce**. Como cabía esperar, la solución **LEX-CE** aparece abajo a la izquierda y la **LEX-ECO** arriba a la derecha. Por el contrario, las soluciones **META** y **ε-RES** aparecen como soluciones intermedias.

## CONCLUSIONES

La experiencia computacional desarrollada en este trabajo pone de manifiesto la complejidad intrínseca del diseño de un buen sistema de gestión de residuos sólidos urbanos, especialmente al abordar de manera simultánea objetivos económicos, medioambientales y sociales. El caso de estudio desarrollado en la comunidad autónoma de Aragón pone en evidencia cómo la cantidad de residuos no clasificados impacta directamente en las decisiones logísticas, forzando a elegir entre asumir grandes pérdidas económicas para clasificar los residuos para su posterior reciclaje o aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> al utilizar la incineración para su eliminación. Este dilema muestra la necesidad de reforzar las campañas de concienciación ciudadana sobre la importancia de separar adecuadamente los residuos en los hogares, un hábito que no solo beneficia al medioambiente, sino que también puede reducir significativamente los costes asociados a su gestión. Así, se pone de manifiesto el papel central que juega la ciudadanía en la transición hacia sistemas de gestión más eficientes y sostenibles.

El modelo de optimización multiobjetivo propuesto en este trabajo ha demostrado ser una herramienta valiosa para diseñar sistemas de gestión que equilibren criterios conflictivos. Las diferentes técnicas matemáticas empleadas para resolver el modelo han permitido explorar soluciones diversas, desde aquellas orientadas al beneficio económico hasta otras más comprometidas con la sostenibilidad y el bienestar social. Este enfoque integrado permite a las administraciones públicas ser conscientes del impacto de sus acciones y así tomar decisiones fundamentadas que optimicen los recursos disponibles. Además, los resultados obtenidos resaltan la necesidad de avanzar hacia modelos de gestión que fomenten los principios de la economía circular. En este sentido, priorizar la reutilización y el reciclaje de materiales no solo reduce el impacto ambiental, sino que también contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente los relacionados con ciudades sostenibles y la producción y consumo responsables.

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha contado con el apoyo financiero de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos TED2021-130961B-I00 y PID2022-139543OB-C43, así como del Gobierno de Aragón a través del proyecto E41-23R.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allevi, E., Gnudi, A., Konnov, I. V., y Oggioni, G. (2021): «Municipal solid waste management in circular economy: A sequential optimization model», *Energy Economics*, 100, 105383.
- Boulding, K. E. (1966): «The economics of the coming spaceship earth», en H. Jarret (ed.), *Environmental quality in a growing economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 3-14.
- Ehrgott, M. (2005): *Multicriteria optimization* (2.ª ed.). Heidelberg: Springer Berlin.
- Ellen MacArthur Foundation (EMF) (2013): *Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation.
- Minciardi, R., Paolucci, M., Robba, M. y Sacile, R. (2008): «Multi-objective optimization of solid waste flows: Environmentally sustainable strategies for municipalities», *Waste Management*, 28(11), 2202-2212.
- Parlamento Europeo (2008): *DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*.
- Sandoval-Reyes, M., He, R., Semeano, R. y Ferrão, P. (2024): «Mathematical optimization of waste management systems: Methodological review and perspectives for application», *Waste Management*, 174, 630-645.
- Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., Betzabe González-Campos, J., Serna-González, M. y El-Halwagi, M. M. (2013): «Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste», *Waste Management*, 33(12), 2607-2622.
- United Nations Environment Programme (2024): *Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource*.
- World Bank Group (2018): What a Waste 2.0. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>



# La decisión multicriterio al servicio del desarrollo sostenible

GABRIELA M. FERNÁNDEZ BARBERIS  
*Universidad San Pablo CEU*

MARÍA DEL CARMEN ESCRIBANO RÓDENAS  
*Universidad San Pablo CEU*

MARÍA DEL CARMEN GARCÍA CENTENO  
*Universidad San Pablo CEU*

## INTRODUCCIÓN

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aprobados por los Estados miembros de las Naciones Unidas el 25 de septiembre de 2015, considerados demasiado ambiciosos, abarcan esencialmente tres dimensiones: desarrollo económico, inclusión social y sostenibilidad ambiental. Tienen como pilar básico el principio de buena gobernanza.

Desde la publicación del primer Informe Global en el año 2016 se estudiaron sucesivamente y hasta la actualidad, los ODS contenidos en la Agenda 2030. Se han elaborado modelos multicriterio complementados con modelos multilogit para abordar distintos ODS, así como también diferentes ámbitos territoriales de aplicación. El objetivo de esta trayectoria de análisis, modelos y estudios es conocer cuál es el grado de cumplimiento de las metas establecidas hace ya diez años, tener una imagen global a nivel mundial de la situación

de cada país o de cada continente en la actualidad y predecir si se alcanzarán los niveles óptimos que se pretenden.

## 1. METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

En todos los trabajos de investigación realizados y que se detallan en el apartado siguiente, la metodología aplicada ha sido siempre la misma. En primer lugar, se ha elegido uno o varios ODS para su estudio concreto, así como un grupo de países para el análisis. En segundo lugar, se ha realizado un ordenamiento de los países en estudio para evaluar el estado de progreso en el cumplimiento de la Agenda 2030, con la Metodología PROMETHEE y el programa informático Visual PROMETHEE. Se ha analizado la robustez de los modelos, que en todos los casos han resultado perfectamente robustos, garantizando la estabilidad de los resultados obtenidos y su fiabilidad para la adopción de decisiones futuras.

En tercer lugar, se ha aplicado un análisis econométrico utilizando modelos multilogit, ya que la variable dependiente es categórica. De esta forma, se ha podido determinar cuáles son las variables estadísticamente significativas sobre las que se podría incidir para mejorar el nivel de cumplimiento de las distintas metas.

## 2. UN RECORRIDO POR LA AGENDA 2030 Y LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

### 2.1. Los ODS en la OCDE

En el año 2017 se desarrolló nuestro primer trabajo centrado en los países que integran la OCDE (en ese año eran 34), tomando como punto de partida los datos publicados en el Informe Global del año 2016 (Sachs *et al.*, 2016). El objetivo del trabajo consistió en realizar un ordenamiento de los países de la OCDE para evaluar el estado de progreso en la consecución de los ODS en el horizonte 2030, comparando el ordenamiento obtenido aplicando la metodología de referencia y el que publica con carácter preliminar el citado informe.

Los criterios de decisión considerados fueron los 17 objetivos principales con sus subdivisiones, alcanzando a un total de 79 subobjetivos. Este grado de desagregación permitió analizar detalladamente los puntos fuertes y débiles de cada uno de los países (alternativas

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Suecia	0,2429	0,2882	0,0454
2	Noruega	0,1998	0,2616	0,0618
3	Finlandia	0,1890	0,2662	0,0772
4	Dinamarca	0,1781	0,2570	0,0789
5	Islandia	0,1746	0,2492	0,0747
6	Suiza	0,1481	0,2226	0,0745
7	Alemania	0,1409	0,2080	0,0671
8	Países Bajos	0,1113	0,2019	0,0906
9	Canadá	0,0871	0,1964	0,1094
10	Japón	0,0848	0,2295	0,1447
11	Austria	0,0805	0,1739	0,0933
12	Bélgica	0,0751	0,1740	0,0989
13	Reino Unido	0,0610	0,1744	0,1134
14	Francia	0,0599	0,1626	0,1027
15	Australia	0,0567	0,1851	0,1284
16	Eslovenia	0,0511	0,1682	0,1171
17	Luxemburgo	0,0507	0,1675	0,1168
18	Nueva Zelanda	0,0771	0,1737	0,1407
19	Rep. Checa	0,0335	0,1512	0,1176
20	Irlanda	0,0153	0,1802	0,1649
21	Corea	-0,0178	0,2036	0,2214
22	Israel	-0,0256	0,1442	0,1698
23	Estonia	-0,0295	0,1505	0,1800
24	Estados Unidos	-0,0313	0,1656	0,1969
25	España	-0,0551	0,1332	0,1883
26	Portugal	-0,1059	0,1213	0,2272
27	Rep. Eslovaca	-0,1060	0,1130	0,2190
28	Italia	-0,1309	0,1082	0,2390
29	Polonia	-0,1435	0,1133	0,2568
30	Hungría	-0,1524	0,0955	0,2479
31	Grecia	-0,1595	0,0993	0,2588
32	Chile	-0,2583	0,0775	0,3358
33	Turquía	-0,4090	0,0462	0,4552
34	México	-0,4627	0,0667	0,5293

Figura 4.1. Ordenamiento de los países (flujos positivos, negativos y netos)

del modelo) y, por lo tanto, proponer estrategias más apropiadas para llegar al horizonte 2030 en la mejor situación posible.

Al analizar los resultados obtenidos, se observó una gran similitud entre el análisis multicriterio realizado y la clasificación que aparece en el Informe Global, utilizando el Índice Ampliado de los ODS. Se complementó el estudio analizando detalladamente las diferencias más notorias detectadas entre ambas clasificaciones (PROMETHEE vs Informe Global).

En la [figura 4.1](#) se observa el ordenamiento de los países obtenido con la metodología PROMETHEE. Los resultados evidencian que son los países nórdicos los que encabezan los primeros puestos del *ranking*.

## 2.2. ODS 12, 13, 14 y 15 en la OCDE

En el año 2018 se abordó el estudio de los países de la OCDE (35, uno más por la incorporación de Letonia) en cuatro de los 17 ODS principales, que son aquellos que requieren mayor atención y se encuentran más lejos de alcanzar los niveles deseables de cara al año 2030 (ODS 12: Producción y consumo responsable; ODS 13: Acción por el clima; ODS 14: Vida submarina; ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres). Estos cuatro objetivos (criterios en el análisis multicriterio desarrollado) son los que, en su desagregación, han sufrido más cambios, ya sea por incorporación de nuevos conceptos o por reformulación y mejora de su forma de medición.

Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Letonia	0,1598	0,2780	0,1182
2	República Checa	0,1396	0,2361	0,0966
3	Eslovenia	0,1390	0,2563	0,1173
4	Suecia	0,1122	0,2278	0,1157
5	Estonia	0,0937	0,2597	0,1660
6	Hungría	0,0936	0,2033	0,1097
7	Alemania	0,0788	0,2013	0,1224
8	Polonia	0,0773	0,2497	0,1725
9	Chile	0,0742	0,2597	0,1854
10	México	0,0741	0,2472	0,1731
11	Francia	0,0677	0,1972	0,1295
12	Italia	0,0528	0,1858	0,1330
13	República Eslovaca	0,0520	0,1928	0,1408
14	Corea, Rep.Dem.	0,0463	0,2183	0,1720
15	Finlandia	0,0405	0,2121	0,1716
16	Países Bajos	0,0168	0,2227	0,2059
17	Dinamarca	0,0161	0,2205	0,2044
18	Austria	0,0084	0,1439	0,1354
19	Noruega	0,0081	0,2274	0,2193
20	Japón	0,0051	0,1771	0,1720
21	Bélgica	0,0000	0,2022	0,2022
22	Reino Unido	-0,0019	0,1668	0,1687
23	Suiza	-0,0076	0,1635	0,1711
24	Turquía	-0,0116	0,2148	0,2264
25	Grecia	-0,0196	0,1711	0,1907
26	España	-0,0533	0,1424	0,1957
27	Portugal	-0,0708	0,1310	0,2018
28	Irlanda	-0,0746	0,1573	0,2319
29	Nueva Zelanda	-0,1200	0,1588	0,2788
30	Israel	-0,1286	0,1117	0,2403
31	Australia	-0,1293	0,1875	0,3168
32	Islandia	-0,1375	0,1275	0,2649
33	Canadá	-0,1681	0,1436	0,3117
34	Luxemburgo	-0,1705	0,1318	0,3023
35	Estados Unidos	-0,2632	0,0649	0,3281

Figura 4.2. Ordenamiento completo (flujos positivos, negativos y netos)

Se han propuesto cinco conclusiones principales a partir del Informe de los índices de ODS en el año de estudio (Lafortune *et al.*, 2018):

1. Cada país se enfrenta a grandes desafíos para alcanzar los ODS.
2. Los países pobres necesitan ayuda para alcanzar los ODS.
3. La agenda universal de los ODS contiene importantes efectos indirectos o colaterales (*spillover effects*).
4. Los países deberían compararse convenientemente con el resto de los países del grupo de referencia al que pertenecen según la ONU, así como respecto de los umbrales de los objetivos.
5. Los países y las agencias internacionales deben hacer inversiones sustanciales en capacidad estadística para monitorizar los ODS.

Las conclusiones que se obtuvieron de los estudios y análisis realizados en el año de referencia pusieron de manifiesto que la situación de los países de la OCDE respecto al grado de cumplimiento de los ODS 12, 13, 14 y 15, en el horizonte 2030, era realmente dramática, una situación verdaderamente desoladora. En la [figura 4.2](#) se observa el ordenamiento completo (*ranking* total) de los países objeto de estudio considerando los ODS descritos precedentemente.

El ordenamiento obtenido guarda similitud al publicado en el Informe Global de la ONU, aunque las diferencias fueron detalladamente explicadas y justificadas en el trabajo publicado. Los resultados del modelo multilogit reflejaron un panorama bastante lúgubre

respecto al grado de cumplimiento de los ODS en el horizonte 2030. Ninguna de las variables utilizadas demostró ser estadísticamente significativa, aunque se establecieron algunos matices en relación con las variables que podrían influir positivamente en los demás objetivos, aunque no de forma sustancial. Somos conscientes que son muchos los gobiernos realmente implicados en este reto, pero deben generarse acciones que den vida significativa y tangible a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

### 2.3. Salud y Pobreza. ODS 1, 2, 3, 4 y 10 en la OCDE

En el año 2019 se decidió estudiar aquellos ODS directamente relacionados con la salud y la pobreza. Tales objetivos son: ODS 1: poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo; ODS 2: poner fin al hambre y lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible; ODS 3: garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades; ODS 4: garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos; ODS 10: reducir la desigualdad en los países y entre ellos (Sachs *et al.*, 2019).

El ámbito de aplicación fue el de los países de la OCDE. La razón que justifica la elección radica en que, precisamente, son aquellos objetivos en los que se han incluido métricas adicionales para «no dejar a nadie atrás» y reducir el impacto de los efectos indirectos (*spillover effects*).

El modelo multicriterio propuesto contiene 31 criterios (los ODS desagregados) y 36 alternativas (los países de la OCDE). En el modelo multilogit se utilizaron como variables relevantes: GDP (producto interior bruto de cada uno de los países de la OCDE del año 2017); HDI (índice de desarrollo humano de cada país en el año 2017); IP (índice de pobreza); ID (índice de desnutrición); IMI (índice de mortalidad infantil); IMM (índice de mortalidad maternal); AME (número medio de años de escolarización); PNA (porcentaje de adultos analfabetos en cada uno de los países). La [figura 4.3](#) presenta el ordenamiento completo obtenido de los países de la OCDE.

Los resultados de modelos realizados y estudiados no son nada alentadores. Queda tan solo la esperanza que todos los países se tomen más en serio el compromiso contraído en la Agenda 2030, ya que, lamentablemente, no hay ningún estudio realizado que ponga un atisbo de esperanza en su consecución. A pocos años de la meta establecida, queda todavía mucho camino por recorrer.

Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Finlandia	0,3450	0,4900	0,1450
2	Noruega	0,3446	0,4772	0,1326
3	Islandia	0,3169	0,4655	0,1485
4	Suecia	0,2725	0,4334	0,1609
5	Dinamarca	0,2693	0,4524	0,1831
6	Japón	0,2376	0,4670	0,2294
7	Países Bajos	0,2221	0,4077	0,1856
8	Suiza	0,2048	0,4124	0,2076
9	Irlanda	0,1831	0,3994	0,2163
10	Corea, Rep.	0,1825	0,4255	0,2429
11	Canadá	0,1502	0,3977	0,2475
12	Luxemburgo	0,1386	0,3673	0,2287
13	Eslovenia	0,1362	0,3783	0,2421
14	Alemania	0,1155	0,3672	0,2517
15	Australia	0,1144	0,3795	0,2652
16	Reino Unido	0,0848	0,3572	0,2724
17	Francia	0,0609	0,3456	0,2847
18	Dinamarca	0,0617	0,3333	0,2300
19	Austria	0,0366	0,3187	0,2820
20	Nueva Zelanda	0,0327	0,3357	0,3030
21	España	-0,0035	0,3147	0,3180
22	República Checa	-0,0192	0,3173	0,3365
23	Italia	-0,0241	0,3124	0,3364
24	Israel	-0,0287	0,2840	0,3127
25	Polonia	-0,1226	0,2636	0,3862
26	Estonia	-0,1279	0,2739	0,4018
27	República Eslovaca	-0,1653	0,2422	0,4075
28	Portugal	-0,1735	0,2605	0,4335
29	Estados Unidos	-0,1826	0,2680	0,4506
30	Lituania	-0,2064	0,1211	0,3275
31	Grecia	-0,2282	0,2194	0,4477
32	Hungría	-0,2833	0,1943	0,4776
33	Letonia	-0,3398	0,1694	0,5092
34	Chile	-0,4569	0,1366	0,5935
35	Turquía	-0,5163	0,1378	0,6541
36	México	-0,6226	0,1015	0,7241

Figura 4.3. Preorden completo (flujos positivos, negativos y netos)

Tal como se ha señalado hasta ahora, estamos investigando sobre el tema desde la primera publicación del Informe en 2016. Fruto de dicha labor han sido los distintos trabajos presentados y publicados, Fernández y Escribano (2017) y Fernández *et al.* (2018, 2019), cuyos resultados se comentaron en las líneas precedentes.

## 2.4. La Revolución Digital. ODS 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 17 en la OCDE

El enfoque que se dio al estudio realizado en el año 2020, tomando como referencia el Informe Global 2019, se centró en uno de los seis pilares fundamentales que sustentan las transformaciones propuestas de la Revolución Digital para el Desarrollo Sostenible, TWI2050 (2019). De acuerdo con la nueva perspectiva de análisis, los ODS pueden hacerse operativos por medio de seis transformaciones: 1. Educación, género y desigualdad; 2. Salud, bienestar y demografía; 3. Descarbonización energética e industria sostenible; 4. Alimentos, tierra, agua y océanos sostenibles; 5. Ciudades y comunidades sostenibles; 6. Revolución digital para el desarrollo sostenible.

Estas seis transformaciones están guiadas por los principios de no dejar a nadie atrás (*leaving no one behind*), circularidad y desacoplamiento.

El trabajo realizado (Fernández *et al.*, 2020) se enfocó en «la Revolución digital para el desarrollo sostenible». Si se gestionan bien, las tecnologías digitales tales como la inteligencia artificial y las

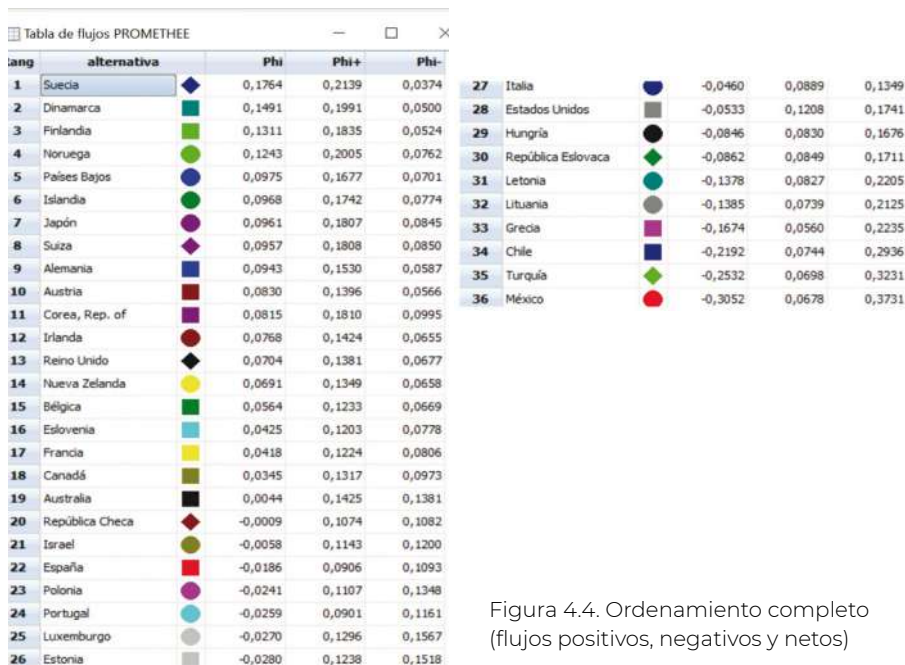


Figura 4.4. Ordenamiento completo (flujos positivos, negativos y netos)

tecnologías de comunicación modernas pueden contribuir en gran medida a mejorar prácticamente todos los ODS. Así, de los 17 ODS reconocidos por la Agenda 2030, 12 de ellos son los que se vinculan a la Revolución Digital: ODS 1: No pobreza; ODS 2: Hambre cero; ODS 3: Buena salud y bienestar; ODS 4: Educación de calidad; ODS 7: Energía asequible y limpia; ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico; ODS 9: Industria, innovación e infraestructura; ODS 10: Reducción de las desigualdades; ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles; ODS 12: Consumo y Producción Responsables; ODS 13: Acción sobre el clima; ODS 17: Asociaciones para los objetivos.

La figura 4.4 indica el ranking obtenido al aplicar la Metodología PROMETHEE mediante la utilización del software Visual PROMETHEE.

Los ordenamientos (preórdenes) tanto parciales como completos de cada uno de los países según el ranking de la OCDE y según la metodología PROMETHEE tienen grandes diferencias, lo que demuestra que algunos países tendrían que revisar más su implicación con los ODS. En relación con el modelo multilogit, se concluyó que lo más probable será que el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) mejore su nivel de logro en un futuro inmediato, con carácter general en los países de la OCDE.

## 2.5. ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico en España

En el año 2021, el contexto de la pandemia afectó notablemente a la Agenda 2030 y algunos ODS sufrieron importantes retrocesos respecto a los niveles alcanzados hasta ese momento (Sachs *et al.*, 2020). Uno de los ODS más afectados negativamente y que, además, es el más relacionado con el trabajo y la situación económica es el ODS 8, «Trabajo decente y crecimiento económico».

El trabajo realizado (Fernández *et al.*, 2021) se abordó con una doble meta. Por un lado, se estudió de forma desagregada el ODS 8 para evaluar su situación en las ciudades capitales de provincia de España. Se estudiaron las medidas que deberían implementarse para poder alcanzar los niveles de satisfacción exigidos. Se aplicó en la primera fase la metodología PROMETHEE con el propósito de establecer una jerarquización entre las ciudades objeto de análisis según el grado de alcance del objetivo de referencia. Por otro lado, al ser considerado como un tema de gran relevancia a nivel nacional y motivo de preocupación para la mayoría española, se realizó un estudio econométrico para analizar las perspectivas de este objetivo en el horizonte 2030.

Transcurrido otro año más hacia el logro de la Agenda 2030 de los ODS, España, cada vez más implicada en aplicar medidas que permitan mejorar el alcance de los objetivos posee una red de expertos que forman parte de la Red Española para el Desarrollo Sostenible (REDS). Esta red elaboró un par de informes a nivel nacional; concretamente, se tomó como punto de referencia para el trabajo realizado el informe titulado *¿Cómo está avanzando la Agenda 2030 a nivel local? Una mirada práctica* (Sánchez de Madariaga *et al.*, 2020), que incluye a 103 ciudades españolas.

En el contexto de pandemia que se vivió en el año de referencia, surgieron aprendizajes y oportunidades que, supuestamente, tendrían que hacer progresar los ODS en las ciudades, a pesar de las dificultades coyunturales. No obstante, el ODS 8 se vio seriamente afectado y perjudicado en su conjunto.

Las alternativas del modelo multicriterio son las ciudades españolas capitales de provincias, al considerar que es en ellas donde se concentra el poder gubernamental para aplicar disposiciones de carácter tanto local como nacional. Los resultados obtenidos se pueden extrapolar, sin pérdida de fiabilidad, al resto de las ciudades de la misma provincia.

El ODS 8 busca promover el crecimiento económico sostenible e inclusivo, así como el empleo y el trabajo decente para todos. Para

ello, se debe mantener el crecimiento económico per cápita de conformidad con las circunstancias nacionales y conseguir que el crecimiento del PIB de los países menos adelantados sea de, al menos, el 7% anual. Asimismo, es necesario promover políticas que apoyen actividades productivas y la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento y la innovación (ITUC, 2020).

Erradicar la pobreza solo será posible mediante empleos estables y bien remunerados. Por eso, es vital promover el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos en todo el mundo. Así se logrará la promoción del crecimiento económico sostenido, sostenible e inclusivo, como el que genera el empleo verde.

Concretamente, en nuestro país, el ODS 8 está directamente relacionado con el ámbito del trabajo y la economía, busca mejorar las condiciones laborales y aumentar la productividad laboral, reducir la tasa de desempleo, especialmente para los jóvenes y mayores sin formación, y mejorar el acceso a los servicios y beneficios financieros son componentes esenciales de un crecimiento económico inclusivo. Estas son las principales metas de este objetivo. No se puede concebir una mejora en las condiciones de vida de las personas sin abordar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, sin un empleo productivo y en condiciones dignas.

El desempleo, particularmente el juvenil, representan algunos de los retos más acuciantes en nuestro país. La destrucción de empleo registrada en España por la crisis económica y la creación de empleo en condiciones de precariedad son las principales fuentes del aumento de la desigualdad y de la modificación de los perfiles de pobreza y exclusión social.

El modelo de decisión multicriterio comprende al ODS 8 desagregado en sus ocho subobjetivos y las 52 ciudades consideradas como capitales de provincia.

El estudio realizado presenta ventajas importantes respecto a las conclusiones que aparecen en el informe de la REDS. En primer lugar, se presenta un ordenamiento de las ciudades según el grado de alcance del ODS 8 en general y se efectúa una desagregación para cada uno de los subobjetivos que lo componen. Esto último permite una visión más realista del grado de alcance de la meta en cada uno de sus componentes y cuál es la situación actual de cada ciudad. Solo se han considerado los niveles extremos, es decir, el umbral verde que indica que la meta se ha alcanzado o el umbral rojo, que señala una situación crítica en el alcance de lo estipulado. En segundo lugar, se determinan umbrales específicos para cada uno de los subobjetivos, lo cual introduce mayor realismo a la hora del estudio.

Tabla de flujos PROMETHEE				
Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Lugo	0,1842	0,1880	0,0038
2	Zaragoza	0,1721	0,1875	0,0154
3	La Coruña	0,1588	0,1704	0,0116
4	Santander	0,1512	0,1583	0,0072
5	Logroño	0,1447	0,1549	0,0102
6	Valladolid	0,1368	0,1565	0,0197
7	Ávila	0,1141	0,1448	0,0307
8	Alicante	0,1048	0,1310	0,0261
9	Valencia	0,0979	0,1098	0,0119
10	Pontevedra	0,0935	0,1397	0,0462
11	Barcelona	0,0887	0,1541	0,0654
12	Orense	0,0866	0,1111	0,0245
13	Madrid	0,0856	0,1375	0,0519
14	Lérida	0,0837	0,1312	0,0476
15	Zamora	0,0790	0,1053	0,0263
16	Bilbao	0,0724	0,0882	0,0158
17	Albacete	0,0693	0,1129	0,0435
18	Oviedo	0,0664	0,1076	0,0412
19	Murcia	0,0610	0,0937	0,0326
20	León	0,0523	0,1577	0,1054
21	Burgos	0,0453	0,1096	0,0643
22	Cáceres	0,0451	0,1087	0,0636
23	Castellón de la Plana	0,0446	0,1020	0,0574
24	Salamanca	0,0428	0,0970	0,0542
25	Cuenca	0,0378	0,1085	0,0705
26	Palencia	0,0313	0,1069	0,0757
27	Las Palmas Gran	0,0212	0,1312	0,1100
28	Ciudad Real	0,0151	0,1084	0,0934
29	Tarragona	0,0138	0,0941	0,0803
30	Santa Cruz Tenerife	0,0132	0,1015	0,0883
31	Jaén	0,0005	0,0771	0,0766
32	Málaga	-0,0174	0,0737	0,0910
33	Soria	-0,0296	0,0611	0,0907
34	Granada	-0,0375	0,0989	0,1364
35	Almería	-0,0438	0,0592	0,1029
36	Guadalajara	-0,0554	0,0831	0,1385
37	Vitoria	-0,0579	0,0833	0,1412
38	Badajoz	-0,0665	0,0956	0,1621
39	Segovia	-0,0677	0,0369	0,1046
40	San Sebastián	-0,0701	0,1141	0,1842
41	Huesca	-0,0739	0,0465	0,1204
42	Huelva	-0,0750	0,0726	0,1476
43	Córdoba	-0,1095	0,0795	0,1889
44	Toledo	-0,1130	0,0771	0,1902
45	Gerona	-0,1361	0,0874	0,2234
46	Sevilla	-0,1399	0,0556	0,1954
47	Palma Mallorca	-0,1464	0,2006	0,3470
48	Teurel	-0,1542	0,0549	0,2091
49	Ceuta	-0,2141	0,1036	0,3177
50	Cádiz	-0,2150	0,0732	0,2882
51	Pamplona	-0,2791	0,0531	0,3322
52	Melilla	-0,3117	0,1205	0,4322

Figura 4.5. Preorden completo (flujos positivos, negativos, netos)

Como conclusiones de la primera fase del estudio, puede decirse que de cara al futuro deberían mejorarse los aspectos siguientes: definir un indicador adecuado para medir el empleo en turismo sostenible; introducir datos a nivel municipal sobre la implementación del teletrabajo (pre y post pandemia); obtener datos de mujeres jóvenes que no están empleadas y no estudian ni reciben capacitación a nivel municipal; considerar el porcentaje de contratos municipales que incluyen cláusulas de comercio justo. Para lograr dichas mejoras, deben desarrollarse estrategias de recolección de la información, tratamiento de los datos y publicación y transparencia en los mismos.

Analizados los aspectos más relevantes que influyen en el ordenamiento de las diferentes capitales de provincia españolas, en la segunda fase se estimó la probabilidad de mejora del ODS 8 en sus diferentes categorías. La estimación multilogit reflejó que lo más probable es que en un futuro próximo las diferentes capitales de provincia españolas no alcancen los mejores valores del objetivo ODS 8, ya que, la probabilidad estimada es muy pequeña (aproximadamente 0.05); lo más probable es alcanzar un nivel intermedio del objetivo. Esto nos hace pensar en la importancia de continuar estableciendo

las medidas necesarias por parte de las autoridades competentes para mejorar el nivel de logro del ODS 8, que está centrado en el empleo decente y crecimiento económico.

Finalmente, se concluyó que, en general, aún es necesario mejorar las definiciones de los indicadores que recogen, tratan y publican los datos empleados para realizar estos análisis, en muchas facetas, como ya se ha indicado: empleo en turismo sostenible, jóvenes que no estudian ni reciben capacitación, cláusulas de comercio justo, implementación del teletrabajo. En principio, en un futuro próximo, no se conseguirán alcanzar los niveles óptimos en el ODS 8, aunque sí niveles intermedios. En la [figura 4.5](#) aparece el ordenamiento completo obtenido de las ciudades capitales de provincia españolas en el ODS estudiado.

## 2.6. ODS 13. ACCIÓN POR EL CLIMA EN LA UNIÓN EUROPEA

En el año 2022 se tomó como punto de partida para nuestra investigación el Informe Europeo 2021 que contiene los Índices y Paneles de los ODS para la Unión Europea y 38 países europeos (Lafortune *et al.*, 2021). La edición de este año cubrió los 27 estados miembros individuales de la UE, los 4 países de la Asociación Europea de Libre Comercio (Islandia, Liechtenstein, Noruega y Suiza) y el Reino Unido y, por primera vez, los países candidatos a la UE (Albania, Montenegro, la República de Macedonia del Norte, Serbia y Turquía), así como Bosnia y Herzegovina. Por lo tanto, las alternativas que consideramos en nuestro modelo fueron los 38 países mencionados.

La deficiente situación en metas medioambientales de estos países hace que uno de los grandes desafíos que deben abordar sea la acción por el clima (ODS 13).

El objetivo del trabajo desarrollado (Fernández *et al.*, 2022) fue analizar la situación en que se encuentran los países de referencia en el ODS 13, desagregado en distintos subobjetivos, y estudiar la evolución hacia el logro de los niveles de satisfacción, establecidos en la Agenda 2030.

El objetivo del ODS 13 es el que insta a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, tomando las acciones necesarias para ello, entre las que se incluye la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. ¿Qué significa acción por el clima? Es una iniciativa enfocada a invertir en alternativas que reduzcan la emisión de carbono y la adaptación ante el cambio

Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Albania	0,3376	0,3474	0,0098
2	Macedonia del Norte	0,2337	0,2374	0,0038
3	Rumanía	0,2336	0,2374	0,0038
4	Montenegro	0,2179	0,2252	0,0073
5	Liechtenstein	0,1992	0,2075	0,0083
6	Turquía	0,1947	0,2047	0,0100
7	Croacia	0,1593	0,1786	0,0193
8	Letonia	0,1402	0,1669	0,0266
9	Hungría	0,1389	0,1631	0,0241
10	Serbia	0,1362	0,1740	0,0378
11	Portugal	0,1244	0,1522	0,0278
12	España	0,1150	0,1451	0,0301
13	Italia	0,1060	0,1397	0,0337
14	Bulgaria	0,1060	0,1439	0,0379
15	Lituania	0,1055	0,1412	0,0356
16	Malta	0,1031	0,1735	0,0704
17	Francia	0,0947	0,1351	0,0403
18	Suecia	0,0714	0,1397	0,0682
19	República Eslovaca	0,0520	0,1098	0,0577
20	Grecia	0,0427	0,1069	0,0643
21	Bosnia y Herzegovina	0,0236	0,1422	0,1186
22	Chipre	-0,0013	0,0875	0,0888
23	Dinamarca	-0,0213	0,0909	0,1122
24	Eslovenia	-0,0365	0,0740	0,1105
25	Polonia	-0,0434	0,1036	0,1469
26	Reino Unido	-0,0505	0,0906	0,1412
27	Suiza	-0,0753	0,1235	0,1988
28	Finlandia	-0,0905	0,0583	0,1488
29	Irlanda	-0,1104	0,0532	0,1636
30	Alemania	-0,1313	0,0528	0,1841
31	Bélgica	-0,1416	0,0517	0,1933
32	República Checa	-0,1455	0,0680	0,2135
33	Austria	-0,1684	0,0452	0,2136
34	Países Bajos	-0,1994	0,0408	0,2402
35	Estonia	-0,2021	0,0591	0,2612
36	Islandia	-0,3416	0,0303	0,3720
37	Noruega	-0,5250	0,0306	0,5555
38	Luxemburgo	-0,6518	0,0119	0,6637

Figura 4.6. Preorden completo (flujos positivos, negativos, netos)

climático. Este objetivo pretende tomar medidas que frenen el cambio climático por los efectos que ello tiene para la población mundial.

Al analizar los resultados que se obtienen de los ordenamientos tanto parciales como total, resulta sorprendente que los países que generalmente ocupan el top 10 sean los peores situados con respecto al ODS 13. Los países del norte de Europa, Dinamarca (23), Finlandia (28) y Suecia (18,) no destacan especialmente y, por el contrario, su posición dista mucho de estar en los niveles deseables de alcance del objetivo en cuestión.

Los resultados del modelo multilogit estimados demostraron una vez más que es poco probable que estos países consigan los logros de la Agenda 2030 en el corto plazo. Lo que implica que, a pesar de la situación de incertidumbre que se está viviendo en los últimos meses, los gobiernos deberán hacer un esfuerzo adicional para adoptar las medidas necesarias que permitan la mejora del ODS 13. También el resto de los agentes implicados en el cambio climático, de todos los países analizados, tendrán que replantearse sus decisiones medioambientales si se quiere, en el futuro, llegar a cumplir alguno de los compromisos respecto al clima de la agenda 2030. En la [figura 4.6](#) puede observarse el ordenamiento completo de los países estudiados, con el detalle de los flujos positivos, negativos y netos.

ODS 5	Indicador
ODS 5.1	Demanda de planificación familiar satisfecha con métodos modernos (% de niñas y mujeres de 15 a 49 años)
ODS 5.2	Relación entre la media de años de educación recibidos por las mujeres y los hombres (%)
ODS 5.3	Relación entre la tasa de participación de la fuerza laboral femenina y masculina (%)
ODS 5.4	Escaños ocupados por mujeres en el parlamento nacional (%)
ODS 5.5	Diferencia salarial entre hombres y mujeres (% del salario medio masculino)

Figura 4.7. Subobjetivos del ODS 5

## 2.7. ODS 5: La igualdad de género. Países desarrollados vs países en vías de desarrollo

En el año 2023 se abordó la *igualdad de género* con el propósito de estudiar cuantitativamente, mediante un análisis multicriterio y un estudio econométrico multilogit, cuál es la situación de un grupo de países representativos de los llamados «desarrollados» y otro grupo dentro de los conocidos como «en vías de desarrollo». De esta forma se han considerado países de todos los continentes con el fin de extraer conclusiones más realistas y objetivas. Las razones que justificaron nuestra elección se centraron en la descripción detallada y pormenorizada que contiene el Informe sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022 (Sachs *et al.*, 2022), que pone de manifiesto los efectos destructivos y perjudiciales que están teniendo estas crisis en el logro de los ODS. Los efectos de la pandemia de COVID-19, la actual guerra de Ucrania, la crisis energética, alimentaria, humanitaria y de refugiados, sumado a la emergencia climática, son una prueba evidente de un contexto convulso en el que la recuperación económica mundial es frágil y desapareja. Las mujeres se vieron afectadas de forma desproporcionada por las consecuencias socioeconómicas de la pandemia. Tuvieron que enfrentar la pérdida de puestos de trabajo, el aumento de la carga de trabajo no remunerado en el hogar y la intensificación de una epidemia silenciosa de violencia doméstica. Por tal motivo, la igualdad de género se ha visto especialmente afectada de manera negativa.

Las alternativas que conforman el modelo multicriterio son veinte países pertenecientes a distintos continentes. El criterio de elección que se ha aplicado consiste en incluir países con distintos niveles de desarrollo para poder comprobar en qué medida respetan

Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Noruega	0,2893	0,2893	0,0000
2	Suecia	0,2826	0,2838	0,0013
3	Francia	0,2530	0,2617	0,0087
4	España	0,2390	0,2416	0,0026
5	Suiza	0,1985	0,2172	0,0187
6	Sudáfrica	0,1768	0,1896	0,0128
7	México	0,1478	0,2014	-0,0537
8	Australia	0,1282	0,1630	0,0348
9	Alemania	0,1232	0,1613	0,0381
10	Colombia	0,0993	0,1839	0,0846
11	Canadá	0,0352	0,1016	0,0664
12	Singapur	0,0333	0,0890	0,0557
13	Tailandia	0,0232	0,1165	0,0933
14	Estados Unidos	-0,0045	0,1039	0,1084
15	Israel	-0,1515	0,0937	0,2451
16	Egipto	-0,2310	0,0422	0,2732
17	Japón	-0,2600	0,0745	0,3345
18	Turquía	-0,4169	0,0362	0,4531
19	Marruecos	-0,4581	0,0053	0,4633
20	India	-0,5075	0,0053	0,5127

Figura 4.8. ODS 5: flujos positivos, negativos y netos

los derechos de las mujeres y preservan la igualdad de género. Dentro de los denominados países desarrollados se incluyeron los países que ofrecen mejor calidad de vida a sus ciudadanos y en los que el Índice de Desarrollo Humano elaborado por la ONU (2023), compuesto por tres indicadores esenciales (esperanza de vida, nivel de alfabetización y PIB per cápita) pone de manifiesto la capacidad que tienen esos países para generar un entorno adecuado en que las personas puedan vivir según sus necesidades e intereses.

Los criterios de decisión del modelo multicriterio fueron los distintos subobjetivos en que se divide el objetivo principal que se identifica con la igualdad de género y que se incluyen en la [figura 4.7](#).

El análisis multicriterio ([figura 4.8](#)) realizado refleja que, de acuerdo con el ordenamiento obtenido entre los distintos países, muchos de ellos no logran alcanzar el objetivo que se persigue. Por este motivo, se planteó un modelo multilogit (Fernández *et al.*, 2023) que permitiera determinar cuáles son los factores o variables que podrían influir en la probabilidad de mejora de este objetivo para los países analizados en el horizonte 2030.

Las variables explicativas que se utilizaron en el modelo multilogit planteado para el ODS 5 se centraron, por un lado, en los efectos indirectos y, por otro, en el nivel de desarrollo humano de un país. Los resultados de las probabilidades obtenidas utilizando los valores medios muestrales de los diferentes regresores del modelo, indicaron que es poco probable que, en un futuro inmediato, con carácter general, los países objeto de estudio alcancen su máximo nivel (verde) en el logro del ODS 5. Los resultados mostraron que lo más

probable es que se logren niveles intermedios, es decir, niveles 2 y 3 (amarillo y naranja), respectivamente. Esto nos hace pensar en la importancia de seguir trabajando con el fin de mejorar el nivel de cumplimiento del ODS5, que está centrado en la brecha salarial de género y otras medidas de capacitación y de violencia de género contra las mujeres.

## 2.8. ODS 4. Educación de calidad en la Unión Europea

Al comenzar el año 2024 y hacer una revisión exhaustiva de la situación de los ODS observamos que el tema de la educación está aún en una situación muy crítica (Sachs *et al.*, 2023). Los progresos hacia una educación de calidad eran muy lentos antes de la pandemia, pero la COVID-19 ha tenido repercusiones devastadoras, agudizando los retrasos en la mayoría de los países. Se necesitan medidas urgentes y profundas que comprendan a todas las metas e indicadores del ODS 4 que propugna una educación de calidad.

La educación es la clave que permitirá alcanzar muchos otros ODS. Cuando las personas pueden obtener educación de calidad, pueden romper el ciclo de la pobreza. La educación ayuda a reducir las desigualdades y a alcanzar la igualdad de género. Asimismo, ayuda a las personas de todo el mundo vivir una vida más saludable y sostenible, favorece el fomento de la tolerancia entre las personas y contribuye al desarrollo de sociedades más pacíficas. Por ello, el ODS 4 en su aspiración más amplia pretende: garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.

El objetivo del trabajo que se abordó fue analizar la situación actual de la educación de calidad en los 27 estados miembros de la Unión Europea, los 6 países candidatos a formar parte de ella, los 4 países de la Asociación Europea de Libre Comercio y el Reino Unido.

En este trabajo (Fernández *et al.*, 2024) se han utilizado los siete indicadores o subobjetivos que establece el ODS 4 para el año 2024. De los resultados que se reflejan en el análisis multicriterio efectuado en este estudio podemos concluir que de los 38 países elegidos solo los 22 primeros reflejan un flujo neto positivo. Todos los países nórdicos se encuentran entre los 7 primeros, a excepción de Islandia, que se encuentra en el lugar 15. Los países bálticos están bastante bien posicionados pues ocupan los lugares 8 (Estonia), 11 (Lituania) y 12 (Letonia). España se sitúa en el lugar 13, por delante de Malta (14), Islandia (15), Portugal (16), Polonia (17), Francia (18), Austria (19),

Tabla de flujos PROMETHEE				
Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Suecia	0,2489	0,2600	0,0111
2	Países Bajos	0,2462	0,2546	0,0084
3	Irlanda	0,2297	0,2529	0,0232
4	Dinamarca	0,2211	0,2381	0,0170
5	Eslovenia	0,1806	0,2010	0,0204
6	Noruega	0,1749	0,2255	0,0506
7	Finlandia	0,1660	0,1978	0,0318
8	Estonia	0,1612	0,1988	0,0376
9	Luxemburgo	0,1509	0,1950	0,0441
10	Reino Unido	0,1367	0,1706	0,0339
11	Lituania	0,1356	0,1788	0,0432
12	Letonia	0,0945	0,1355	0,0409
13	España	0,0684	0,1417	0,0733
14	Malta	0,0595	0,1129	0,0534
15	Islandia	0,0591	0,1918	0,1327
16	Portugal	0,0522	0,1094	0,0571
17	Polonia	0,0520	0,1232	0,0711
18	Francia	0,0388	0,1257	0,0869
19	Austria	0,0382	0,1099	0,0717
20	Bélgica	0,0379	0,1357	0,0978
21	Croacia	0,0340	0,1324	0,0984
22	Suiza	0,0113	0,1802	0,1689
23	Italia	-0,0390	0,0912	0,1303
24	República Checa	-0,0588	0,0917	0,1505
25	Alemania	-0,0594	0,0764	0,1358
26	Chipre	-0,0677	0,1477	0,2154
27	Grecia	-0,0837	0,1031	0,1868
28	República Eslovaca	-0,0972	0,0652	0,1625
29	Bosnia y Herzegovina	-0,1009	0,0001	0,1011
30	Liechtenstein	-0,1077	0,0000	0,1077
31	Serbia	-0,1159	0,0767	0,1925
32	Albania	-0,1385	0,1048	0,2433
33	Hungría	-0,1605	0,0674	0,2279
34	Montenegro	-0,1903	0,0939	0,2842
35	Bulgaria	-0,2849	0,0318	0,3168
36	Turquía	-0,2899	0,0581	0,3480
37	Macedonia del Norte	-0,3844	0,0549	0,4393
38	Rumanía	-0,4190	0,0244	0,4434

Figura 4.9. Ordenamiento completo: ODS 4 «Educación de Calidad»

Bélgica (20), Croacia (21), Suiza (22) e Italia (23), siendo Italia el primer país con flujo neto negativo. La figura 4.9 muestra el detalle de los flujos positivos, negativos y netos, así como el ordenamiento completo obtenido.

Los resultados obtenidos con el modelo multilogit estimado permitieron concluir que lo más probable será que el ODS 4 (educación de calidad) siga manteniéndose en el nivel 4 (color rojo). Asimismo, dado que la tasa de acierto de este modelo es de un 89,2%, se puede concluir que el modelo clasificó bastante bien con una probabilidad de más del 50% (0,657). En definitiva, la educación de calidad, a raíz de los resultados expuestos, parece ser aún un objetivo que no se va a conseguir en el corto o medio plazo.

## 2.9. ODS 5. Igualdad de género, meta 5.4 en la Unión Europea

Si reflexionamos en qué situación estamos a tan solo cinco años de la Agenda 2030 podemos comprobar que, el principio orientador del

Rang	alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	Suecia	0,2489	0,2600	0,0111
2	Países Bajos	0,2462	0,2546	0,0084
3	Irlanda	0,2297	0,2529	0,0232
4	Dinamarca	0,2211	0,2381	0,0170
5	Eslovenia	0,1806	0,2010	0,0204
6	Noruega	0,1749	0,2255	0,0506
7	Finlandia	0,1660	0,1978	0,0318
8	Estonia	0,1612	0,1988	0,0376
9	Luxemburgo	0,1509	0,1950	0,0441
10	Reino Unido	0,1367	0,1706	0,0339
11	Lituania	0,1356	0,1788	0,0432
12	Letonia	0,0945	0,1355	0,0409
13	España	0,0684	0,1417	0,0733
14	Malta	0,0595	0,1129	0,0534
15	Islandia	0,0591	0,1918	0,1327
16	Portugal	0,0522	0,1094	0,0571
17	Polonia	0,0520	0,1232	0,0711
18	Francia	0,0388	0,1257	0,0869
19	Austria	0,0382	0,1099	0,0717
20	Bélgica	0,0379	0,1357	0,0978
21	Croacia	0,0340	0,1324	0,0984
22	Suiza	0,0113	0,1802	0,1689
23	Italia	-0,0390	0,0912	0,1303
24	República Checa	-0,0588	0,0917	0,1505
25	Alemania	-0,0594	0,0764	0,1358
26	Chipre	-0,0677	0,1477	0,2154
27	Grecia	-0,0837	0,1031	0,1868
28	República Eslovaca	-0,0972	0,0652	0,1625
29	Bosnia y Herzegovina	-0,1009	0,0001	0,1011
30	Liechtenstein	-0,1077	0,0000	0,1077
31	Serbia	-0,1159	0,0767	0,1925
32	Albania	-0,1385	0,1048	0,2433
33	Hungría	-0,1605	0,0674	0,2279
34	Montenegro	-0,1903	0,0939	0,2842
35	Bulgaria	-0,2849	0,0318	0,3168
36	Turquía	-0,2899	0,0581	0,3480
37	Macedonia del Norte	-0,3844	0,0549	0,4393
38	Rumanía	-0,4190	0,0244	0,4434

Figura 4.10. Ordenamiento completo: flujos positivos, negativos, netos

Desarrollo Sostenible «no dejar a nadie atrás» está en peligro. La humanidad se encuentra en un momento de graves dificultades y se necesitan esfuerzos importantes para superar las crisis que la afectan desde diversos frentes. Si analizamos el progreso que se ha realizado en el ODS 5, que promueve la «igualdad de género», se detecta que ninguno de los indicadores que lo componen ha alcanzado el nivel deseado. Se necesitan liderazgo político y reformas normativas integrales para sacar al objetivo de su letargo y dismantelar las barreras sistémicas que impiden su alcance (Lafortune *et al.*, 2024).

El análisis abordado estudió el ODS 5, poniendo el foco de atención en la meta 5.4, que consiste en «reconocer y valorar los cuidados y el trabajo doméstico no remunerados mediante servicios públicos, infraestructuras y políticas de protección social, y promoviendo la responsabilidad compartida en el hogar y la familia». Se realizó un análisis comparativo entre los 27 estados miembros de la Unión Europea, los 6 países candidatos, los 4 países de la Asociación Europea de Libre Comercio y el Reino Unido, mediante la utilización de metodologías multicriterio (Lima y Fernández, 2024).

La figura 4.10 refleja para cada país los flujos netos, los flujos positivos (poder de superación de una alternativa) y los flujos negativos (debilidad de una alternativa) y el ordenamiento según los flujos netos, que consisten en un balance entre la fuerza y la debilidad de cada alternativa en la comparación por pares.

El estudio en profundidad que se ha realizado del ODS 5, puso de manifiesto que aún debe avanzarse mucho para lograr los niveles mínimos deseables. La gran disparidad existente entre los países analizados responde en gran parte a las políticas públicas implantadas.

Si los gobiernos quieren avanzar de forma sólida en la consecución del objetivo 5 y estar más cerca de la igualdad económica entre mujeres y hombres, es necesario que revisen, entre otras, las políticas públicas de cuidados y de protección social, estableciendo el acceso universal a los servicios públicos de cuidados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernández, G. y Escribano, M. C. (2017): «Análisis Multicriterio del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la OCDE para 2030», *Anales de ASEPUMA*, 25, 1-22.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2018): «¿Se cumplirán los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el horizonte 2030? Un análisis cuantitativo», *Anales de ASEPUMA*, 26, 1-25.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2019): «Salud y pobreza, ODS de la Agenda 2030, ¿un reto posible de alcanzar?», *Anales de ASEPUMA*, 27, 1-29.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2020): «La revolución digital y su impacto en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: un análisis cuantitativo», *Anales de ASEPUMA*, 28, 1-27.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2021): «ODS Trabajo Decente y Crecimiento Económico: reto de las capitales de provincia españolas ante la Agenda 2030», *Anales de ASEPUMA*, 29, 1-30.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2022): «Europa frente a la Agenda 2030: la acción por el clima. Un verdadero desafío por superar», *Anales de ASEPUMA*, 30, 1-23.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2023): «La igualdad de género. Un estudio cuantitativo», *Anales de ASEPUMA*, 31, 1-23.
- Fernández, G., García-Centeno, M. C. y Escribano, M. C. (2024): «Educación de calidad. Un estudio cuantitativo», *Anales de ASEPUMA*, 32, 1-23.
- International Trade Union Confederation (ITUC) (2020): *ITUC Global Rights Index*. Bruselas.

- Lafortune, G., Fuller, G., Moreno, J., Schmidt-Traub, G. y Kroll, C. (2018): *SDG Index and Dashboards. Detail Methodological Paper*. Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network.
- Lafortune, G., Cortés Punch, M., Mosnier, A., Fuller, G., Díaz, M., Riccaboni, A., Kloke-Lesch, A., Zachariadis, T., Carli, E. y Oger, A. (2021): *Europe Sustainable Development Report 2021: Transforming the European Union to achieve the Sustainable Development Goals*. París: SDSN, SDSN Europe and IEEP.
- Lafortune, G., Fuller, G., Kloke-Lesch, A., Kounduri, P. y Riccaboni, A. (2024): *European Elections, Europe's Future and the SDGs: Europe Sustainable Development Report 23/24*. París: SDSN and SDSN Europe and Dublin: Dublin University Press.
- Lima, I. y Fernández, G. (2024): «¿Será una realidad la igualdad de género en el año 2030? Un estudio cuantitativo», *Anales de ASEPUMA*, 32, 1-23.
- Naciones Unidas (ONU) (2023): *El Progreso en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Panorama de Género 2023*. Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales.
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Durand-Delacre, D y Teksoz, K. (2016): *SDG Index and Dashboards-Global Report*. Nueva York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions network (SDSN).
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G. y Fuller, G. (2019): *Sustainable Development Report 2019*. Nueva York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDNS).
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G. y Woelm, F. (2020): *The Sustainable Development Goals and COVID-19. Sustainable Development Report 2020*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sachs, J., Lafortune, G., Kroll, C., Fuller, G. y Woelm, F. (2022): *Sustainable Development Report 2022. From Crisis to Sustainable Development: the SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sachs, J. D., Lafortune, G., Fuller, G. y Drumm, E. (2023): *Implementing the SDG Stimulus. Sustainable Development Report 2023*. París: SDSN, Dublin: Dublin University Press.
- Sánchez de Madariaga, I., Benayas del Álamo J., García López, J., Sisto, R., Urquijo Reguera, J. y García Haro, M. (2020): *REDS, 2020. Los ODS en 100 ciudades españolas*. Madrid: REDS – Red Española para el Desarrollo Sostenible.
- TWI2050 - The World in 2050 (2019): *The Digital Revolution and Sustainable Development: Opportunities and Challenges*. Report prepared by The World in 2050 initiative. Luxemburgo: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).



# Emisiones contaminantes: decisiones estratégicas más allá del beneficio económico

M<sup>a</sup> ÁNGELES CARABALLO POU  
*Universidad de Sevilla*

ASUNCIÓN ZAPATA REINA  
*Universidad de Sevilla*

LUISA MONROY BERJILLOS  
*Universidad de Sevilla*

AMPARO M<sup>a</sup> MÁRMOL CONDE  
*Universidad de Sevilla*

## INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas del cambio climático y el calentamiento global ha sido el incremento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que ha tenido lugar desde la segunda mitad del siglo XX. Las enormes cantidades de gases producidos por la actividad humana y la larga pervivencia del CO<sub>2</sub> en la atmósfera son determinantes en el proceso de los cambios de temperatura y de los patrones climáticos. Las emisiones de gases de efecto invernadero proceden de todas las partes del mundo y afectan a todos, pero algunos países generan más emisiones que otros.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) advirtió en su sexto informe sobre el empeoramiento de la crisis. Este informe señaló que, si los Estados no se comprometen a realizar una mayor reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, entonces el aumento de la temperatura media del planeta superaría el 1,5°C, un aumento que se pretendía evitar con el Acuerdo de París. Más recientemente, el informe del IPCC 2023 vuelve a alertar sobre la gravedad de la situación y la necesidad de una drástica reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Concretamente, señala que, para limitar el calentamiento global a 1,5°C, es necesario alcanzar las emisiones netas cero de CO<sub>2</sub> a principios de la década de 2050 y las emisiones netas cero de gases de efecto invernadero alrededor de la década de 2070.

Asimismo, también se expresa una gran preocupación sobre las previsiones de emisiones de CO<sub>2</sub>, especialmente considerando el comportamiento actual de los países, ya que algunos de ellos no han presentado aún sus planes de mejora, otros han presentado planes con los mismos objetivos que presentaron en planes anteriores, o, incluso, hay países que permiten mayores emisiones que aquellas a las que se habían comprometido. Aunque en el Pacto Climático de Glasgow todos los países acordaron revisar y fortalecer sus objetivos de emisiones hasta 2030, según este informe, las emisiones globales de gases de efecto invernadero continúan aumentando, lo que hace probable que el calentamiento global supere los 1,5°C durante el siglo XXI. La brecha sustancial entre las emisiones globales proyectadas para 2030 y las emisiones asociadas a limitar el calentamiento sugiere que, con las políticas actuales, el mundo se dirige a un calentamiento de 3,2°C para 2100.

En la última cumbre del clima celebrada en Bakú (Azerbaiyán) también se señaló la necesidad de alcanzar unas emisiones netas cero para 2050. Se instó a los países a actualizar sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional para alinearlas con el objetivo de 1,5°C y establecer trayectorias más claras hacia la neutralidad climática, pero los detalles sobre cómo lograr emisiones netas cero en 2050 quedaron a la discreción de cada país.

Por otra parte, se indica que los flujos financieros para implementar medidas que promuevan el uso de energías limpias en lugar de combustibles fósiles son insuficientes, lo que perpetúa la dependencia de fuentes de energías contaminantes y dificulta la transición a sistemas más limpios. De hecho, en la reciente cumbre, los países menos desarrollados han manifestado un profundo malestar ante los insuficientes flujos financieros aprobados para

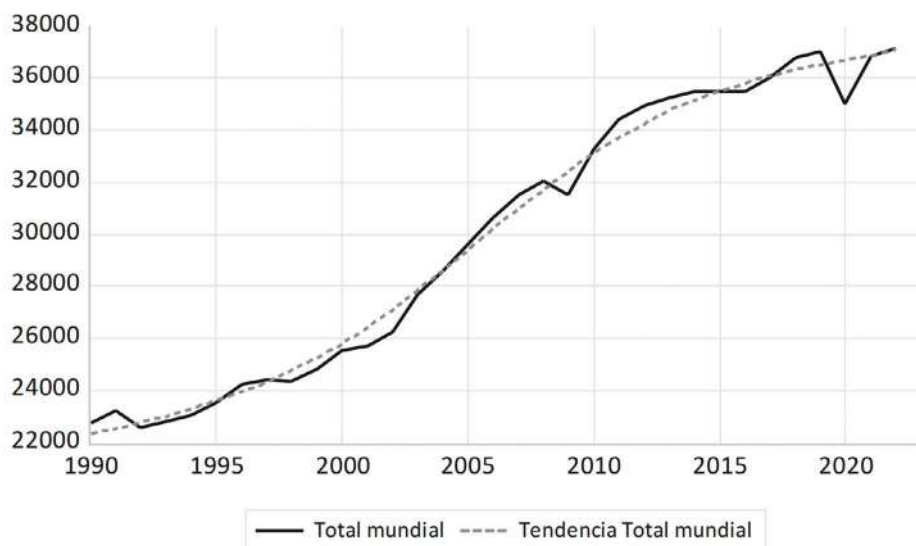


Figura 5.1. Emisiones y tendencia mundiales de CO<sub>2</sub>

reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas naciones han señalado que los recursos comprometidos están lejos de cubrir las necesidades reales para implementar medidas efectivas de mitigación y adaptación, criticando la falta de compromiso de los países desarrollados, que históricamente han contribuido de manera desproporcionada a las emisiones globales.

A pesar de la creciente preocupación por el calentamiento global, las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales han seguido un ritmo creciente, con la excepción del año 2009, como consecuencia de la crisis financiera desatada en 2008, que significó una disminución de la actividad industrial y, por tanto, de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y del año 2020, con la drástica reducción del Producto Interior Bruto que supuso la pandemia de la COVID-19. En la [figura 5.1](#) se representan los datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> proporcionados por Global Carbon Project, que corresponden a las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del uso de carbón, petróleo y gas (combustión y procesos industriales), el proceso de quema de gas y la fabricación de cemento, atribuidas al país en el que ocurren físicamente. Los datos se proporcionan en megatoneladas (millones de toneladas).

Estos datos ponen de relieve la necesidad y dificultad que conlleva la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que permitan frenar el cambio climático. Una posible explicación podría ser que los países se ven beneficiados por las acciones de los

demás, sin ellos mismos cargar con el coste de esas acciones. Así, aunque los países generalmente coinciden en que las emisiones globales de gases de efecto invernadero son demasiado altas, prefieren que los otros países reduzcan sus emisiones en lugar de reducir las suyas propias.

También se puede argumentar que el interés individual de los países a corto plazo está en desacuerdo con intereses colectivos a más largo plazo, de modo que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ahora para evitar impactos climáticos en el futuro contradice la racionalidad individual de cada país que trata de obtener los mejores resultados. Pero incluso suponiendo los intereses más egoístas, debido al riesgo de catástrofe y al hecho de que todos los países están expuestos a los mismos riesgos, se ha observado en las últimas décadas un cambio en la forma de actuar de los países que se han comprometido a mitigar las emisiones de gases.

Por tanto, hay que tener en cuenta el comportamiento estratégico de los países con respecto a las emisiones de gases contaminantes. La teoría de juegos analiza la interacción entre agentes y formula hipótesis sobre su comportamiento y el resultado final, por lo que sus procedimientos son particularmente adecuados para el análisis de los problemas ambientales internacionales. Desde el punto de vista no cooperativo es posible representar el problema de la reducción de emisiones de gases contaminantes mediante el llamado *juego de las emisiones*, en el que dos o más países deciden sobre sus emisiones de CO<sub>2</sub> teniendo en cuenta que su utilidad engloba el beneficio derivado de sus emisiones, así como el daño que le producen las emisiones agregadas de todos los países.

En ausencia de cooperación, cada país determina su nivel de emisiones, únicamente, en función de su propio interés. Para ello, anticipa las emisiones de los demás países y maximiza, individualmente, su utilidad. Al no poder controlar la decisión de sus oponentes, en el mejor de los casos se llega a situaciones en las que los países no pueden mejorar su utilidad si los demás mantienen sus decisiones. Esto es lo que se llama una situación de equilibrio. Cuando se alcanza una situación de equilibrio, ningún agente tiene incentivo para cambiar unilateralmente de estrategia, pues empeoraría su nivel de utilidad. Por eso, la salida de una situación de equilibrio no es espontánea. Se necesitarían acuerdos vinculantes entre los agentes, o bien una modificación de la percepción de la utilidad que obtienen como resultado de sus decisiones. La cuestión es que las emisiones totales acumuladas en estos equilibrios son mayores que las que se obtendrían si se consideraran niveles de reducción socialmente óptimos,

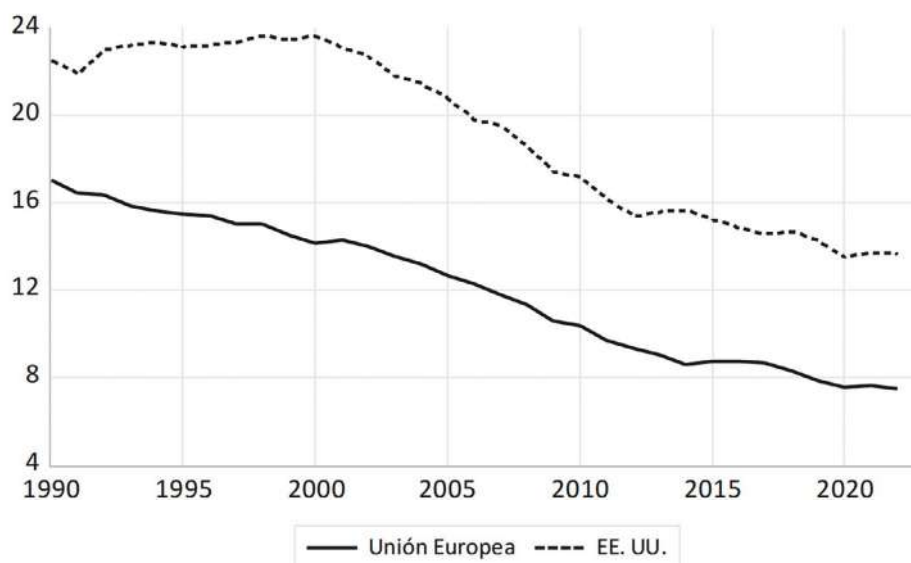


Figura 5.2. Porcentaje de participación de la UE y EE. UU. en las emisiones mundiales

es decir, si todos los países maximizasen conjuntamente la utilidad agregada. Por tanto, desde un punto de vista colectivo, los resultados que se obtienen en los equilibrios son mejorables.

La tendencia creciente mostrada en la [figura 5.1](#) esconde comportamientos específicos de determinadas áreas geográficas. Por ejemplo, el porcentaje de participación de la Unión Europea (UE) en el total de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> presenta una tendencia decreciente en todo el periodo, mientras que para Estados Unidos (EE. UU.) la contribución es estable en los primeros años del periodo y, posteriormente, decreciente, como puede verse en la [figura 5.2](#).

La disminución del porcentaje de participación de estas áreas geográficas en las emisiones mundiales podría explicarse por dos posibles factores: por un lado, un aumento significativo de las emisiones globales, acompañado de un incremento relativamente pequeño en estas dos regiones y, por otro lado, una disminución efectiva de las emisiones, tanto en la UE como en EE. UU.

Para determinar la causa de la reducción en el porcentaje de emisiones, vamos a analizar de forma individual cada una de estas regiones. Así, en la UE se observa una tendencia decreciente de emisiones de CO<sub>2</sub> que comenzó como consecuencia de la crisis financiera de 2008 y se mantuvo gracias a los ambiciosos objetivos señalados por la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Más concretamente, la UE aprobó el Paquete de Clima y

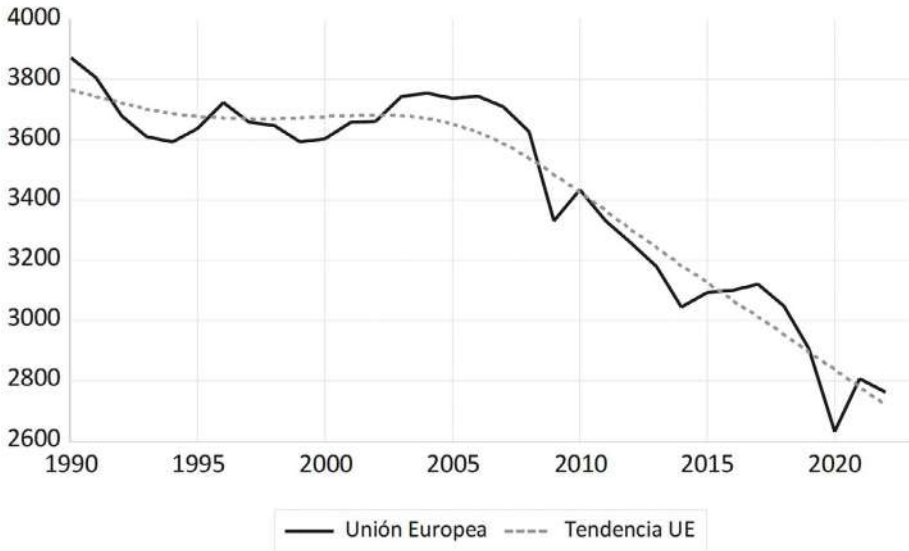


Figura 5.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> y tendencia en la UE

Energía 2020 en 2008, en el que se establecían tres objetivos clave para 2020: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% en comparación con los niveles de 1990, aumentar la participación de las energías renovables al 20% del consumo total de energía y mejorar la eficiencia energética en un 20%. En la [figura 5.3](#) se recogen los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> para la UE y su correspondiente tendencia decreciente.

Por otra parte, en EE. UU., las emisiones de CO<sub>2</sub> también han seguido una tendencia decreciente desde 2008 a pesar de que las políticas ambientales han sufrido cambios significativos dependiendo de la administración que ha ocupado el gobierno. Durante el mandato de B. Obama (2009-2017), EE. UU. se comprometió en el Acuerdo de París a la reducción de las emisiones en un 26-28% para 2025, en comparación con los niveles de 2005. Posteriormente, bajo el mandato de D. Trump (2017-2021), EE. UU. se retiró del Acuerdo de París en 2017 y se reincorporó en 2021 cuando J. Biden accedió al poder. En la [figura 5.4](#) se aprecia la tendencia sostenidamente decreciente en las emisiones de CO<sub>2</sub> desde 2008.

Este cambio claro de tendencia a partir de 2008, tanto en la UE como en EE. UU., nos lleva a preguntarnos si la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> se explica exclusivamente por los compromisos adquiridos por los países con los consecuentes cambios legislativos o si, a

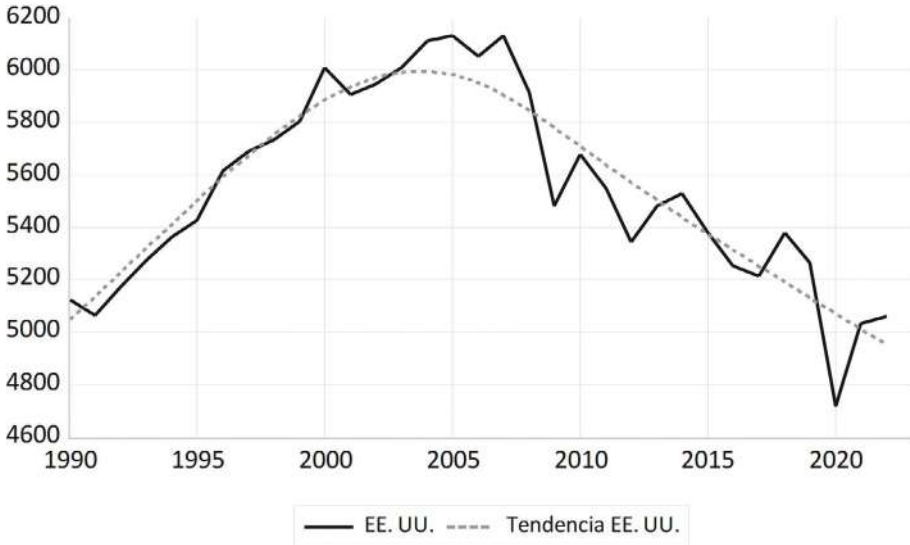


Figura 5.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> y tendencia en EE. UU.

ello, puede añadirse la concienciación de la población sobre la importancia de abordar el cambio climático.

Según un reciente informe del Pew Research Center (2021), realizado en 17 economías avanzadas en Europa, América del Norte, Asia y el Pacífico, el 80% de los ciudadanos están dispuestos a realizar cambios en su forma de vida para ayudar a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta concienciación asegura a los gobernantes que no van a encontrar una fuerte oposición social a las decisiones sobre la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino más bien una disposición favorable hacia las mismas. Esta disposición se manifiesta en las respuestas obtenidas en la European Social Survey en los años 2002, 2016 y 2018, y en la General Social Survey para EE. UU. en los años 1993, 1994, 2000, 2010 y 2021, en las que se realizaban preguntas relativas al medioambiente. En la UE, el 69,97% de las personas encuestadas eran favorables a cuidar el medioambiente, mientras que el 2,82% no lo era. Para EE. UU. los resultados fueron que el 54,29% de los encuestados estaba a favor de proteger el medioambiente y el 18% no lo estaba. Asimismo, los datos recogidos por la Comisión Europea (2023) en el Eurobarómetro publicado en julio de 2023 (datos recogidos entre mayo y junio de 2023) indican que más de las tres cuartas partes (77%) de los ciudadanos de la UE creen que el cambio climático es un problema muy grave en este momento. La creciente preocupación de la población puede facilitar un cambio de actitud

de los países hacia una conducta que capte la sensibilidad de los ciudadanos ante este problema en el diseño de las políticas públicas.

En este trabajo analizamos las decisiones estratégicas de los dos grandes bloques, la UE y EE. UU., para tratar de identificar los objetivos que orientan sus políticas sobre emisiones. Partimos de la hipótesis de que la maximización de los beneficios monetarios constituye un objetivo económico fundamental. Sin embargo, al comparar las predicciones del modelo basado únicamente en este objetivo con los datos reales de emisiones de 2022, concluimos que no es el único elemento que guía estas decisiones. Por ello, incorporamos al estudio un objetivo adicional que refleja la percepción ciudadana sobre los daños medioambientales. El análisis de la situación como un juego estratégico con dos objetivos permite explicar de manera más realista los niveles de emisiones que efectivamente se observan.

## 1. LA PREDICCIÓN DE EMISIONES DE UE Y EE. UU.

### A PARTIR DEL OBJETIVO BENEFICIO

En el modelo que consideramos inicialmente, los jugadores, la UE y EE. UU., emiten gases contaminantes al medioambiente. La función que representa los beneficios propios de cada jugador tiene dos elementos. Por una parte, los beneficios monetarios derivados de la emisión, dados por la diferencia entre los ingresos de su producción global, que depende linealmente de su propio nivel de emisiones, y el coste de producción, relacionado con el nivel de emisiones a través de una función cuadrática con rendimientos crecientes a escala. El segundo elemento es la valoración monetaria que se realiza del nivel global de emisiones, que depende de las emisiones de ambos jugadores y también de las del resto del mundo en el período anterior al de la toma de decisión. Esta valoración puede ser tanto positiva, si se considera, por ejemplo, que un crecimiento de las emisiones globales está indicando un crecimiento de la producción global y, por tanto, un contexto económico más favorable, o negativa, si se tiene en cuenta que esas emisiones pueden generar perjuicios en la salud de la ciudadanía, inversiones adicionales para paliar los efectos del cambio climático, etc.

Partimos, por tanto, de la hipótesis de que las funciones subyacentes que guían las decisiones sobre los niveles de emisiones de ambos jugadores en el año  $t$  son, como en Zapata *et al.* (2024), de la forma:  $B_i^t(e_1, e_2) = b_i \left( d_i e_i - \frac{1}{2} e_i^2 \right) + \frac{c_i}{2} (e_1 + e_2 + R_{t-1})^2$ , donde  $e_1$  y  $e_2$

representan, respectivamente, los niveles de emisiones de la UE y de EE. UU. y  $R_{t-1}$  son las emisiones del resto de los países en el año  $t-1$ .

El Global Carbon Project proporciona los datos de las emisiones de  $\text{CO}_2$  de la UE y EE. UU. Tomamos como periodo de análisis el comprendido entre la crisis financiera de 2008 y 2021. Puesto que estas han sido las emisiones reales, entendemos que son situaciones de equilibrio en sus respectivos momentos del tiempo. En el supuesto de que las decisiones de ambas partes estuviesen guiadas por el objetivo de la maximización de beneficios, la información sobre los niveles de emisiones que efectivamente se observan, y que, por tanto, constituyen los equilibrios en cada periodo, permite estimar los parámetros de la función de beneficio. Se ha realizado la estimación mediante mínimos cuadrados ordinarios corrigiendo los efectos de la pandemia de la COVID-19 mediante la introducción de una variable ficticia para los años 2020 y 2021. Los signos de los parámetros estimados, correspondientes a la valoración monetaria del nivel global de emisiones, indican que el total de dichas emisiones incide negativamente en los beneficios monetarios de cada área, puesto que puede considerarse que las emisiones totales generan costes sanitarios, costes producidos por catástrofes derivadas del cambio climático, etc. En definitiva, podríamos decir que ese segundo elemento de la expresión de la función de beneficios está valorando monetariamente las externalidades negativas<sup>1</sup> derivadas de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$ . Asimismo, la valoración de la externalidad que realiza la UE es superior a la que realiza EE.UU.

A partir de las funciones de beneficio estimadas, es posible predecir las emisiones de la UE y EE. UU. para el año 2022 y compararlas con las emisiones que, de forma efectiva, realizaron ambos jugadores (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Predicciones y emisiones efectivas

Área geográfica	Predicción 2022		Emisiones 2022	
	UE	EE. UU.	UE	EE. UU.
Emisiones de $\text{CO}_2$	2 911,57	5 194,39	2 761,9	5 057,3
Total emisiones de $\text{CO}_2$ UE y EE. UU.	8 105,96		7 819,2109	

1. Una externalidad negativa es un efecto no deseado que se genera cuando la acción de un agente económico (por ejemplo, una empresa) afecta negativamente a otros, sin que el agente económico que lo ha generado soporte los costes que ha generado a terceros.

Como se observa en la [tabla 5.1](#), las emisiones que predice el modelo, en el caso de que la UE y EE. UU. hubieran perseguido la maximización de beneficios, son superiores a las emisiones efectivas. Es más, si consideramos un nivel de confianza del 90% en las estimaciones realizadas para la predicción, obtenemos que para el caso de la UE el intervalo en el que puede moverse la estimación es [2799,81, 3023,33]. Como puede apreciarse, la emisión efectiva del año 2022 está incluso por debajo del límite inferior de dicho intervalo. Para el caso de EE. UU, ese intervalo es [4981,59, 5407,1] observándose que la emisión del año 2022 está muy cercana a su límite inferior. En definitiva, los datos sugieren que las decisiones adoptadas sobre las emisiones no han estado guiadas exclusivamente por la maximización de los beneficios. Más bien, parece haberse considerado un objetivo adicional que ha influido en que las emisiones reales se sitúen por debajo de las predicciones basadas únicamente en dicho objetivo económico.

## 2. EL UMBRAL DE TOLERANCIA DE LOS CIUDADANOS

Según los datos recogidos por la Comisión Europea (2023) en el Eurobarómetro publicado en julio de 2023, más de la mitad de los europeos considera que tanto la UE, como los gobiernos nacionales y las empresas son los responsables de abordar el cambio climático. Por otra parte, más de ocho de cada diez encuestados piensan que es importante que el gobierno de su país y la UE tomen medidas para mejorar la eficiencia energética de aquí a 2030, por ejemplo, animando a la gente a aislar sus casas, instalar paneles solares o comprar coches eléctricos. Asimismo, el 58% de los ciudadanos de la UE cree que debería acelerarse el uso de fuentes de energía renovables, aumentar la eficiencia energética y acelerar la transición a una economía verde.

Para recoger la preocupación de los ciudadanos reflejada en estos datos, introducimos una nueva función de valoración de las emisiones que representa la percepción de los daños ambientales por los ciudadanos de cada uno de los bloques. Esta valoración, que, para simplificar, la suponemos idéntica para los dos bloques, depende de las emisiones producidas por ambos agentes y de un umbral de tolerancia que representa el nivel de emisiones totales que están dispuestos a aceptar los ciudadanos. Se define como una cuantificación en términos del daño y de la percepción del daño, como en Caraballo *et al.* (2023):

$$P_i(e_1, e_2) = \max \{0, (e_1 + e_2 - K)^\gamma\},$$

donde  $K$  es el umbral de tolerancia con respecto a las emisiones conjuntas. Si no se alcanza el umbral, el daño es nulo. Si se excede el umbral, entonces  $\gamma > 1$  captura el grado en que esto se percibe como un daño. Dado que  $\gamma > 1$ , este término tiene rendimientos crecientes a escala.

Una vez establecidos los objetivos que pueden explicar la divergencia entre las predicciones y las emisiones reales de la UE y EE. UU., reflejada en la [tabla 5.1](#), una forma más realista de estudiar esta situación es introducir en el análisis que ambos jugadores tienen en cuenta tanto los beneficios monetarios derivados de las emisiones como la percepción de daños ambientales para satisfacer las preferencias de los ciudadanos. El elemento clave en este análisis es el hecho de que no es posible comparar en términos monetarios los resultados obtenidos con respecto a ambos objetivos cuando los países actúan estratégicamente, ni existe una manera clara de agregar sus valores. Por este motivo, el enfoque multiobjetivo es más adecuado para estudiar este problema.

En el juego biobjetivo que enfrentan los jugadores, la utilidad de cada uno de ellos tiene dos componentes: los beneficios económicos del juego de emisiones considerado previamente y la percepción de los ciudadanos relativa al daño medioambiental. Un equilibrio en este juego consiste en una situación donde ninguno de los dos jugadores tiene un incentivo claro para cambiar unilateralmente su nivel de emisiones, pues, al hacerlo, disminuiría el beneficio monetario derivado de las emisiones, o bien empeoraría la percepción del daño medioambiental de sus ciudadanos. Esto es, cada uno de los jugadores proporciona una respuesta a las emisiones del otro que es eficiente en relación con los objetivos que considera. Los equilibrios de este juego, según Mármol *et al.* (2017), se determinan estableciendo, para cada jugador y para cada componente de su utilidad, las emisiones que se encuentran entre las mejores respuestas fijadas las emisiones del otro jugador. La relación que existe entre la predicción de las emisiones totales y el umbral de tolerancia es fundamental en la identificación de los posibles resultados de la interacción. La cantidad total de emisiones estimadas, que aparece en la [tabla 5.1](#), constituye un límite superior para la contaminación emitida en los equilibrios del juego biobjetivo.

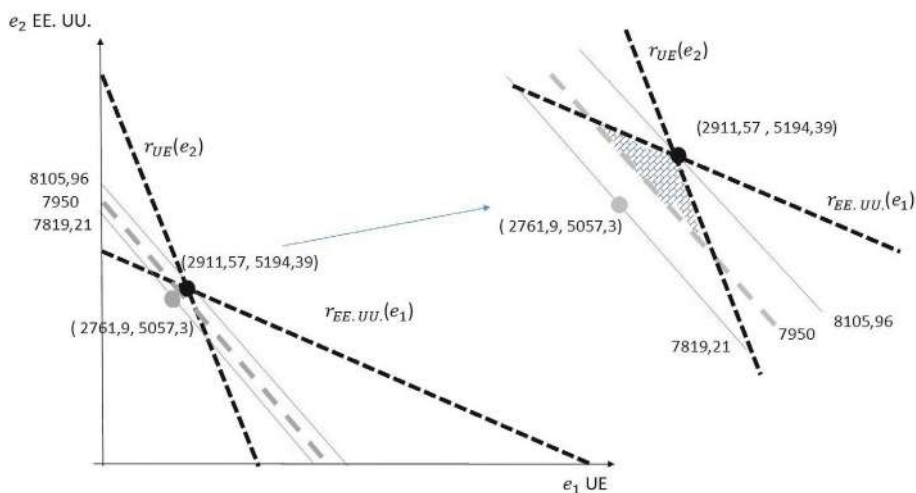
Los equilibrios están condicionados por el nivel de tolerancia. Los ciudadanos son conscientes de que hay que reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ , pero reconocer la necesidad de actuar para mitigarlas no supone que se vaya a actuar de forma responsable con relación al problema.

La falta de consistencia entre actitudes favorables al medioambiente y comportamientos responsables dependen del coste que conlleven. Las actitudes positivas en relación con el medioambiente se expresarían en comportamientos de bajo coste como reciclar, pero no en comportamientos de alto coste como limitar la utilización de productos obtenidos con elevados consumos energéticos, de la energía dedicada a regular la temperatura de la vivienda, o cambios en los hábitos de transporte, dejando de utilizar el vehículo privado y optando por el transporte público. Se trata de iniciativas que afectan a aspectos percibidos como componentes significativos del bienestar. Por ello, son consideradas por muchos como sacrificios excesivos. Además, también debe tenerse en cuenta que, a veces, faltan incentivos claros y accesibles para la adopción de prácticas sostenibles o no se ve claramente cómo estas contribuyen a mejorar la calidad de vida, lo que puede llevar a cierta desmotivación por parte de la ciudadanía. La brecha entre la preocupación, las intenciones y las acciones sigue siendo muy significativa, ya que, si el hecho de renunciar a determinados comportamientos, sustituyéndolos por otros responsables, es percibido como muy costoso, es probable que los ciudadanos no acepten cambiarlos.

A partir de estas consideraciones, analizamos los datos de la predicción de emisiones y de las emisiones efectivas de la UE y EE. UU. en 2022. La predicción del modelo de maximización de los beneficios monetarios sin tener en cuenta la preocupación ciudadana indica un total de emisiones conjuntas de 8105,96. En primer lugar, consideramos un umbral de tolerancia poco exigente,  $K= 7950$ , un nivel cercano a la cantidad de emisiones estimadas.

En la [figura 5.5](#) se representan, en línea discontinua negra, las mejores respuestas de la UE y de EE. UU. a las emisiones de otro respecto la maximización de beneficios ( $r_{UE}$  y  $r_{EE, UU.}$ ) y, en línea discontinua gris, la mejor respuesta de ambos con respecto a la minimización de la función de percepción del daño medioambiental. Para este segundo componente las mejores respuestas de los dos jugadores coinciden. De esta forma, el conjunto de todos los equilibrios del juego biobjetivo está representado en la zona sombreada, ampliada en la parte derecha de la gráfica. Todos estos equilibrios incluyen estrategias con un efecto positivo en la reducción de emisiones respecto a escenarios donde no se tienen en cuenta las preferencias de los ciudadanos.

Asimismo, se pone de manifiesto la situación analizada en la sección anterior, en la que las emisiones pronosticadas, representadas por el punto negro, son mayores que las emisiones efectivas,

Figura 5.5 Equilibrios del juego biobjetivo con  $K=7950$ 

representadas por el punto gris, que no están incluidas en la región de equilibrios del juego biobjetivo. Esto puede deberse a que los ciudadanos muestran una preocupación real con respecto a los niveles de emisión de  $\text{CO}_2$  mayor de la considerada.

Para determinar un umbral de tolerancia que refleje más fielmente esta realidad, se consideran las pretensiones que ambos jugadores manifestaron en el Acuerdo de París. La UE se marcó como meta conseguir en 2030 una reducción del 40% con respecto a las emisiones del año 1990, mientras que EE. UU. señaló la intención de reducir en 2025 sus emisiones un 28% con respecto a las del año 2005. De esta forma, para el año de estudio 2022, la UE señala como umbral de sus emisiones propias 2631,89 y EE. UU., 4672,72, lo que supone un umbral de tolerancia conjunta  $K=7304,53$ .

En la figura 5.6 se observa que las emisiones reales en el año 2022 se encuentran en el conjunto de equilibrios de este nuevo juego biobjetivo. Por tanto, estas emisiones reales, que, como hemos visto, no corresponden al equilibrio del juego con el objetivo inicial, sí corresponden a una situación de equilibrio en un contexto donde, además de considerar los beneficios derivados de las emisiones, también se tiene en cuenta la preocupación de los ciudadanos con respecto al cambio climático que producen las emisiones de gases contaminantes.

A partir de este análisis se puede prever, a medio plazo, una visión más optimista con respecto a la situación medioambiental actual. Como la preocupación y concienciación de la ciudadanía

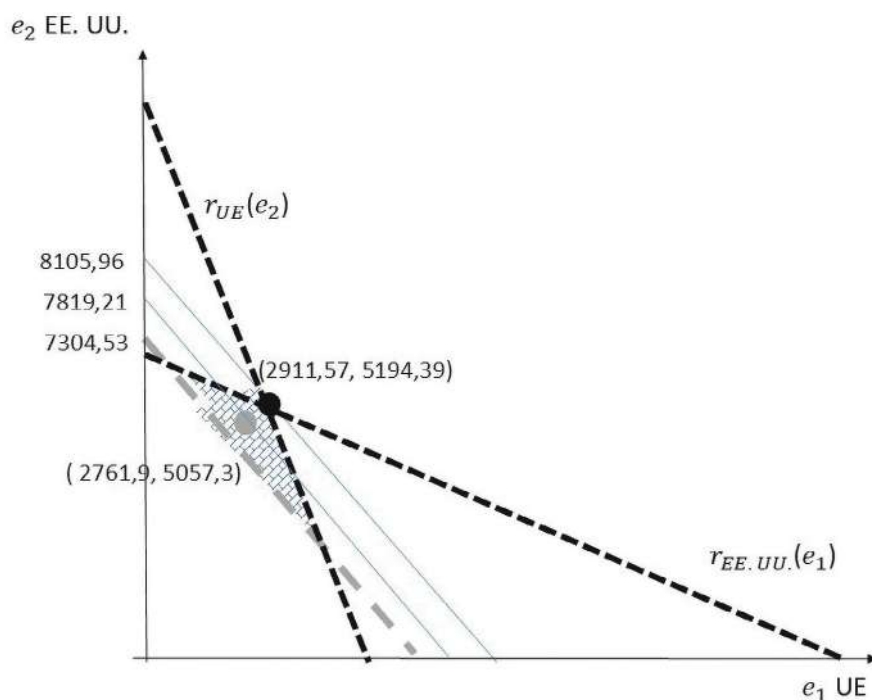


Figura 5.6. Equilibrios del juego biobjetivo con  $K=7304,53$

con respecto a las emisiones de gases contaminantes es cada vez mayor y, como consecuencia de ello, se están llevando a cabo acciones para mitigar el cambio climático, es posible contemplar un escenario en el que el equilibrio del juego biobjetivo sea único. Esto ocurre cuando la percepción de los ciudadanos del daño producido por las emisiones correspondientes a este equilibrio es nula. Es decir, la diferencia entre las emisiones totales en el equilibrio y el umbral de tolerancia es negativa y, por tanto, no se excede el umbral de tolerancia establecido.

## CONCLUSIONES

El informe del IPCC 2023 envía un mensaje claro: el comportamiento actual de los países en términos de emisiones de  $\text{CO}_2$  es insostenible y pone en peligro el futuro del planeta. Se necesitan reducciones profundas, rápidas y sostenidas de las emisiones de gases contaminantes, junto con una mayor financiación para la adaptación y la mitigación, para evitar los peores impactos del cambio climático. La

ventana de oportunidad para la acción climática se está cerrando rápidamente y las decisiones que se tomen en la próxima década serán cruciales para determinar el futuro de la humanidad y del planeta.

Sin embargo, con la victoria de D. Trump en las elecciones presidenciales de 2024, se presenta un panorama de incertidumbre en términos de política ambiental en EE. UU., ya que es conocido por priorizar la independencia energética basada en combustibles fósiles y minimizar la urgencia del cambio climático. Por parte de la UE, el panorama político también presenta unas perspectivas un tanto desalentadoras con respecto al cambio climático, debido a que los nuevos gobiernos de algunos estados de la UE niegan este problema. Por tanto, un enfoque nacionalista y de desregulación podría desacelerar la colaboración internacional en temas climáticos y agravar las tensiones diplomáticas sobre la gobernanza ambiental global.

No obstante, la preocupación social por el cambio climático hace muy difícil la regresión de las medidas que se han ido adoptando a lo largo de los últimos años. Una gran mayoría de los ciudadanos de estas áreas reconoce el cambio climático como un problema al que hacer frente y están de acuerdo en que las emisiones de gases de efecto invernadero deben reducirse al mínimo. En este contexto, las perspectivas a largo plazo sobre la reducción de emisiones dependen de la resistencia de las iniciativas estatales, el sector privado y la presión de la sociedad civil para mantener la transición hacia fuentes de energía más limpias. Por tanto, cuando se analiza el problema hay que tener en cuenta criterios ambientales, técnicos, sociales, políticos y económicos.

En el ámbito de las políticas medioambientales, la teoría de juegos multiobjetivo se presenta como una metodología especialmente útil debido a la naturaleza interdependiente y conflictiva de las decisiones relacionadas con el medioambiente. Esta teoría permite integrar y analizar intereses divergentes entre múltiples agentes, como pueden ser gobiernos, empresas, ONG o ciudadanos que tienen objetivos diversos como reducir emisiones de CO<sub>2</sub>, mantener el crecimiento económico, proteger la biodiversidad y garantizar la justicia social.

En el juego biobjetivo analizado, se han considerado como objetivos los beneficios económicos y la preocupación de la ciudadanía, dado que ambos objetivos influyen significativamente en las decisiones de los gobiernos. Los equilibrios que se identifican indican las estrategias que deben adoptar los jugadores para alcanzar sus objetivos de forma eficiente, lo que conlleva, en la mayoría de los casos, la disminución de las emisiones de gases contaminantes. Esto último

se consigue gracias a la incorporación en el juego de emisiones estándar, analizado en la sección 1, del nuevo objetivo caracterizado por el umbral de tolerancia que los ciudadanos están dispuestos a admitir. De hecho, dado que la satisfacción de las preferencias de los ciudadanos suele ser una cuestión principal para los gobiernos, que necesitan su refrendo en las urnas, una primera conclusión de este estudio es que los gobiernos deberían esforzarse en desarrollar las medidas económicas necesarias para mantener los niveles de contaminación dentro de regiones de tolerancia.

Una conclusión interesante es que existen múltiples equilibrios en los que el valor global agregado de las emisiones es menor que el correspondiente valor obtenido cuando los países actúan exclusivamente por fines económicos. Además, la amplitud del conjunto de equilibrios del juego biobjetivo es inversamente proporcional a la reivindicación de los ciudadanos en relación con los gases emitidos. Es decir, cuanto más relajado sea el nivel de exigencia de la ciudadanía al permitir mayores niveles de contaminación, más reducido será el conjunto de equilibrios.

En este estudio se pone de manifiesto que los juegos multiobjetivo constituyen una metodología adecuada para analizar el comportamiento real de los países con respecto a las emisiones de gases contaminantes, lo que convierte a esta teoría en un enfoque robusto para modelar la interacción estratégica entre distintos agentes que se enfrentan a los desafíos globales del medioambiente, promoviendo actuaciones más equitativas, sostenibles y realistas.

## AGRADECIMIENTOS.

El contenido de este capítulo forma parte de la investigación desarrollada en el marco del proyecto PID2021-124981NB-I00 financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033/FEDER, UE y por «ERDF Una manera de hacer Europa».

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Caraballo M. A., Zapata A., Monroy L. y Mármol, A. M. (2023): «Environmental damage reduction: when countries face conflicting objectives», en P. Cappanera, M. Lapucci, F. Schoen, M. Sciandrone, F. Tardella y F. Visintin (eds.), *Optimization and Decision Science: Operations Research, Inclusion and Equity*. Cham: Springer Series, 9, 27-35.

- Comisión Europea (2023): *Special Eurobarometer 538. Climate Change*. Web oficial de la Unión Europea.
- European Social Survey: <https://www.europeansocialsurvey.org/>.
- General Social Survey: <https://gss.norc.org/>.
- Global Carbon Project: <https://www.globalcarbonproject.org/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021): *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Web oficial del Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023): *Climate Change 2023, Synthesis Report. Summary for Policymakers*. Web oficial del Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Mármol, A. M., Monroy, L., Caraballo, M. A. y Zapata, A. (2017): «Equilibria with vector-valued utilities and preference information. The analysis of a mixed duopoly», *Theory and Decision*, 83, 365-383.
- Pew Research Center (2021): *In response to climate change, citizens in advanced economies are willing to alter how they live and work*. Web oficial del Pew Research Center.
- Zapata, A., Mármol, A. M., Monroy, L. y Caraballo, M. A. (2024): «Altruistic preferences in global emission games», *Central European Journal of Operations Research*, 32, 843-864.



# La integración de factores económicos, sociales y ambientales en la toma de decisiones en el mundo empresarial

FRANCISCO SALAS MOLINA  
*Universidad Politécnica de Valencia*

DAVID PLA SANTAMARÍA  
*Universidad Politécnica de Valencia*

MARISA VERCHER FERRÁNDIZ  
*Universidad Politécnica de Valencia*

## INTRODUCCIÓN

La teoría económica tradicional se centra en la optimización de un único criterio, pero, en la práctica, nos encontramos con situaciones en las que debemos equilibrar diferentes objetivos en conflicto (Ballester y Romero, 1998). Por ejemplo, al tomar decisiones económicas, a menudo debemos considerar tanto el precio como la calidad, la rentabilidad junto con el riesgo o el coste en relación con el impacto ambiental. La realidad económica es multidimensional y compleja, por lo que es necesario considerar una perspectiva más amplia.

Es lógico, entonces, plantear la idea de una economía que no se centre exclusivamente en los objetivos económicos, sino que también

tenga en cuenta otros aspectos importantes. Esto implica una aproximación que reconozca la interconexión entre los aspectos económicos, sociales y ambientales de nuestras decisiones y actividades. De esta manera, podemos desarrollar un enfoque más equilibrado que promueva el bienestar y la sostenibilidad, no solo en términos económicos, sino también en términos sociales y medioambientales.

A partir de este planteamiento inicial, este trabajo propone una definición sencilla de la economía multicriterio como aquella en la que al menos uno de sus agentes toma decisiones considerando dos o más criterios (Salas-Molina, 2021). Lo que no resulta tan evidente es: ¿qué conjunto de criterios debemos usar? ¿Qué modelo de decisión es capaz de representar mejor el efecto de las posibles decisiones? ¿Qué método de selección de las mejores alternativas es el más adecuado? En este trabajo se ofrece una respuesta a estas tres preguntas, las cuales conforman un planteamiento lógico para abordar los problemas económicos desde una perspectiva multicriterio.

El objetivo último de este planteamiento multicriterio de la economía es dotar a los agentes económicos de herramientas para abordar la complejidad inherente a los problemas económicos en un contexto multidimensional. Este planteamiento facilita que los agentes económicos puedan tomar decisiones con una mayor justificación, puesto que estas están basadas no en un único criterio, sino en todos aquellos que se consideren relevantes.

## 1. ELEMENTOS ESENCIALES DE UNA ECONOMÍA MULTICRITERIO

De acuerdo con este planteamiento inicial, la economía multicriterio es una aproximación que reconoce la complejidad inherente a la toma de decisiones económicas al considerar la existencia de múltiples objetivos que pueden estar en conflicto o no. A diferencia de la teoría económica tradicional, que generalmente busca optimizar un único criterio, la economía multicriterio plantea la necesidad de integrar varios criterios para reflejar mejor la realidad multidimensional de las decisiones económicas. Este enfoque permite tener en cuenta no solo los aspectos económicos, sino también otros factores como el bienestar social y el impacto ambiental, lo que facilita adoptar una visión más global y equilibrada. En este sentido, la economía multicriterio se articula a través de tres elementos esenciales: un conjunto coherente de criterios, un modelo económico adecuado y un método multicriterio para seleccionar las mejores soluciones (Salas-Molina, 2021).

## 1.1. Un conjunto coherente de criterios

El primer paso en la economía multicriterio es identificar los criterios relevantes que guiarán la toma de decisiones. Estos criterios pueden ser diversos y dependerán del contexto en el que se desarrolle la decisión. En una situación de inversión, por ejemplo, algunos de los criterios más comunes podrían ser la rentabilidad, el riesgo y la liquidez. Sin embargo, en otros contextos económicos, como la producción industrial, también pueden incluirse, además de aspectos como la eficiencia económica, otros aspectos como la sostenibilidad ambiental o la creación de empleo. La clave es construir un conjunto coherente de criterios que representen de manera adecuada los diferentes aspectos que afectan la decisión.

Este conjunto de criterios debe tener tres características fundamentales: exhaustividad, cohesión y no redundancia (Roy, 1996):

- *Exhaustividad.* Se entiende que los criterios seleccionados para afrontar un problema económico cumplen la condición de exhaustividad cuando abarcan todas las dimensiones importantes del problema de decisión, sin dejar de lado aspectos relevantes. En un problema de inversión, por ejemplo, se ha venido aceptando que los criterios relevantes son la rentabilidad, el riesgo y la liquidez. Sin embargo, en los últimos años, la sostenibilidad de las alternativas de inversión se añade como otro criterio importante que hay que tener en cuenta. En este sentido, se puede afirmar que un inversor que, junto a la rentabilidad, el riesgo y la liquidez, considere la sostenibilidad como un criterio relevante está siendo más exhaustivo que otro que no lo haga. De alguna manera, la exhaustividad del conjunto de criterios seleccionados debe minimizar la pérdida de información que cualquier modelo implica con respecto a la realidad que intenta representar.
- *Cohesión.* La cohesión en la selección de criterios implica que los distintos criterios que se utilizan para tomar una decisión deben ser compatibles entre sí, de modo que sus efectos se puedan evaluar de manera coherente en conjunto. Esto significa que, si una alternativa mejora uno de los criterios sin empeorar otros, debe ser preferida a otra alternativa que empeore un criterio sin mejorar otros. Por ejemplo, una empresa energética está considerando dos alternativas de inversión: una planta solar y una planta de gas. Supongamos que tanto la planta solar como la de gas ofrecen la misma rentabilidad a largo plazo. Sin embargo, parece claro que la

planta solar tendrá un impacto ambiental bajo mientras que la planta de gas tendrá impacto ambiental más elevado por la emisión de gases a la atmósfera. La cohesión de los criterios de rentabilidad e impacto está garantizada si ante esta situación la alternativa preferida es la planta solar. Si añadimos en nuestro análisis un tercer criterio como puede ser la creación de empleo y resulta que, por cuestiones de mantenimiento, la planta de gas implica la creación de más puestos de trabajo que la planta solar, la cohesión no estaría garantizada si en estas circunstancias, y asumiendo el mismo peso en la decisión para todos los criterios, la alternativa preferida continuara siendo la planta solar. Esto es así porque, en el segundo caso, tenemos dos objetivos en conflicto: el impacto ambiental y la creación de empleo. Una alternativa, la planta solar, es mejor en impacto ambiental pero peor en creación de empleo. La otra alternativa, la planta de gas, es peor en impacto ambiental, pero mejor en creación de empleo. Ante esta situación, la selección final depende de la importancia dada a cada criterio por el decisor, es decir, depende de los pesos que cada criterio tiene en la decisión, pero en ningún caso podría descartarse alguna de las dos alternativas sin que la cohesión se viera comprometida dado que los efectos de los criterios no se estarían evaluando de manera coherente en su conjunto.

- *No redundancia*. Un conjunto de criterios es no redundante cuando excluir algún criterio implica infringir la exhaustividad o la cohesión. Supongamos que el país está analizando tres criterios para decidir entre la construcción de una planta de energía nuclear o una planta eólica. Se utilizan los criterios de rentabilidad de la inversión, seguridad de las instalaciones e impacto ambiental. Imaginemos que la rentabilidad de la inversión es la misma para las dos plantas y que el impacto ambiental es, en ambos casos, reducido por la ausencia de emisiones de gases a la atmósfera. En esta situación, excluir el criterio de seguridad de las instalaciones compromete tanto la exhaustividad, por no considerar todos los criterios que son relevantes, como la cohesión, porque la exclusión implicaría que las dos alternativas son equivalentes, cuando en realidad la eólica parece mejor que la nuclear en la situación planteada por motivos de seguridad. Por otro lado, dos medidas de rentabilidad diferentes

que establecieran la misma valoración para las dos alternativas consideradas sería claramente una redundancia.

## 1.2. Un modelo económico

El segundo elemento esencial de la economía multicriterio es el desarrollo de un modelo económico que sea capaz de representar el efecto de las diferentes decisiones posibles en relación con los criterios seleccionados. Este modelo debe integrar las múltiples dimensiones del problema de decisión y, a su vez, proporcionar una representación clara de las interacciones y compensaciones entre los distintos criterios.

Un modelo económico multicriterio típico podría incluir una función de utilidad o bienestar que capture las preferencias del decisor sobre los diferentes criterios. Este tipo de modelos permite valorar cada alternativa de decisión según su rendimiento en cada uno de los criterios, asignando pesos a estos de acuerdo con su importancia relativa. Así, se puede lograr una representación más fiel de la complejidad de la decisión económica, en la que se consideran las interrelaciones entre los aspectos económicos, sociales y ambientales.

La idea principal es que, al usar un modelo económico, quien toma las decisiones puede prever cómo afectarán sus decisiones a las variables clave. En este sentido, ayuda a predecir los resultados de una decisión según un conjunto coherente de criterios. En otras palabras, el modelo económico muestra cómo las diferentes decisiones influyen en los criterios que se están considerando.

Probablemente, el modelo económico más utilizado en la toma de decisiones multicriterio es el modelo de selección de carteras de Markowitz (1952). Su objetivo es ayudar a los inversores a crear carteras que maximicen el retorno esperado y minimicen el riesgo. La idea clave es que no basta con observar el rendimiento individual de las inversiones, sino que también es importante conocer cómo se comportan en conjunto considerando su correlación para reducir el riesgo. En otras palabras, el modelo sugiere que los inversores deben diversificar sus activos para reducir el riesgo. Por ejemplo, si una inversión va mal, otras inversiones en la cartera podrían compensar esas pérdidas. Markowitz mostró que es posible encontrar un equilibrio óptimo entre riesgo y retorno, lo que se conoce como la frontera eficiente, es decir, el conjunto de carteras que ofrece el mayor retorno posible para un nivel determinado de riesgo.

El modelo de Markowitz puede considerarse como un modelo microeconómico en la medida en que ayuda a tomar decisiones a un único inversor. Otros modelos económicos pueden ayudar a tomar decisiones de tipo macroeconómico, como aquellas que tienen que ver con el estudio de la economía a gran escala, analizando fenómenos globales como el crecimiento económico por la variación del Producto Interior Bruto (PIB), la inflación y el desempleo, con el objetivo de entender el funcionamiento de las economías nacionales. En este sentido, algunos autores han propuesto un modelo económico de equilibrio general para determinar una frontera de combinaciones de crecimiento económico e inflación que representan compromisos entre el crecimiento económico y la tasa de inflación (André, Cardenete y Romero, 2008). Este modelo de equilibrio general es, probablemente, más complejo que el modelo de Markowitz, pero ambos cumplen el mismo papel central en una economía multicriterio: describir el impacto de las decisiones en el conjunto de criterios importantes para un único decisor en una economía multicriterio.

### **1.3. Un método multicriterio para obtener las mejores soluciones**

Finalmente, una vez definidos los criterios y desarrollado el modelo económico, es necesario aplicar un método de selección adecuado para identificar las mejores alternativas. Hay una gran variedad de métodos en la teoría de la decisión multicriterio, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1980) o la selección de alternativas de la frontera eficiente o frontera de Pareto. Estos métodos permiten seleccionar las alternativas de decisión basándose en la evaluación de estas de acuerdo con distintos criterios.

Además de ser un método gráfico y, por tanto, más fácil de entender, una de las grandes ventajas de la construcción de la frontera eficiente es que permite abordar un problema de economía multicriterio en dos fases. En la primera fase, se construye la frontera eficiente, descartando todas aquellas alternativas que no pertenecen a la frontera y que, por tanto, no son una buena elección. Se descartan porque siempre será posible encontrar una alternativa que sea mejor en alguno de los criterios considerados y que, lógicamente, pertenecerá a la frontera eficiente. En la segunda fase, se procede a seleccionar una de las alternativas de la frontera eficiente de acuerdo con el peso asignado por el decisor a cada uno de los criterios considerados.

Como ejemplo, consideremos el caso de una empresa que está evaluando diferentes proyectos de inversión en nueva maquinaria para sus procesos de producción. Como es lógico, la empresa considerará el criterio económico, medido, por ejemplo, por el beneficio anual que le va a producir cada una de las alternativas consideradas. Por otro lado, la empresa está preocupada por el impacto ambiental de sus operaciones productivas. Quizá esté pensando, de manera indirecta, en los posibles beneficios fiscales o las ayudas que podrá obtener por impulsar proyectos que contribuyan a frenar el cambio climático. Pero no vayamos tan lejos en nuestros razonamientos y asumamos que realmente los dos criterios que son realmente relevantes para esta empresa son el beneficio económico anual y la reducción del impacto ambiental que conseguirán tras acometer un proyecto de inversión.

La medida del beneficio económico anual no ofrece demasiados problemas, ya que se trata de una práctica habitual y muy extendida dentro del mundo empresarial. La estimación de todos los flujos económicos asociados a la inversión y su vida útil son elementos suficientes para establecer el beneficio económico esperado para cada alternativa de inversión. Por otro lado, la reducción en el impacto ambiental se puede medir, entre otras muchas formas, por la variación de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Es lo que habitualmente se conoce con el nombre de la huella de carbono, cuya metodología permitiría establecer el impacto ambiental de cada alternativa de inversión y, en última instancia, la reducción del impacto ambiental respecto a la situación de partida.

Una vez hecha la medida tanto del beneficio anual como de la reducción del impacto ambiental de las alternativas de inversión, estamos en condiciones de construir la frontera eficiente de alternativas. Como se apuntaba anteriormente, se trata de un método gráfico y, para evitar posibles problemas de escala entre las diferentes medidas de los criterios, conviene normalizar las medidas. No tendría demasiado sentido medir los beneficios en miles de euros y la reducción del impacto ambiental en porcentajes de variación porque la escala sería tan diferente que el análisis gráfico perdería todo su sentido. Una buena forma de normalizar las diferentes medidas de los criterios es realizar una transformación, de manera que las nuevas evaluaciones queden restringidas a una escala común situada entre cero y uno. El cero se corresponderá con la alternativa con menor beneficio (o menor reducción del impacto ambiental) y el uno lo hará con la alternativa con mayor beneficio (o mayor reducción del impacto ambiental).

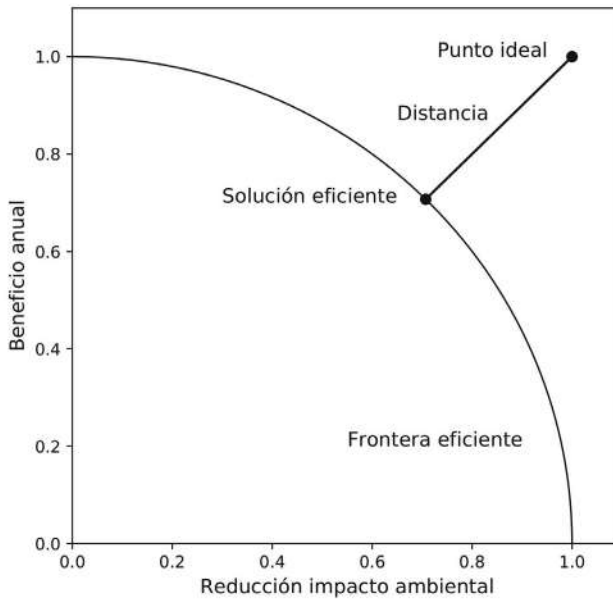


Figura 6.1. Una frontera eficiente en un espacio normalizado económico y ambiental

Después de la normalización, se descartarán todas las alternativas dominadas. Diremos que una alternativa es no-dominada cuando no es posible encontrar una alternativa mejor en uno de los criterios sin empeorar alguno de los otros criterios considerados. De lo contrario se trata de una alternativa dominada. Es decir, una alternativa es dominada cuando es posible encontrar una alternativa con mejor desempeño en cualquiera de los criterios considerados sin empeorar el desempeño en el resto de los criterios. Por ejemplo, en el espacio bidimensional normalizado de la [figura 6.1](#), que mide el beneficio económico en el eje vertical y la reducción del impacto ambiental en el eje horizontal, una alternativa con un beneficio de 0.6 y una reducción de 0.4 está dominada por una alternativa con beneficio 0.7 y reducción 0.7. También estaría dominada por una alternativa con beneficio 0.6 y reducción 0.7 y por una alternativa con beneficio 0.7 y reducción 0.4.

Una vez descartadas todas las alternativas dominadas, aquellas que han sobrevivido a la criba formarán el conjunto de soluciones eficientes o, dicho de otro modo, la frontera eficiente. Recibe este nombre porque más allá de la frontera eficiente no se puede llegar, es decir, no hay ninguna alternativa factible que pueda conseguir un mayor beneficio sin incurrir en una menor reducción del impacto ambiental o que pueda conseguir una mayor reducción del impacto ambiental sin incurrir en una reducción del beneficio.

Lo que sí existe es un punto ideal, que sirve como faro al que dirigirse o diana a la que apuntar, y que puede ser tremendamente útil para seleccionar las mejores alternativas de la frontera eficiente de acuerdo con la importancia que el decisor da a cada uno de los criterios considerados. Continuando con nuestro ejemplo de la [figura 6.1](#) y por simplicidad, asumamos que el decisor es neutral respecto a la importancia del beneficio económico y la reducción del impacto ambiental. En otras palabras, la empresa que está evaluando las alternativas de inversión que están situadas en la frontera eficiente da la misma importancia al beneficio económico que a la reducción del impacto ambiental. En esta situación el punto (1,1) representa el punto de máximo beneficio y de máxima reducción del impacto ambiental. Claramente este punto es inviable, no alcanzable, porque está situado más allá de la frontera eficiente en el sentido del grado consecución creciente de los criterios considerados. Sin embargo, puede servir de referencia para seleccionar una o varias de las alternativas que pertenecen a la frontera eficiente. ¿Y cómo podemos hacer esta selección? Parece claro que una buena estrategia para hacer la selección final es mediante el uso del concepto de distancia. Para ello podemos recurrir a un axioma de selección como el siguiente: las alternativas que están más próximas al punto ideal son mejores que aquellas que están más lejos (Zeleny, 1973). Sencillo, pero realmente útil. Si nuestra intención es seleccionar uno de los puntos de la frontera eficiente, parece razonable medir las distancias de todos esos puntos al punto ideal y seleccionar aquel punto que presente la mínima distancia.

Pero funciones de distancia hay muchas. Todos hemos aprendido desde pequeños que la distancia más corta entre dos puntos en el plano es la línea recta que los une. Esta afirmación se corresponde con el significado de la distancia euclídea. Sin embargo, hay otras muchas distancias que pueden resultar útiles en nuestro objetivo de seleccionar una de las alternativas que pertenecen a la frontera eficiente. Por ejemplo, la distancia Manhattan se calcula como la suma de la desviación horizontal y vertical entre dos puntos cualquiera del espacio, tal como se muestra en la [figura 6.2](#).

Se llama Manhattan por la imposibilidad de ir de una esquina de un rascacielos de Manhattan a su esquina opuesta atravesando el edificio en línea recta, sino que necesariamente has de recorrer una acera hasta la esquina contigua y luego otra acera hasta la esquina opuesta. Por otro lado, la distancia de Chebyshev se define como el valor máximo entre las desviaciones horizontales y verticales entre dos puntos.

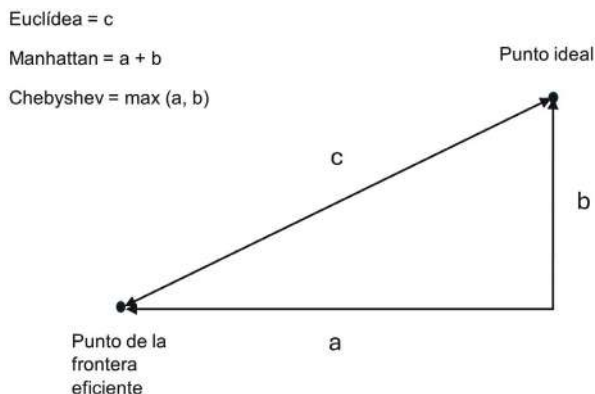


Figura 6.2. Distancias en un espacio bidimensional

La elección de la función de distancia para seleccionar un punto de la frontera eficiente es crucial por las implicaciones que se derivan desde el punto de vista del decisor. La minimización de la distancia Manhattan implica que el decisor está aplicando el principio de máxima eficiencia (González Pachón y Romero, 2016; Romero, 2001). Esto es así porque al minimizar la distancia Manhattan, es decir, la suma de  $a$  y  $b$  en la figura 6.2, al decisor le da igual el valor de  $a$  y  $b$  con tal de que la suma sea mínima. En el contexto de una decisión bicriterio, conviene recordar que  $a$  y  $b$  representan las desviaciones en el grado de consecución de los dos criterios tomados de manera independiente respecto al punto ideal. Aplicando el principio de máxima eficiencia, el hecho de que  $a$  y  $b$  sean muy distintas, reflejando el hecho de que uno de los criterios esté muy alejado del punto ideal mientras que el otro esté muy cercano, es irrelevante si la distancia es efectivamente la mínima de entre todas las alternativas. Esta circunstancia tiene sus consecuencias porque alguno de los criterios podría verse injustamente tratado. Por ejemplo, volviendo al ejemplo de la figura 6.1, los puntos  $(1, 0)$  y  $(0, 1)$  presentan la misma distancia Manhattan respecto al punto ideal  $(1, 1)$  que actúa como referencia. Ambas alternativas son igualmente buenas (en realidad, malas) desde el punto de vista de la distancia Manhattan. Sin embargo, parece claro que se trata de puntos extremos, poco equilibrados en términos del grado de consecución de los criterios económicos y ambientales. El punto  $(1, 0)$  representa el grado máximo de consecución ambiental y el mínimo económico y el punto  $(0, 1)$  justo a la inversa. Por este motivo, el uso de la distancia Manhattan tiende a ofrecer soluciones poco equilibradas. En el caso de decisiones en grupo, en las que uno de los criterios (por ejemplo, el económico) es defendido por un grupo de interés y otro de los criterios

(el ambiental) es defendido por otro grupo de interés, las soluciones poco equilibradas no son probablemente las mejores soluciones.

De la misma manera, la minimización de la distancia de Chebyshev implica que el decisor está aplicando el principio de máxima justicia. Si aplicamos la distancia de Chebyshev, es decir, el valor máximo entre las desviaciones  $a$  y  $b$  en la [figura 6.2](#), nos enfrentamos al caso opuesto al de la distancia Manhattan. Al minimizar el valor máximo de  $a$  y  $b$ , se tratará de buscar aquellas alternativas con valores muy similares de  $a$  y  $b$ , tendiendo a producir soluciones más equilibradas. Se suele decir, en este caso, que se aplica el criterio minimax, porque se trata de minimizar el valor máximo de las desviaciones respecto al punto ideal. Y esto se producirá cuando los valores de los grados de consecución de los criterios son iguales o muy parecidos. Esto es así porque, en situaciones de conflicto entre criterios, el aumento del grado de consecución de un criterio viene normalmente asociado con el decremento del grado de consecución de otro criterio. En la [figura 6.1](#), aplicando la distancia de Chebyshev, el punto intermedio aproximado  $(0.7, 0.7)$ , es una mejor solución que el punto  $(0.4, 0.9)$  y este último es mejor que el punto  $(0, 1)$  porque el valor máximo de las desviaciones horizontales y verticales respecto al punto ideal  $(1, 1)$  en cada uno de los tres casos son crecientes e iguales a 0.3, 0.6, y 1, respectivamente. En conclusión, se dice que el uso de la distancia de Chebyshev para seleccionar alternativas de la frontera eficiente implica el uso del principio de máxima justicia porque no se discrimina ningún criterio en aras de una mayor eficiencia, sino que el grado de consecución de todos los criterios deben estar equilibrado.

Por último, el uso de la distancia euclídea, al minimizar la desviación cuadrática global, puede considerarse como una elección intermedia entre el principio de máxima eficiencia de la distancia Manhattan y el principio de máxima justicia de la distancia de Chebyshev.

## **2. EL RECICLAJE DE MATERIALES TEXTILES DESDE UNA PERSPECTIVA MULTICRITERIO**

La industria textil es una de las más contaminantes del mundo, ocasionado problemas ambientales como el consumo excesivo de agua, la emisión de gases de efecto invernadero y la generación masiva de residuos (Salas-Molina *et al.*, 2020). La producción de tejidos convencionales, como el algodón y el poliéster, implica un elevado consumo de recursos naturales como las reservas hídricas y de

petróleo. Frente a este desafío, los materiales textiles reciclados emergen como una alternativa para mitigar el impacto ambiental. Al reutilizar fibras provenientes de desechos textiles y plásticos, se reduce la necesidad de recursos naturales, disminuyen las emisiones asociadas a la producción y se fomenta un modelo de economía circular. Adoptar esta solución no solo contribuye a preservar el medio ambiente, sino que también impulsa una transformación sostenible en el sector de la moda.

La industria textil puede afrontar el problema de la fabricación de sus productos desde una perspectiva tradicional, centrada únicamente en la maximización de los beneficios económicos, o también puede tratar solucionar el problema desde una perspectiva global, considerando no solo los aspectos económicos de la producción, sino también los ambientales.

Como ejemplo de un enfoque multicriterio para resolver problemas económicos, supongamos que un productor debe decidir la cantidad de producto a fabricar tanto de materiales convencionales como de materiales reciclados. Supongamos también que, debido a la tecnología actual de reciclado, resulta menos costoso producir materiales convencionales que reciclados. Esta circunstancia hace que el beneficio económico que se puede conseguir con los materiales convencionales es superior al obtenido con los reciclados. Por otro lado, diferentes estudios muestran cómo el impacto ambiental de los materiales reciclados es menor que el producido por los convencionales (Esteve-Turrillas y de La Guardia, 2019). Por tanto, el beneficio ambiental que se obtiene de la producción de materiales reciclados es mayor que el obtenido por la producción de materiales convencionales. En resumen, los materiales convencionales ofrecen a la industria textil un mayor beneficio económico pero un menor beneficio ambiental y, a la inversa, los materiales reciclados ofrecen un mayor beneficio ambiental, pero un menor beneficio económico. Ante esta situación de conflicto entre los criterios económicos y ambientales, la industria textil debe buscar una solución que combine los aspectos económicos y ambientales en sus decisiones de producción. Para ello, puede utilizar la técnica de decisión multicriterio de la programación compromiso (Zeleny, 1973).

Supongamos que un fabricante de prendas de vestir está considerando distintos planes de producción alternativos que combinan tanto materiales convencionales como reciclados. Después de una evaluación cuantitativa de los beneficios económicos y ambientales de los diferentes planes, ha construido la frontera eficiente en un espacio normalizado tal como se muestra en la [figura 6.3](#). La

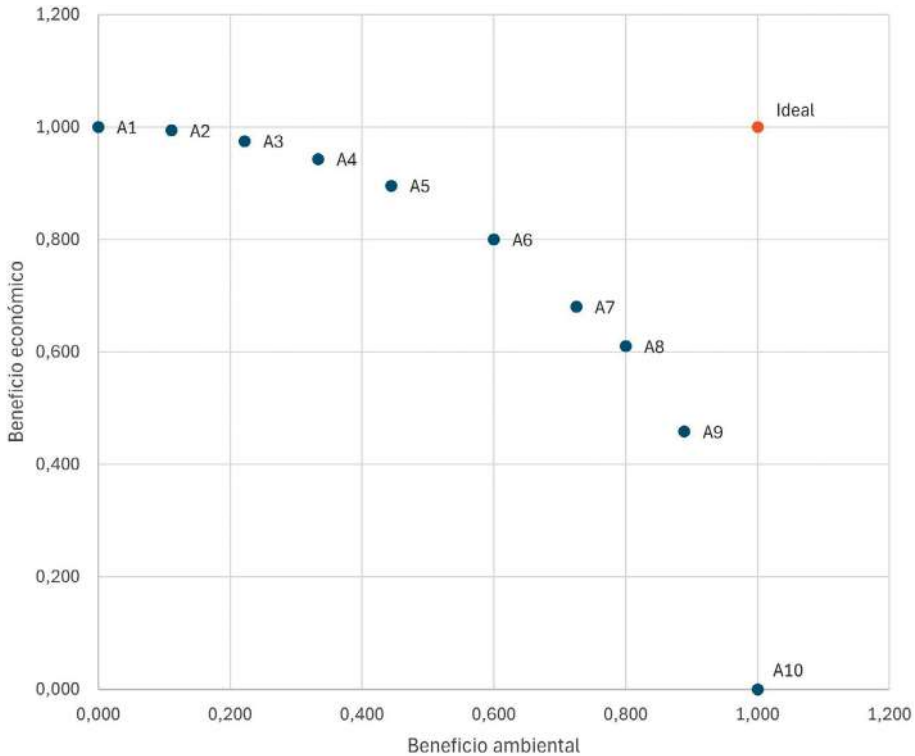


Figura 6.3. Alternativas de producción de materiales convencionales y reciclados

alternativa A1 se corresponde con un plan de producción donde solo se utilizan materiales convencionales. Por tanto, el beneficio económico es máximo, pero el ambiental es mínimo. En el otro extremo de la frontera eficiente, la alternativa A10 supone la producción única de materiales reciclados y, por tanto, presenta un beneficio ambiental máximo y un beneficio económico mínimo. El resto de las alternativas representan planes de producción intermedios en los que se combinan, en distintas proporciones, los materiales convencionales y reciclados.

Por pertenecer a la frontera eficiente, ninguna de las alternativas puede descartarse a priori. De acuerdo con sus preferencias por los aspectos económicos y ambientales, el productor se decantará por una de las alternativas. Para tomar esta última decisión, el método de la programación compromiso plantea un axioma de selección muy sencillo basado en el punto ideal como referencia para la selección de alternativas. El axioma nos indica que las alternativas que están más próximas al punto ideal son mejores que aquellas

que están más lejos. Tal como se ha mencionado con anterioridad, el punto ideal es aquel donde se obtiene, de manera independiente, el mayor beneficio económico y ambiental. En la [figura 6.3](#), se corresponde con el punto (1, 1).

De acuerdo con el axioma de selección planteado, parece claro que las alternativas situadas en el extremo de la frontera eficiente, como la A1 y la A10, no parecen las más adecuadas por estar más alejadas que el resto del punto ideal. Sin embargo, para realizar la selección de la mejor alternativa es necesario definir una función de distancia. La función de distancia de uso más habitual es la euclídea, pero hay otras funciones de distancia que permiten integrar en el proceso de decisión ciertos principios que pueden representar la forma de tomar decisiones de las personas o los grupos implicados. Conviene recordar que el uso de la distancia Manhattan está asociada con el principio de máxima eficiencia, al considerar solo la suma de desviaciones con independencia de las desviaciones de cada criterio. Por otro lado, la distancia de Chebyshev implica la utilización del principio de máxima justicia en el que el aspecto determinante es la desviación máxima para la selección de la alternativa. Finalmente, la distancia euclídea puede considerarse como una elección intermedia entre los principios de máxima eficiencia y de máxima justicia. En la [tabla 6.1](#), se muestran las alternativas consideradas en el ejemplo de la [figura 6.1](#), los beneficios económicos y ambientales y los valores de los tres tipos de distancias consideradas.

Tabla 6.1. Alternativas de producción de materiales convencionales y reciclados

Alternativa	Beneficio ambiental	Beneficio económico	Distancia Euclídea	Distancia Manhattan	Distancia Chebyshev
A1	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000
A2	0,111	0,994	0,889	0,895	0,889
A3	0,222	0,975	0,778	0,803	0,778
A4	0,333	0,943	0,669	0,724	0,667
A5	0,444	0,896	0,565	0,660	0,556
A6	0,600	0,800	0,447	0,600	0,400
A7	0,725	0,680	0,422	0,595	0,320
A8	0,800	0,610	0,438	0,590	0,390
A9	0,889	0,458	0,553	0,653	0,542
A10	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Una exploración sencilla permite identificar cuáles son las alternativas que presentan las distancias mínimas respecto al punto ideal como argumento para la selección de la mejor alternativa de acuerdo con la técnica de la programación compromiso. De acuerdo con las distancias euclídea y de Chebyshev, la mejor alternativa es la A7, mientras que utilizando la distancia Manhattan sería la A8. Tal como se ha mencionado con anterioridad, la utilización de la distancia Manhattan puede llevar a la selección de alternativas con un grado de consecución de los objetivos planteados menos equilibrado que otro tipo de distancias. Sin embargo, se puede apreciar que la diferencia entre la alternativa A7 y la A8 medida por la distancia Manhattan no es demasiado grande, con lo que distintos principios de decisión apuntan hacia una misma zona de la frontera eficiente. En cualquier caso, parece claro que las alternativas más alejadas del punto ideal quedarían descartadas.

Por simplicidad, en la selección final por proximidad al punto ideal del ejemplo de la industria textil no se ha tenido en cuenta la preferencia por el objetivo económico o ambiental del decisor. Podría haberse hecho incluyendo pesos en las funciones de distancia, de manera que se ponderen las desviaciones de acuerdo con las preferencias del decisor. Por ejemplo, un mayor peso para el objetivo económico implicaría que las mejores alternativas estarían situadas más próximas a la esquina superior izquierda de la [figura 6.3](#). Es decir, en la zona donde el beneficio económico de las alternativas es mayor. Sin embargo, un mayor peso para el objetivo ambiental supondría que las mejores alternativas se desplazarían hasta aquellas situadas en la esquina inferior derecha, coincidiendo con la zona en la que el beneficio ambiental es más alto.

## CONCLUSIONES

La realidad que nos rodea es compleja y multidimensional y, por lo tanto, utilizar herramientas para tomar decisiones basadas en un único criterio no parece una buena estrategia. Las decisiones que se toman en el ámbito económico no son una excepción y conviene utilizar técnicas de decisión multicriterio, como la programación compromiso, que faciliten la selección de las mejores alternativas desde un punto de vista global. Este tipo de técnicas ayuda a realizar un análisis más profundo y a tomar decisiones más responsables que integran las necesidades económicas con las sociales y ambientales, abriendo camino hacia un desarrollo más equilibrado y sostenible.

Cuando en economía surge el conflicto de intereses, es necesario llegar a un equilibrio entre los diversos objetivos. Un enfoque multicriterio destaca la importancia de encontrar un balance entre objetivos con independencia de que se trate de una decisión individual o en grupo. En el caso concreto de la industria textil, y por extensión, de cualquier tipo de industria, la teoría de la decisión multicriterio no solo facilita la toma de decisiones, sino que supone también un impulso hacia la sostenibilidad a través de la integración de los criterios ambientales en las decisiones económicas de las empresas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, F. J., Cardenete, M. A. y Romero, C. (2008): «Using compromise programming for macroeconomic policy making in a general equilibrium framework: theory and application to the Spanish economy», *Journal of the Operational Research Society*, 59(7), 875-883.
- Ballestero, E. y Romero, C. (1998): *Multiple criteria decision making and its application to economic problems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Esteve-Turrillas, F. A. y de La Guardia, M. (2017): «Environmental impact of recover cotton in textile industry», *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 107-115.
- González-Pachón, J., y Romero, C. (2016): «Bentham, Marx and Rawls ethical principles: In search for a compromise» *Omega*, 62, 47-51.
- Markowitz, H. (1952): «Portfolio selection», *Journal of Finance*, 7(1), 77-91.
- Romero, C. (2001): «A note on distributive equity and social efficiency», *Journal of Agricultural Economics*, 52(2), 110-112.
- Roy, B. (1996): *Multicriteria methodology for decision aiding*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Saaty, T.L. (1980): *The analytic hierarchy process*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Salas-Molina, F. (2021): «A formal specification of multicriteria economics», *Operational Research*, 21(4), 2627-2650.
- Salas-Molina, F., Pla-Santamaria, D., Vercher-Ferrándiz, M. L. y Reig-Mullor, J. (2020): «Inverse Malthusianism and recycling economics: The case of the textile industry», *Sustainability*, 12(14), 5861.
- Zeleny, M. (1973): *Multiple criteria decision making*. Columbia: University of South Carolina Press.

# La reasignación de derechos de agua como un problema multicriterio

MARÍA DEL MAR BORREGO MARÍN  
*Universidad de Sevilla*

AMPARO MÁRMOL CONDE  
*Universidad de Sevilla*

VICTORIANA RUBIALES CABALLERO  
*Universidad de Sevilla*

MIGUEL ÁNGEL HINOJOSA RAMOS  
*Universidad Pablo de Olavide*

## INTRODUCCIÓN

Los últimos años hidrológicos en España se han caracterizado por ser años secos. En particular, el año hidrológico 2022-2023 en Andalucía ha sido el más cálido y el quinto más seco de su serie histórica (desde 1961) (AEMET, 2023). Como consecuencia, la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG), que es la demarcación que abarca el mayor ámbito territorial en Andalucía, presentó un déficit de precipitaciones en la cuenca del 20% con respecto a la media registrada para los últimos 25 años, así como un 60% menos de aportaciones a los embalses, siendo el volumen embalsado del 25,7%

de media respecto a la capacidad total de embalse de la cuenca (CHG, 2023a).

La DHG comprende el territorio de la cuenca hidrográfica del río Guadalquivir, así como las cuencas hidrográficas que vierten al océano Atlántico desde el límite entre los términos municipales de Palos de la Frontera y Lucena del Puerto (Torre del Loro) hasta la desembocadura del Guadalquivir, junto con sus aguas de transición. Tiene una extensión de 57 527 km<sup>2</sup> y se extiende por 12 provincias pertenecientes a cuatro comunidades autónomas, de las que Andalucía representa más del 90% de la superficie de la demarcación. Su población asciende a 4 437 242 habitantes (CHG, 2023b).

La demanda total consuntiva de los usos del agua en la cuenca del Guadalquivir es de 3 720 hm<sup>3</sup>/año, siendo el principal consumidor el uso agrario, con 3 207,3 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa un 86% de la demanda total. La demanda urbana (abastecimiento) supone 404,5 hm<sup>3</sup>/año, representando un 11% del total, mientras que la industrial representa el 3% restante (CHG, 2023b).

En este contexto de sequía (figura 7.1), en la campaña de riego 2022-2023, las dotaciones para el riego de cultivos en la DHG llegaron a reducirse en más de un 80%, dando lugar a que alguno/as regantes no pudieran utilizar el agua que les correspondía para regar, al no ser suficiente para sacar adelante sus cultivos. Esta situación dio lugar a que aparecieran mercados informales de agua para la cesión temporal de derechos de riego entre los regantes.

Los mercados de agua son un mecanismo que permite la reasignación voluntaria de caudales para dar respuesta tanto a cambios coyunturales como estructurales en la disponibilidad del recurso y que pretenden dar solución a problemas ambientales ligados a la sobreexplotación de las masas de agua o reducir los conflictos sociales asociados a la escasez de agua. A través de un proceso de negociación voluntario, se pone en contacto a potenciales vendedores y compradores de agua, minimizando los costes de transacción. A diferencia de los mercados, en los bancos de agua los usuarios están supeditados a la actuación de un organismo regulador, que tiene un papel centralizador de las operaciones al actuar como intermediario único y obligatorio en todas ellas. De esta manera, el banco de agua transfiere agua de unos usos a otros bajo la vigilancia de esta institución (Gómez-Limón y Calatrava, 2016).

Estos instrumentos cuentan, además, con regulación específica tanto en Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas a nivel nacional), como en la Ley 9/2010, de 30 de julio, de Aguas de



Figura 7.1. Río Guardal (Granada). Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.  
Fuente: elaboración propia

Andalucía. A pesar de ello, el desarrollo de los mercados de agua en España hasta la fecha ha sido bastante limitado, muy por debajo de su potencial desarrollo (Palomo-Hierro *et al.*, 2015). De hecho, los mercados informales de agua que surgieron en Andalucía durante la campaña de riego 2022-2023 fueron rápidamente denunciados por la Mesa Social del Agua de Andalucía<sup>1</sup> exponiendo que, en una situación tan grave, no se puede mercadear con un bien público como es el agua e instando a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), organismo dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a frenar la operación en marcha y a asumir la intermediación en la cesión de derechos, atendiendo en su reparto y asignación a criterios sociales y ambientales y no solo económicos (Martín-Arroyo, 2023).

Atendiendo a ello, la CHG autorizó durante la campaña de riego 2022-2023 un total de 106 contratos de cesión de derechos de riego, que supusieron un volumen de 30 hm<sup>3</sup> de agua solicitado. De

---

1. La Mesa Social del Agua de Andalucía se constituye en 2018 a raíz de una experiencia de colaboración y de coordinación intersectorial en temas de política del agua, protagonizada por un conjunto de organizaciones representativas de diferentes sectores a escala andaluza: AEOPAS, CCOO Andalucía, UGT Andalucía, COAG Andalucía, Ecológicos en Acción Andalucía, FACUA Andalucía, Fundación Nueva Cultura del Agua, Fundación SAVIA, Greenpeace, Red Andaluza de la Nueva Cultura del Agua, SEO/Bird-Life, UPA Andalucía, WWF.

los contratos formalizados, quince no contemplaban compensación económica y en el resto oscilaba entre los  $0,15\text{€}/\text{m}^3$  y los  $0,53\text{€}/\text{m}^3$ , estando fijada en la mayoría de ellos en  $0,24\text{€}/\text{m}^3$ . Esta compensación económica se fijó de mutuo acuerdo entre los/as contratantes, sin mediadores (CHG, 2023c).

Este trabajo aborda formalmente la reasignación de agua mediante contratos de cesión temporal de derechos de riego. Analizamos el caso particular y simplificado de dos comunidades de regantes, ambas centradas en un monocultivo, el olivo y el almendro, respectivamente, en Andalucía, en dos posibles escenarios: un año hidrológico normal y un año hidrológico seco.

En primer lugar, se propone un modelo de negociación entre las comunidades de regantes, donde el acuerdo dependerá del precio al que establezca el organismo regulador (en nuestro caso, la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir) que se realicen los intercambios. A continuación, se amplía el análisis al caso en que las comunidades de regantes negocian simultáneamente las cantidades de agua a intercambiar y el precio al que se realizan los intercambios. Los modelos de negociación propios de la teoría de juegos cooperativos y los conceptos y herramientas de la decisión multicriterio proporcionan un marco adecuado para este estudio.

## 1. EL MODELO DE NEGOCIACIÓN VISTO COMO UN PROBLEMA MULTIOBJETIVO

Los juegos cooperativos representan situaciones en las que los jugadores pueden adoptar acuerdos vinculantes para aceptar un determinado resultado de entre los posibles. Es decir, se comprometen a implementar las acciones necesarias para garantizar que sea ese el resultado final de la interacción.

En 1950 John Nash publica en la revista *Econometrica* el artículo *The bargaining problem*. En él propone una solución cooperativa para los denominados juegos de negociación y sienta las bases del análisis axiomático de las soluciones en los problemas de decisión. En palabras de Nash, el método axiomático consiste en:

One states as axioms several properties that would seem natural for the solution to have and then one discovers that the axioms actually determine the solution uniquely. John Nash (1950).

Es decir, si se acepta que han de cumplirse los principios de racionalidad que establecen los axiomas, entonces necesariamente se debe resolver el problema como indica la solución. Nash estableció cuatro axiomas y con ellos caracterizó su solución. Los resultados se publicaron en 1950, aunque este trabajo fue escrito como un trabajo para una asignatura optativa antes de graduarse, casi en su adolescencia, cuando ni siquiera sabía que existiese la teoría de juegos.

El juego de negociación, tal como lo planteó Nash y como ha sido estudiado en la literatura posterior, se representa por el conjunto de resultados alcanzables si los agentes logran un acuerdo, y por un punto de desacuerdo que refleja el resultado para los jugadores si no se llega a un pacto. Una solución de negociación es un procedimiento que, para cualquier problema de este tipo, proporciona un único punto dentro de este conjunto de resultados alcanzables. De esta manera, una solución de negociación puede verse como una predicción del acuerdo al que llegarán los jugadores o como la recomendación que un árbitro imparcial haría basándose en determinados principios de racionalidad. Los axiomas reflejan principios normativos como justicia, equidad y eficiencia. En el caso de la solución de Nash, estos principios se refieren a que no debe existir otro acuerdo que mejore los resultados de todos los jugadores, a que jugadores idénticos deben ser tratados por igual, a que el acuerdo debe ser independiente de las escalas de medición de los resultados y, finalmente, a que, si el conjunto de resultados alcanzables se reduce, pero el acuerdo recomendado por la solución sigue siendo posible, en el conjunto reducido debe recomendarse el mismo acuerdo.

Nash demostró que, bajo ciertas condiciones sobre las utilidades de los agentes, la aceptación de estos principios conduce, de manera inequívoca, a que el resultado de la negociación debe determinarse maximizando el producto de las ganancias de utilidad de los agentes con respecto al punto de desacuerdo. En la [figura 7.2](#) se ilustra el resultado del acuerdo que recomendaría la solución de Nash (N) en el conjunto de utilidades alcanzables para un problema de negociación de dos agentes,

La filosofía de los juegos de negociación, tal como se ha descrito, resulta especialmente adecuada para abordar el problema de la cesión temporal de derechos de agua que nos ocupa. Los elementos clave son los siguientes: los jugadores, representados por las comunidades de regantes; los acuerdos, que consisten en las cantidades de agua que se transfiere y los precios a los que se realiza el intercambio; las utilidades, entendidas como los beneficios que los regantes obtienen con los distintos acuerdos; los axiomas, que son los

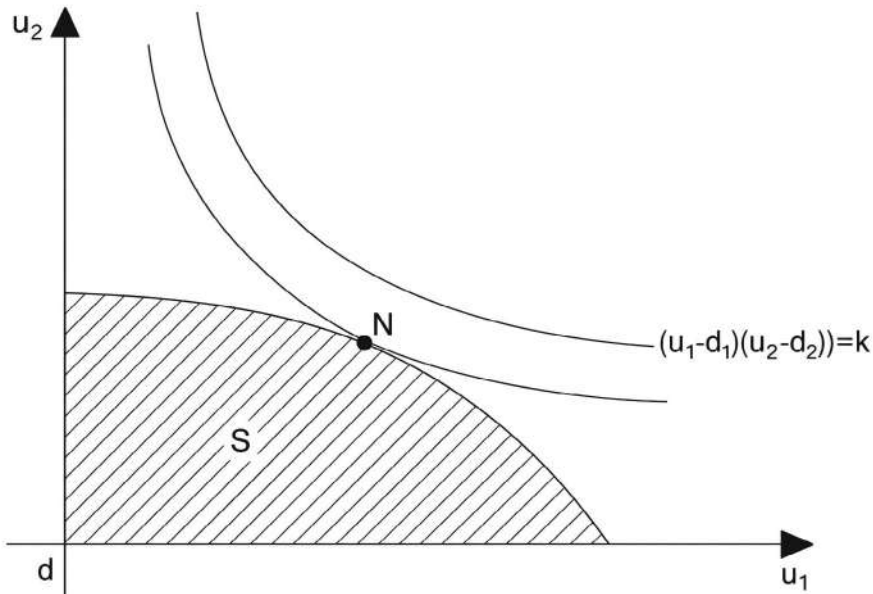


Figura 7.2. La solución de negociación de Nash. Fuente: elaboración propia

principios de racionalidad en los que se basa el agente regulador para determinar los resultados, y finalmente, la solución, que corresponde al procedimiento empleado para establecer dichos resultados.

Formalmente, el problema también puede verse como un problema de decisión multiobjetivo donde el agente decisor es el árbitro o agente regulador. En este contexto, los objetivos se identifican con las utilidades de las comunidades de regantes. El conjunto factible en el espacio de decisión está formado por los posibles intercambios de agua si el precio está previamente fijado o los intercambios de agua y los precios a los que pueden realizarse, siempre que se mejoren las utilidades de las partes respecto a la situación inicial en la que no se realiza intercambio alguno. El conjunto factible en el espacio de criterios es el conjunto de utilidades que las comunidades de regantes pueden alcanzar al llegar a un acuerdo.

La adopción de la solución de Nash como procedimiento de resolución garantiza ciertas propiedades importantes. En primer lugar, los resultados serán eficientes, no existiendo otros acuerdos que mejoren los beneficios de todas las comunidades de regantes simultáneamente. Además, respeta el principio de equidad, al tratar de forma igualitaria a quienes están en igualdad de condiciones. El resultado no depende de la escala en la que cada una de las comunidades de regantes valore su beneficio. Por último, si las posibilidades

de intercambio de agua o el rango de precios posibles se reduce, pero el resultado recomendado por la solución sigue siendo viable, este se mantiene sin cambios en el nuevo escenario.

Dado que estos principios de racionalidad pueden considerarse clave a la hora de diseñar un acuerdo que pueda ser aceptado por todas las partes, proponemos emplear este procedimiento para formular una propuesta sobre los intercambios de derechos de agua y los precios asociados.

## 2. NEGOCIANDO CANTIDADES Y PRECIOS DEL AGUA EN EL ALMENDRO Y EL OLIVAR ANDALUZ

Analizamos el caso simplificado de la negociación de las cantidades de agua a transferir y los precios entre dos comunidades de regantes que cultivan dos cultivos específicos, olivo y almendro, en la región de Andalucía. Dicho análisis se realizará teniendo en cuenta dos escenarios posibles: un año hidrológico normal y un año hidrológico seco.

La [tabla 7.1](#) proporciona información básica sobre ambos cultivos. Según los resultados de la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos elaborada anualmente por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en el año 2023, se cultivaron en Andalucía un total de 1679 412 hectáreas de olivar, de las cuales un 61,5% se cultivaron en secano y un 38,5% en regadío y un total de 240 244 hectáreas de almendro, de las cuales un 81,7% se cultivaron en secano y el 18,3% restante en regadío. En cuanto al rendimiento de los cultivos, el olivar en secano proporciona un rendimiento de 1.567 kg/ha, mientras que en regadío alcanza los 2321 kg/ha. Esta diferencia es aún más significativa en el caso del almendro, cuyo rendimiento en secano es de 359 kg/ha y en regadío de 1283 kg/ha. Finalmente, un aspecto clave en el caso de estudio que presentamos y que va a motivar el proceso de negociación sobre el intercambio de agua entre lo/as regantes objeto de análisis, es el hecho de que la dotación (derechos de agua de riego) que contempla el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir 2021-2027 para un año normal asciende a 1290 m<sup>3</sup>/ha en el caso del olivar y a 2.500 m<sup>3</sup>/ha en el caso del almendro. Sin embargo, en la campaña de riego 2022-2023, dichas dotaciones se redujeron en más de un 80% a consecuencia de la sequía, lo que dio lugar a que la dotación para el olivar fuera de 292 m<sup>3</sup>/ha y para el almendro 625 m<sup>3</sup>/ha (CHG, 2023a).

Tabla 7.1. Información básica sobre el cultivo de olivar y almendro en Andalucía

Cultivo	Superficie Ha			Rendimiento Kg/ha		Dotación m <sup>3</sup> /ha	
	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío	Año normal	Año seco
Olivar	1032382	647.03	1679412	1567	2321	1290	292
Almendro	196291	43953	240244	359	1283	2500	625

Fuente: elaboración propia a partir de la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (MAPA, 2023) y el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir 2021-2027 (CHG, 2023b).

En la situación que estudiamos, las comunidades de regantes pueden realizar cesiones temporales de sus derechos de agua o pueden adquirir temporalmente derechos de riego y disponer de una cantidad de agua adicional para sus cultivos. El beneficio efectivo o la utilidad que obtiene cada comunidad de regantes se determina por el rendimiento del cultivo con la cantidad total de agua disponible tras el intercambio, sumado al ingreso obtenido por la cesión de parte de su dotación (en caso de que transfiera agua) o restando el coste de los derechos del agua obtenidos de la otra comunidad de regantes (en caso de adquirirla). Las cantidades de agua que pueden transferir están limitadas por sus dotaciones. Si no hay acuerdo, cada comunidad de regantes opera con su dotación inicial de agua en cada uno de los escenarios contemplados: año normal o año seco.

A partir de los datos para Andalucía de la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (MAPA, 2023), se estimaron las funciones de rendimiento para ambos cultivos en base a la dotación total de agua (Q) con la que contarían según su superficie total de riego en el territorio andaluz, tomando como referencia las dotaciones establecidas para ambos cultivos en la DHG (CHG, 2023b) (tabla 7.2). Las funciones de rendimiento estimadas reflejan distintas elasticidades según el tipo de cultivo, siendo la elasticidad mayor para el olivar que para el almendro, lo que se traduce en que el olivar tiene una mayor sensibilidad a las variaciones relativas de la cantidad de agua disponible para su riego que el almendro. La tabla 7.2 recoge las funciones de rendimiento estimadas y las dotaciones de agua para cada cultivo en cada escenario.

Tabla 7.2. Funciones de rendimiento estimadas y dotación total de agua para cada cultivo

Cultivo	Rendimiento (kg)	Dotación (m <sup>3</sup> )	
		Año normal	Año seco
Olivar	27,76Q <sup>0,831</sup>	849764030	192641505
Almendro	517,21Q <sup>0,645</sup>	181304057	45326014

Fuente: elaboración propia a partir de la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (MAPA, 2023) y el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir 2021-2027 (CHG, 2023b).

Realizamos a continuación dos análisis sobre la posible negociación entre las dos comunidades de regantes, simplificando la situación, suponiendo que cada comunidad de regantes engloba la totalidad del cultivo (olivar o almendro) en Andalucía. En primer lugar, consideramos el caso en el que el precio está establecido a priori por el organismo regulador de la cuenca. En este caso, los acuerdos se refieren exclusivamente a la cantidad de agua que se transfiere. En un segundo análisis, consideraremos la situación en la que se negocia tanto sobre la cantidad de agua a transferir como sobre el precio al que se intercambian los derechos de riego entre ambos cultivos. En ambos casos, la valoración de los distintos acuerdos posibles se hace a partir de la utilidad obtenida por cada comunidad.

Las utilidades de cada una de las comunidades de regantes son los beneficios que obtienen con los posibles intercambios:

$$U_o(q) = R_o(Q_o + q) - pq, \quad U_a(q) = R_a(Q_a - q) + pq$$

donde  $R$  representa el rendimiento, que depende de la dotación inicial de cada cultivo,  $Q$ , y de la cantidad de agua adquirida o transferida,  $q$ . Esta cantidad está limitada por las dotaciones iniciales de cada uno de los regantes.  $p$  es el precio al que se realiza el intercambio.

## 2.1. Negociando cantidades a precios fijos

En primer lugar, analizamos la situación en la que el precio es fijo y está establecido a priori por el organismo de cuenca y la negociación se basa exclusivamente en la cantidad de agua que debe transferirse. Proponemos la solución de negociación de Nash para determinar acuerdos que puedan ser aceptados por ambas comunidades de regantes.

La [tabla 7.3](#) refleja las cantidades que se transferirían a distintos precios para un año hidrológico normal, así como las ganancias de utilidad que ambas comunidades de regantes obtendrían tras el acuerdo (representadas también en la [figura 7.3](#)). El precio mínimo al que las comunidades realizarían intercambios de derechos sería de 0,395 €/m<sup>3</sup> y el precio máximo sería de 0,715 €/m<sup>3</sup>. Fuera de este rango de precios, no hay intercambios que mejoren los beneficios que ambos agentes obtienen con su dotación inicial de agua, por tanto, no habrá negociación.

Tabla 7.3. Cantidad de agua transferida y ganancias de utilidad según los precios fijados en un año hidrológico normal

Año hidrológico normal			
Precio (€/m <sup>3</sup> )	Cantidad (m <sup>3</sup> )	Ganancias de utilidad (€)	
		Olivar	Almendro
0,35	0	0	0
0,395	7 838 675	2 499 679	12 229
0,40	15 868 820	4 972 118	52 339
0,45	75 670 000	19 617 260	1 767 695
0,50	110 970 700	22 963 890	5 329 724
0,55	132 649 100	20 633 640	10 198 060
0,60	146 304 800	15 316 640	16 031 860
0,65	154 598 400	8 374 879	22 657 920
0,675	156 179 500	4 540 677	26 358 700
0,70	128 637 100	746 766	29 750 120
0,71	42 296 810	63 329	12 751 180
0,715	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Primeramente, se observa que, a cualquier precio, en un año normal, sería la comunidad de regantes que cultiva olivar la que compraría los derechos de agua a la del almendro. Para cada precio, los niveles de ganancia de utilidad son eficientes, lo que implica que no existe ningún otro acuerdo que mejore estas ganancias de utilidad para ambas partes. Por otro lado, debido a los principios de racionalidad que sustentan la solución de Nash, si las dotaciones iniciales de agua de ambos cultivos cambiasen, pero la cantidad recomendada

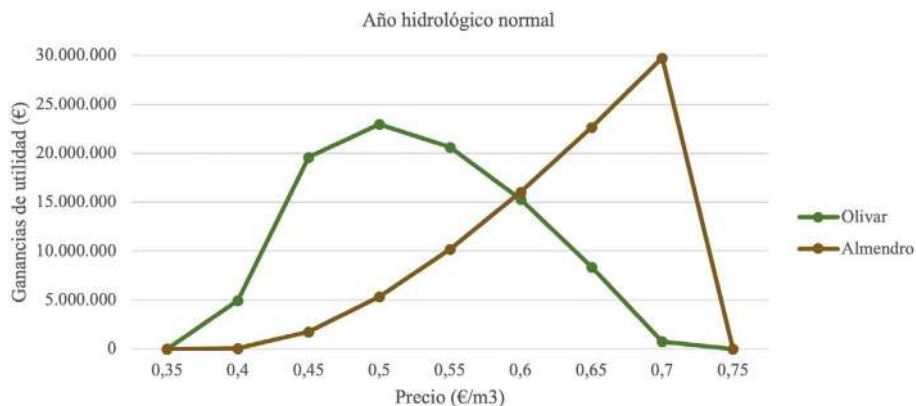


Figura 7.3. Ganancias de utilidad según los precios fijados en un año hidrológico normal. Fuente: elaboración propia

en el acuerdo inicial fuese aún factible, el acuerdo debería mantenerse inalterado en la nueva situación.

En cuanto a la cantidad de agua transferida, se alcanza un máximo de  $156,18 \text{ hm}^3$  a un precio de  $0,675 \text{ €/m}^3$ . Finalmente, se observa cómo evolucionan las ganancias de utilidad a medida que se modifica el precio fijado. Según los datos de la tabla, para el intervalo de precios entre  $0,35$  y  $0,55 \text{ €/m}^3$  las ganancias de utilidad de los regantes del olivo superan las de los regantes del almendro, mientras que para precios entre  $0,60$  y  $0,71 \text{ €/m}^3$ , las ganancias de utilidad de los regantes almendro son mayores. La comunidad de regantes del olivar alcanza su máxima ganancia de utilidad, que asciende a 22,96 millones de euros, comprando agua a un precio de  $0,5 \text{ €/m}^3$ . Los regantes del almendro pueden alcanzar una ganancia de utilidad superior a los del olivo, a un precio de  $0,7 \text{ €/m}^3$ , siendo su ganancia a este precio de 29,75 millones de euros.

A la vista de estos datos, a la comunidad de regantes del olivar le convendría que el organismo regulador fijase un precio de  $0,5 \text{ €/m}^3$ , mientras que a los regantes del almendro les beneficiaría un precio de  $0,7 \text{ €/m}^3$ . Esta situación sugiere la posibilidad de iniciar un nuevo proceso de negociación, esta vez enfocado en alcanzar un acuerdo sobre el precio al que deberían realizarse las transferencias.

La gráfica también refleja la alta sensibilidad de las ganancias de utilidad del almendro con respecto al precio para valores superiores a aquel en el que se alcanza el máximo (entre  $0,7 \text{ €/m}^3$  y  $0,75 \text{ €/m}^3$ ). En este estrecho rango de precios se pasa de la ganancia de utilidad

máxima del almendro a una situación de no negociación, en la que cada cultivo opera con su dotación inicial.

En la [tabla 7.4](#) se recogen las cantidades que se transferirían a distintos precios para un año hidrológico seco, así como las ganancias de utilidad que ambas comunidades de regantes obtendrían tras el acuerdo (representadas también en la [figura 7.4](#)). En primer lugar, se observa que, al igual que ocurre para un año normal, a cualquier precio, es también la comunidad de regantes que cultiva olivar la que compraría los derechos de agua a la del almendro. En este caso, el precio mínimo al que se realizarían intercambios sería más alto que en el año hidrológico normal,  $0,65\text{ €/m}^3$ , al igual que el precio máximo a partir del cual no habría intercambio, que ascendería a  $0,95\text{ €/m}^3$ . En cuanto a las cantidades de agua transferidas, son en todo caso menores a las de un año normal, puesto que, al tratarse de un año seco, la disponibilidad del recurso está mucho más limitada, alcanzando un máximo de  $29,65\text{ hm}^3$  a un precio de  $0,85\text{ €/m}^3$ . Finalmente, se observa también cómo las ganancias de utilidad evolucionan a medida que se modifica el precio. La comunidad de regantes que riega olivar alcanza su máxima ganancia de utilidad, que asciende a 3,31 millones de euros, a un precio de  $0,75\text{ €/m}^3$ , mientras que la que riega almendro la alcanza en  $0,90\text{ €/m}^3$ , siendo su ganancia a este precio de 4,43 millones de euros.

Tabla 7.4. Cantidad de agua transferida y ganancias de utilidad según los precios fijados en un año hidrológico seco

Año hidrológico seco			
Precio ( $\text{€/m}^3$ )	Cantidad ( $\text{m}^3$ )	Ganancias de utilidad (€)	
		Olivar	Almendro
0,6	0	0	0
0,65	2.920.068	779.504	11.344
0,7	13.286.870	2.828.831	303.363
0,75	20.673.910	3.310.303	927.664
0,8	25.981.030	2.810.267	1.821.295
0,85	29.648.000	1.685.136	2.952.256
0,9	26.266.970	211.762	4.429.050
0,95	0	0	0

Fuente: elaboración propia

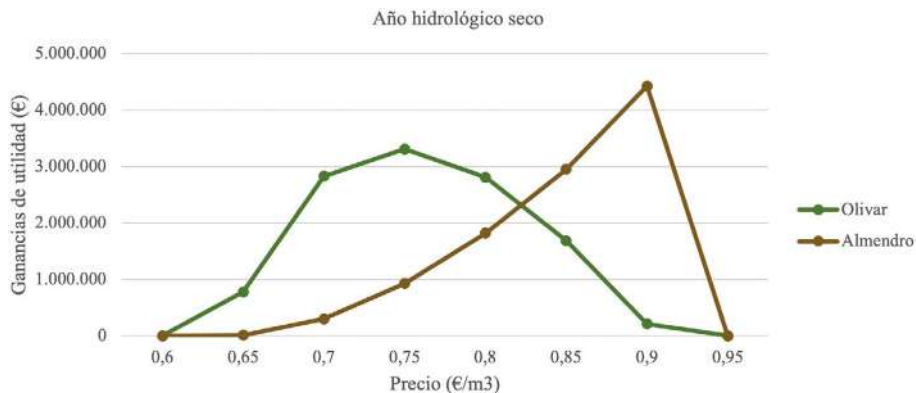


Figura 7.4. Ganancias de utilidad según los precios fijados en un año hidrológico seco.  
Fuente: elaboración propia

Puede observarse que, aunque con dotaciones iniciales de agua distintas para el año hidrológico seco, el patrón de comportamiento de las ganancias de utilidad de ambos regantes frente a la variación de los precios es similar.

## 2.2. Negociando cantidades y precios

Como se desprende del estudio anterior, si el precio del agua se considera también una variable sobre la que decidir, las dos comunidades de regantes muestran intereses enfrentados. En este segundo análisis, consideramos la situación en que es posible negociar simultáneamente las cantidades de agua a transferir y el precio al que se realizarían los intercambios.

La [tabla 7.5](#) muestra los acuerdos que proporciona la solución de Nash en este caso. En los dos escenarios considerados, año hidrológico normal y seco, ocurre lo mismo que en el caso de precios fijos y sigue siendo la comunidad de regantes del almendro la que transfiere agua al olivar. Para un año hidrológico normal, la cantidad de agua transferida sería de 145,68 hm<sup>3</sup> (el 80,35 % de su dotación), a un precio de 0,5971 €/m<sup>3</sup>. Con este acuerdo, las utilidades totales obtenidas por las comunidades de regantes del olivar y del almendro son, respectivamente, 746,25 y 125,41 millones de euros, obteniendo ambas unas ganancias de utilidad de 15,68 millones de €. En el caso del año hidrológico seco, la comunidad de regantes del almendro transfiere el 61,64 % (27,94 hm<sup>3</sup>) de su dotación de agua al olivar a un

precio de 0,8239€/m<sup>3</sup>. Las ganancias de utilidad en este escenario son de 2,33 millones de euros para ambas comunidades de regantes.

Tabla 7.5. Cantidad de agua transferida, ganancias de utilidad y precios en los dos escenarios: año hidrológico normal y seco

Año hidrológico normal	Olivar	Almendro
Utilidad del desacuerdo (€)	730.577.700	109.733.600
Utilidad en negociación (€)	746.252.600	125.408.500
Ganancia de utilidad (€)	15.674.900	15.674.900
Cantidad (m <sup>3</sup> )	145.679.500	
Precio (€/m <sup>3</sup> )	0,5971	
Año hidrológico seco	Olivar	Almendro
Utilidad del desacuerdo (€)	212.836.700	44.875.680
Utilidad en negociación (€)	215.169.900	47.208.880
Ganancia de utilidad (€)	2.333.200	2.333.200
Cantidad (m <sup>3</sup> )	27.940.180	
Precio (€/m <sup>3</sup> )	0,8239	

Fuente: elaboración propia

Un primer comentario es que, en ambos escenarios, los precios que recomienda la solución de Nash en este modelo de negociación global son precios intermedios entre los que desearían los regantes del olivar y los que desearían los regantes del almendro. En el caso del año hidrológico normal, la negociación global recomienda el precio de 0,5971€/m<sup>3</sup>, cuando, según los resultados obtenidos en el análisis anterior, el precio deseable para el olivar sería 0,5€/m<sup>3</sup> y el deseable para el almendro 0,7€/m<sup>3</sup>. Análogamente, ocurre en el año hidrológico seco. Por tanto, los resultados de este modelo de negociación global directamente proporcionan precios y cantidades que representan un compromiso con respecto a las mejores expectativas de ambas comunidades de regantes.

Otra observación relevante sobre estos resultados es que, al introducir el precio como una variable de decisión adicional, se amplía el rango de utilidades alcanzables por los agentes. Esta mayor flexibilidad favorece una distribución equitativa de los recursos, lo que en

este caso lleva a que la solución de Nash iguale las ganancias de utilidad de ambos regantes. Es decir, la introducción del precio como variable actúa como un mecanismo redistributivo.

## CONCLUSIONES

El análisis sobre la gestión del agua en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir en un episodio sequía como el que ocurrió en el año hidrológico 2022-2023, pone de relieve los desafíos que enfrentan las comunidades de regantes que dependen de este recurso esencial para su producción. La elevada demanda agrícola en la región subraya la vulnerabilidad de los cultivos y la necesidad urgente de mecanismos eficientes y equitativos para la redistribución del agua en situaciones de sequía.

El estudio destaca el potencial de los mercados y bancos de agua como instrumentos clave para la reasignación de recursos hídricos entre usuarios y propone un modelo que integra la teoría de juegos cooperativos y la decisión multicriterio para abordar la cesión temporal de derechos de agua entre las comunidades de regantes, favoreciendo acuerdos justos y eficientes.

El procedimiento que se propone proporciona soluciones consensuadas que mejoran el resultado que individualmente podrían asegurarse los regantes con su dotación inicial de agua. Este hecho podría tener implicaciones significativas en las políticas de gestión del agua, ya que, en ausencia de externalidades negativas, las transferencias temporales de agua que se determinan con estas soluciones permiten mejorar la eficiencia económica asociada al uso del recurso.

Los resultados obtenidos en los casos analizados sugieren que la decisión conjunta sobre cantidades y precios, evaluada por un organismo regulador cuyo objetivo sea mejorar las ganancias de utilidad de las partes, y respaldada por modelos de negociación como el presentado, puede contribuir a una gestión más eficaz del agua, especialmente en situaciones de escasez, beneficiando tanto a los regantes como al sector agrícola en su conjunto.

Por último, es importante tener en cuenta las limitaciones del análisis, en el que solo han intervenido dos comunidades de regantes cuyas características se han simplificado considerablemente. Se ha asumido que ambas se dedican a monocultivos (olivar y almendro, respectivamente) y que representan la totalidad de la superficie regada de ambos en Andalucía. Un estudio más avanzado debe

centrarse en la potencialidad de estos procedimientos cuando intervienen más de dos comunidades de regantes en el proceso de decisión y existe una mayor diversidad en las distribuciones de cultivos.

## AGRADECIMIENTOS

El contenido de este capítulo forma parte de la investigación desarrollada en el marco del proyecto PID2021-124981NB-I00 financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033/FEDER, UE y por «ERDF Una manera de hacer Europa».

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2023): *Resumen anual climatológico 2023*. Disponible en: [https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/resumenes?w=0&datos=2](https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=0&datos=2) [consulta:16/10/2024].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) (2023a, 17 de abril): *La CHG aprueba un desembalse de 385 hm<sup>3</sup> para la campaña de riego que se adelanta para atender las peticiones de los usuarios*. Disponible en: <https://www.chguadalquivir.es/sala-de-prensa/> [consulta: 16/10/2024].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) (2023b): *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (2022-2027)*. Disponible en: <https://www.chguadalquivir.es/tercer-ciclo-guadalquivir> [consulta 16/10/2024].
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) (2023c, 19 de julio): *La CHG autoriza un centenar de contratos de cesión de derechos de riego en la cuenca del Guadalquivir con un volumen cercano a los 30 hm<sup>3</sup> de agua*. Disponible en: <https://www.chguadalquivir.es/sala-de-prensa/> [consulta: 16/10/2024].
- Gómez-Limón, J. A. y Calatrava, J. (2016): «Los mercados de agua y su implementación en España. Una introducción», en J. A. Gómez-Limón y J. Calatrava Leyva (coords.), *Los mercados de agua en España. Presente y perspectiva*. Cajamar Caja Rural, 15-40.
- Martín-Arroyo, J. (2023, 13 de mayo): «La polémica compraventa de derechos de agua aumenta en Andalucía pese a su sequía extrema», *El País*. <https://elpais.com/espana/andalucia/2023-05-13/la-polemica-compraventa-de-derechos-de-agua-aumenta-en-andalucia-pese-a-su-sequia-extrema.html> [consulta: 16/10/2024].
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2023): *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos*. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>.

Nash, J. F. (1950): «The Bargaining Problem» *Econometrica*, 18(2), 155-162.

Palomo-Hierro, S., Gómez-Limón, J. A. y Riesgo, L. (2015): «Water markets in Spain: Performance and challenges», *Water*, 7(2), 652-678.



# Mejorando la gestión forestal con técnicas multicriterio

MARTA EZQUERRO GARCÍA  
*Universidad Politécnica de Madrid*

MARTA PARDOS MÍNGUEZ  
*Instituto de Ciencias Forestales INIA-CSIC*

LUIS DÍAZ BALTEIRO  
*Universidad Politécnica de Madrid*

## INTRODUCCIÓN

La gestión forestal presenta unas características singulares que la diferencian de otras aplicaciones que se pueden encontrar en los diferentes capítulos que conforman este libro. En efecto, a diferencia de otros casos, los gestores se están planteando continuamente modelos que permitan abarcar la duración biológica de la masa forestal objeto de estudio. Ello implica utilizar horizontes de planificación muy dilatados y que exceden, en muchas ocasiones, a lo que se considera el largo plazo en otros campos. Es decir, resulta muy habitual que el gestor no vaya a comprobar el éxito o el fracaso de las acciones propuestas, simplemente por razones temporales. Por otro lado, los sistemas forestales proveen un amplio conjunto de lo que en la actualidad se denominan servicios ecosistémicos (aqueellos servicios que proporciona la naturaleza a los seres humanos y que son útiles para su bienestar), por lo que se tienen que considerar

simultáneamente distintos objetivos en cuanto a la gestión. Por este motivo, si lo que se pretende es realizar una gestión que integre adecuadamente dichos servicios ecosistémicos, el empleo de técnicas multicriterio resulta imprescindible. En esta línea, el objetivo de este capítulo sería mostrar una aplicación de estas técnicas en un caso de estudio emblemático en la historia forestal de España, como es el monte «Pinar de Valsaín»<sup>1</sup>, situado en la vertiente segoviana de la Sierra de Guadarrama. Para ello, los siguientes apartados se organizan de la siguiente forma: en primer lugar, se van a mostrar algunas generalidades de la gestión forestal, para a continuación esbozar cómo se pueden formular modelos matemáticos adecuados a este tipo de gestión. A continuación, se describirá brevemente el caso de estudio, para, posteriormente, mostrar los resultados obtenidos. Finalmente, se resumen otras contribuciones exitosas de la teoría de decisión multicriterio abordando problemas concretos en ese mismo monte.

## 1. GENERALIDADES DE LA GESTIÓN FORESTAL

La gestión forestal se ha definido tradicionalmente como el gobierno económico de los sistemas forestales (Mackay, 1949). Sin embargo, en las últimas décadas se han producido cambios significativos a la hora de definir cómo se debe abordar este problema. Estos cambios se pueden resumir en unas ideas bastante sencillas. La primera es que un sistema forestal es mucho más que la madera o el corcho, por poner dos ejemplos sencillos, que pudieran ser transaccionados en el mercado. Por otro lado, ya se exige a los gestores la integración de otros servicios ecosistémicos que no presentan, a diferencia de los dos ejemplos anteriores, un precio de mercado, como pueden ser la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono o los servicios recreativos. Este tránsito de programar las actuaciones en función de un único objetivo (i.e., madera) a considerar otros de muy diferente naturaleza hace imprescindible el uso de técnicas que tratan de encontrar la mejor solución posible cuando tenemos en cuenta múltiples objetivos.

Otro aspecto que se debe considerar es que la visión que la sociedad tiene de los sistemas forestales es muy diferente a la que existía varias décadas atrás. Hoy en día las demandas de la sociedad suelen ir más por el lado de servicios ecosistémicos de regulación y

---

1. <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/centros-fincas/valsain.html>

culturales (poniendo un ejemplo de cada uno de ellos, la conservación de la biodiversidad y el recreo) que por la provisión de servicios ecosistémicos que poseen un precio de mercado (madera, resina, frutos, etc.).

Finalmente, es preciso señalar que la gestión forestal que se ha aplicado en España se basa en unos principios básicos cuyos orígenes se basan en la tradición centroeuropea y datan del siglo XVIII. Así, el caso de estudio que se presentará a continuación dispone de un plan de gestión desde finales del siglo XIX y dicha gestión se guiaba por tres principios básicos. El primero se refiere a persistencia, o conseguir que los bosques estuvieran siempre poblados (a excepción de las zonas donde se realicen cortas), lo que implica que tras una corta se produzca una regeneración natural aceptable. El segundo tiene que ver con un objetivo económico, en la medida de conseguir el máximo rendimiento en cuanto a productos como la madera, pero respetando las características de cada bosque y las actuaciones selvícolas pertinentes. Por último, el tercer principio tiene que ver con la eficiencia de la gestión, al proponer que se corte la masa en el momento óptimo de acuerdo con consideraciones técnicas y económicas. Al aplicar de forma continua estos principios, en principio se llegaría a una estructura de la masa que se podría replicar indefinidamente. Esta estructura, muy difícil de conseguir en la realidad, se llama el «monte ideal» y era el objetivo último que se perseguía con la gestión propuesta.

## 2. CASO DE ESTUDIO

El monte Pinar de Valsaín cubre una superficie de 7.622 ha y está situado en la provincia de Segovia. Su propiedad es estatal y la especie principal que lo puebla es el pino albar (*Pinus sylvestris* L.). El primer documento de gestión data de 1889 y, desde entonces, un objetivo principal ha sido la producción de madera y mantener la idea inicial de obtener una determinada estructura para lograr una producción sostenida de este servicio ecosistémico de provisión. Obviamente, la planificación vigente hoy en día no se ha realizado utilizando herramientas optimizadoras, sino, como se acaba de comentar, aplicando métodos clásicos de gestión forestal, basados en la tradición forestal centroeuropea. El turno aplicado oscila entre los 140 y 160 años y el monte está dividido en 767 unidades de gestión, denominadas rodales. En los últimos años esa gestión se ha vuelto más multifuncional y hoy en día presentan una gran importancia aspectos como la

conservación de la biodiversidad, debido a la presencia de poblaciones de especies protegidas, como el buitre negro. Ello ha conducido a incorporar una serie de medidas para preservar y favorecer el desarrollo de dichas poblaciones, tratando de minimizar las perturbaciones derivadas del aprovechamiento forestal realizado en la zona. De hecho, actualmente alrededor de los nidos localizados de buitre negro se deja una superficie, aproximadamente circular, de radio 100 metros, donde habitualmente no se corta, y las operaciones forestales se suspenden en un círculo de radio 500 metros durante las épocas críticas para el ave. Además, desde el año 2013, una amplia superficie de este monte (3.326 has) ha sido incluida en el Parque Nacional Sierra de Guadarrama<sup>2</sup>.

Aunque los autores de este capítulo han construido diferentes modelos para abordar distintos problemas de gestión en este monte, se ha elegido uno publicado recientemente como hilo conductor de este capítulo (Ezquerro *et al.*, 2024) porque incluye simultáneamente la consideración de dos servicios ecosistémicos diferentes de la madera (el carbono capturado y la conservación de la biodiversidad) y se comparan los resultados con una modelización de lo que supondría continuar la gestión actual durante los próximos cien años, duración habitual de los planes de gestión forestal.

La captura de carbono constituye un servicio ecosistémico de regulación que ya ha sido considerado en la gestión forestal con anterioridad a la ratificación del Protocolo de Kyoto, hito que se ha producido en el año 2005. En dicho protocolo se recoge una medida, inédita todavía en España, como es la de incrementar el carbono capturado a través de mejoras en la gestión forestal. Es decir, no solo a través de nuevas forestaciones. Este conjunto de actuaciones se conoce como Gestión Forestal Mejorada (GFM), traducción literal del término inglés *Improved Forest Management*, y también se integran dentro de lo que se conoce como soluciones basadas en la naturaleza para abordar cuestiones como la mitigación del cambio climático.

Dentro de este paraguas de GFM se incluyen actuaciones de diversa índole, algunas de las cuales se han considerado en este modelo, como retrasar el turno inicialmente previsto. Los créditos asociados a las ganancias de carbono por GFM suelen estar ligados a los llamados mercados voluntarios de carbono, que se han desarrollado a partir de 2005 y con un crecimiento muy rápido en los últimos

---

2. <https://www.parquenacionalsierraguadarrama.es/>

años (Mei, 2023). Sin embargo, aunque es en teoría una estrategia plausible para lograr objetivos de disminución de las emisiones, y de hecho está así recogido en el último informe del Intergovernmental Panel on Climate Change<sup>3</sup> (IPCC) (2023), es preciso tener en cuenta que su finalidad sería compatibilizar objetivos climáticos y relativos a la conservación de la biodiversidad. Por este motivo no solo se debe contemplar la GFM bajo la perspectiva de la captura de carbono.

Además de este carbono, que se mide en toneladas y se corresponde a la diferencia entre lo que crece el bosque en cada período y lo que se emite (asociado a las cortas, incendios, etc.), se ha considerado otro objetivo como la madera cortada en cada período (diez años), que se mide en metros cúbicos. Asimismo, se ha considerado otro objetivo relacionado con la conservación de la biodiversidad (BIO), extremo que, como se ha comentado anteriormente, se persigue con la gestión actual del monte. BIO se ha definido como un indicador compuesto que comprende dos variables: la madera muerta en pie existente en el monte, indicador clásico para estos fines; mientras que la otra variable mediría la tendencia irregular de la masa forestal, partiendo de la hipótesis de que cuanto menos homogénea sea la estructura del monte en cuanto a las edades, más biodiverso sería. Para conceptualizar esta variable se ha utilizado el índice de Gini, indicador muy utilizado en otras disciplinas para medir aspectos relacionados con la desigualdad. Todos estos criterios (carbono, madera y BIO) son de tipo «cuanto más, mejor», es decir, el centro decisor preferirá valores más elevados de los mismos.

En definitiva, considerando estos tres criterios se establecerán dos escenarios donde se van a utilizar técnicas de optimización. El primero intenta modelizar la gestión actual en el futuro (cien próximos años), mientras que en el segundo escenario se optimiza el carbono (GFM). En este último se ha computado el carbono capturado a través de dos criterios: uno que mide el carbono capturado en todo el horizonte de planificación y otro que computa el carbono en el primer período (próximos diez años) debido a su importancia a la hora de una hipotética venta de estos créditos en los mercados voluntarios de carbono. Ambos escenarios difieren en algunos aspectos técnicos que se han omitido en este capítulo, pero que están recogidos en Ezquerro *et al.* (2024). Por otro lado, aunque no se ha incluido en los modelos multicriterio propuestos, también se ha optimizado un objetivo económico como el valor actual neto (VAN), que es una

---

3. <https://www.ipcc.ch/>



Figura 8.1. Monte Pinar de Valsaín (Segovia). Fuente: Marta Ezquerro (2019)



Figura 8.2. Monte Pinar de Valsaín (Segovia). Fuente: Marta Ezquerro (2022)

medida estándar de la rentabilidad absoluta de una inversión y que presenta la utilidad de proporcionar el coste de oportunidad de, por ejemplo, elegir un escenario frente a otro. Aunque existe mucha información al respecto<sup>4</sup>, a continuación se han incluido dos imágenes (figura 8.1; figura 8.2) que permiten al lector imaginarse cómo es el paisaje presente en Valsain.

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS DE GESTIÓN FORESTAL

A la hora de modelizar la gestión forestal se suele distinguir entre tres tipos de planificaciones: una a largo plazo, denominada planificación estratégica, otra a medio plazo, que se denomina planificación táctica, y, por último, la planificación a corto plazo (habitualmente un año o menos), que se denomina planificación operativa. Para estas tres escalas la gestión forestal pretende obtener un conjunto de soluciones aceptadas por la propiedad del monte y en donde se conjuguen tres ejes imprescindibles en cualquier planificación forestal: el económico (por ejemplo, la rentabilidad asociada a los productos y servicios obtenidos en el caso de estudio), el temporal (cuándo se deben realizar las actuaciones necesarias para alcanzar los objetivos previstos) y el espacial (dónde realizar dichas actuaciones).

En el caso de estudio que se acompaña en este capítulo se abordará únicamente una planificación estratégica, con una duración de cien años. Obviando cualquier explicación matemática, lo que se pretende es determinar, a lo largo de las próximas décadas, cuándo se van a realizar cortas finales, es decir, cortas que permiten la regeneración futura del arbolado, y asociadas a la obtención de madera de calidad, dónde (en qué parte del monte) y en qué cuantía (el volumen que se extrae). Indirectamente también se puede obligar a que determinadas superficies que presentan unos atributos especiales puedan estar exentas de dichas cortas (por ejemplo, la superficie incluida en un parque nacional, en este caso por motivos legales). Para alcanzar estas soluciones deseadas se formula un modelo inicial donde se definen un amplio conjunto de variables de decisión que, en este caso, siempre se refieren a posibles superficies de corta en cada rodal a lo largo del horizonte de planificación. Con todo ello se construye una estructura matemática inicial que permite optimizar

---

4. En este enlace los lectores pueden encontrar abundante información al respecto: <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/centros-fincas/valsain.html>

uno o varios objetivos, sujetos a un conjunto de condiciones que impone el gestor (zonas en las que no se prohíben las cortas, tamaño máximo de las superficies de corta, etc.).

Para armar un modelo de planificación forestal estratégica es necesario definir su duración, denominada horizonte de planificación. En este caso se extiende en los próximos 100 años, dividiéndose en una serie de períodos (10 períodos cada uno de 10 años). Además, se necesita alimentarlo con diferentes informaciones. Así, es preciso conocer de antemano lo que se llama una división inventarial del monte (las diferentes unidades en que inicialmente se ha dividido el monte y la superficie de cada una de ellas), así como el turno previsto (horquilla según la cual se pueden realizar las cortas finales). Además, es preciso conocer la evolución (cómo crece la masa forestal) a lo largo del horizonte de planificación, singularizando estas informaciones para cada unidad de gestión, denominadas rodales en este caso.

Por otro lado, si se pretende medir la rentabilidad de la inversión, obviamente es necesario incorporar informaciones de carácter económico, como pueden ser datos de precios de la madera, costes, definir la tasa de descuento a emplear, etc. En definitiva, para cada servicio ecosistémico que se quiera incluir en el modelo es preciso conocer a priori los valores que adopta a lo largo del horizonte de planificación en función de las cortas que se prevé realizar. Si en el modelo a desarrollar, como es el caso que nos ocupa, se incluyen servicios ecosistémicos de regulación como la captura de carbono, habrá que conocer cómo evolucionan en el tiempo, según el crecimiento de la masa y las cortas que se produzcan. Y lo mismo referido a posibles objetivos relacionados con el otro servicio ecosistémico introducido en el análisis: la conservación de la biodiversidad.

Una vez que se dispone de todas estas informaciones, se procede a construir un modelo matemático donde las variables son siempre las unidades de corta. Dichas variables se definen atendiendo a modelos recogidos en la literatura ya desde hace décadas, como es el llamado Modelo I (Johnson y Scheurmann, 1977). Teniendo en cuenta el número de rodales existentes y los condicionantes establecidos (turno, características del citado Modelo I, etc.) se han definido para este modelo más de 12.000 variables.

A continuación, estas se agrupan a conveniencia del gestor para definir la función que se quiere optimizar, incluyendo uno o varios objetivos, las restricciones o condiciones que se incluyen para que el problema tenga solución (por ejemplo, que no se corte más superficie de la existente para cada rodal), así como límites que se pueden

poner de acuerdo con alguno de los principios de gestión forestal anteriormente señalados (por ejemplo, que en cada período considerado se corte más o menos lo mismo), o siguiendo algunas normas establecidas (por ejemplo, restricciones asociadas a la pertenencia a un parque nacional).

Finalmente, es importante señalar que muchas veces resulta interesante conocer el grado de conflicto que existe entre los diferentes objetivos (servicios ecosistémicos) considerados. Si apenas existiera conflicto entre ellos, cualquier solución inicial asociada a la optimización de un objetivo en solitario podría ser una solución aceptable para el gestor. Por el contrario, si existe un conflicto evidente al comparar los valores asociados a la optimización de varios servicios ecosistémicos, se justificaría acudir al empleo de técnicas multicriterio. Pues bien, el gestor puede evaluar fácilmente dicho grado de conflicto a través de una herramienta que se denomina matriz de pagos, que consiste en aportar las soluciones de los diferentes objetivos cuando se optimizan por separado en un formato tabular.

#### 4. MODELOS MULTICRITERIO

Como se acaba de comentar, el punto de partida para justificar la aplicación de un modelo multicriterio sería la existencia de un conflicto apreciable entre los objetivos inicialmente propuestos. A continuación, se adjuntan la matriz de pagos para los dos escenarios previstos, comenzando por el escenario asociado a la gestión actual ([tabla 8.1](#)). En ella se incluyen los tres objetivos considerados: el volumen de madera (Madera en la citada [tabla 8.1](#)) cortado en el horizonte de planificación, medido en metros cúbicos, el indicador agregado de biodiversidad (BIO, de naturaleza adimensional), el balance de carbono (Carbono) al final del horizonte de planificación, medido en toneladas de CO<sub>2</sub>. Además, a título informativo se han añadido las cifras del valor actual neto (VAN) asociado a las cortas ocurridas durante todo el horizonte de planificación y medido en euros. Se recuerda que los tres objetivos son del tipo, cuanto más, mejor.

Tabla 8.1. Resultados según la gestión actual

	Madera	BIO	Carbono
Madera	3235168	2384618	2173296
BIO	0,61	1,04	0,57
Carbono	2998701	2279259	4757632
VAN	18943224	11189943	9567408

Los resultados de la [tabla 8.1](#) muestran la existencia de un conflicto entre los tres criterios considerados. En efecto, cuando se optimiza el criterio BIO, la reducción en el volumen de madera que se corta es notable, así como el carbono capturado. De la misma forma, optimizar el carbono total a lo largo del horizonte de actuación supondría obtener unos valores de BIO que serían la mitad del valor ideal asociado a este criterio. *A priori*, y sin disponer de informaciones sobre qué objetivo resulta más importante para la propiedad y cuánto con relación a los otros dos, no podemos afirmar que una solución sea mejor que otra. Cabe señalar, además, que se ha completado dicha matriz con los resultados del VAN y se puede asimilar el conflicto existente al coste de oportunidad en términos monetarios (elegir el resultado de optimizar un determinado criterio frente a otro). En resumen, se concluye que no basta con optimizar un único objetivo (cualquier columna de la matriz de pagos) porque las soluciones difieren notablemente. Ello nos llevaría a buscar una solución intermedia entre dichas columnas de la matriz anterior.

Si se repite el razonamiento para el otro escenario considerado en el análisis (gestión forestal mejorada, GFM), los resultados incluidos en la [tabla 8.2](#) muestran también la existencia de un conflicto entre los objetivos considerados. Cabe señalar, en primer lugar, que se han añadido dos filas adicionales, referidas a los resultados de la madera y del carbono en el primer período (Madera-01 y Carbono-01). Con ellas se quiere singularizar la ganancia de carbono que se puede lograr en los primeros diez años (primer período) adoptando este escenario, en comparación a los anteriores. Por otro lado, se quiere dejar claro que se respetan a rajatabla las cortas en el primer período dispuestas en el documento actual de gestión. Por este motivo, el valor de Madera-01 es el mismo con independencia del objetivo que se optimice. A la vista de los resultados incluidos en la [tabla 8.2](#),

se comprueba que existe un conflicto notable entre los cuatro criterios analizados, por lo que no se puede conocer *a priori* qué solución sería la preferible por los gestores del monte.

Tabla 8.2. Resultados para el escenario GFM

	Madera	BIO	Carbono	Carbono-01
Madera	2010490	1477156	1452937	1636963
BIO	0.76	0.93	0.68	0.74
Carbono	5953363	5979081	6645229	6289937
Carbono-01	595336	595467	596108	625769
Madera-01	211666	211666	211666	211666
VAN	8137222	3599583	5260292	5578758

Los resultados de las [tablas 8.1](#) y [8.2](#) justifican la construcción de un modelo multicriterio que permita buscar soluciones más apetecibles para la persona que tome la decisión final (el centro decisor). Esta situación suele ser bastante habitual cuando se gestionan los sistemas forestales debido a su naturaleza intrínseca, ya que proporcionan simultáneamente numerosos servicios ecosistémicos, lo que conduce a la necesidad del empleo de modelos que permitan optimizar más de un criterio (servicios ecosistémicos en este caso) de forma simultánea. En definitiva, en el ámbito forestal se hace necesario formular los modelos decisionales dentro del marco de la teoría de la decisión multicriterio (Romero, 1994). En concreto, las aplicaciones de estas teorías son muy frecuentes en el campo forestal como lo señalan diferentes revisiones del estado del arte (Díaz-Balteiro *et al.*, 2020).

Dentro del amplio conjunto de técnicas multicriterio, una de las más utilizada en este ámbito ha sido la programación por metas (goal programming), debido principalmente a su versatilidad (Díaz-Balteiro *et al.*, 2013). Una variante de esta, la denominada programación por metas lexicográficas (Romero, 2001), ha sido la elegida para resolver este problema. El primer paso para la construcción de este modelo consiste en precisar cada una de las metas (una por cada uno de los objetivos incluidos en las [tablas 8.1](#) y [8.2](#)). Para ello es necesario definir las variables de desviación (positivas y negativas) de cada meta, así como fijar su nivel de aspiración (grado de

cumplimiento de cada meta que se considera aceptable), en este caso los valores óptimos de cada criterio según la matriz de pagos incluida en la [tabla 8.2](#).

Por otro lado, como cada meta viene definida en unas determinadas unidades, es preciso proceder a su homogeneización («normalizarlas» en el argot técnico), con el fin de que se puedan optimizar conjuntamente. Los valores de matriz de pagos ([tabla 8.2](#)) proporcionan los valores ideales (más elevados, si se trata de objetivos del tipo «cuanto más, mejor») y anti-ideales (más reducidos, si se trata de objetivos del tipo «cuanto más, mejor») de cada criterio. La diferencia entre ambos valores (ideal y anti-ideal) se ha utilizado como factor de normalización de cada meta. Estas metas también se podrían ponderar por ciertos pesos preferenciales que el centro decisor pudiera otorgar a cada una de ellas. Sin embargo, en este caso, se ha supuesto que todos los objetivos tienen la misma importancia, lo que equivale a decir que todos ellos presentan un peso igual a uno.

Finalmente, en un modelo de programación por metas lexicográfico es preciso definir los niveles de prioridad que se van a considerar, así como las metas que integran cada uno de estos niveles, procurando evitar un número excesivo de estos (Romero, 1991). En este caso, se han considerado tres niveles, donde el primero de ellos está ocupado por el carbono capturado en el primer período, mientras que el segundo nivel incluye las metas relacionadas con la biodiversidad y el carbono en el resto de los períodos. Finalmente, en el tercer nivel de prioridad se hallaría la producción de madera. La lógica de este modelo consiste en resolver el modelo y si se obtiene una solución factible, el resultado de la(s) meta(s) situadas en ese nivel se añaden a la optimización de las metas situadas en el siguiente nivel y así sucesivamente.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De forma resumida, los resultados del modelo multicriterio se recogen en la [tabla 8.3](#). Se aprecia que es una solución parecida a la solución dada por la optimización del carbono en el primer período ([tabla 8.2](#)). Esto se explica por los condicionantes del modelo. Así, en primer lugar, no se han incorporado pesos preferenciales distintos que se pudieran otorgar a cada una de las metas. En segundo lugar, tiene sentido que se parezca la solución a la meta situada en el primer nivel de prioridad. Si se modificara esta prelación, los resultados se modificarían y lo mismo ocurriría si el centro decisor asignara

pesos diferentes a las metas consideradas. Por otro lado, conviene resaltar que los resultados de la [tabla 8.3](#) muestran la ganancia de carbono en los primeros diez años es superior si se compara con la previsión del plan de gestión actual (algo más de 578.000 tCO<sub>2</sub>) o con los resultados incluidos en los tres primeros objetivos considerados en la [tabla 8.2](#). En principio, este incremento daría una pista para justificar acudir a un mercado voluntario de carbono e intentar colocar estos créditos, si así lo decidiera la propiedad.

Finalmente, conviene recordar que los fríos números recogidos en las tablas incluidas en este capítulo esconden una gran cantidad de decisiones y resultados desde el punto de vista forestal. No es objeto de este capítulo profundizar en estas cuestiones, pero resulta fácil comprender que los resultados de un modelo con más de 12.000 variables hacen efectivos en el tiempo (corto, medio y largo plazo) y en el espacio los objetivos que se han marcado con este tipo de gestión.

Tabla 8.3. Resultados del modelo multicriterio

Criterio	Programación por metas
Madera	1.631.309
BIO	0,78
Carbono	6.249.517

Carbono-01	624.373
Madera-01	211.666
VAN	5.366.500

Conviene, asimismo, destacar que se están conjugando diferentes servicios ecosistémicos e incluso alguno de ellos, como el relacionado con la conservación de la biodiversidad es un índice agregado de dos indicadores. De la misma forma que antes, si se otorgaran pesos diferentes a cada uno de ellos o si se introdujeran en el análisis otros indicadores para medir un concepto tan amplio como el de la biodiversidad, los resultados podrían variar. Por otro lado, con relación con los servicios ecosistémicos, existe un grupo de estos servicios (los culturales) que no están aquí representados. El ejemplo más claro sería integrar un criterio vinculado a la cuantificación

monetaria del disfrute recreativo que se puede realizar en el monte Pinar de Valsaín. Disciplinas como la economía ambiental proporciona herramientas para conocer, en la actualidad, una estimación de dicho disfrute. Sin embargo, el problema sería encontrar un modelo de cómo simular y cuantificar el disfrute recreativo durante los próximos cien años. Hoy en día supone un reto mayúsculo, máxime si se tiene en cuenta cómo se ha modificado la demanda que los ciudadanos hacen de los servicios ecosistémicos que proporcionan los sistemas forestales. Este ejemplo pretende señalar la dificultad de integrar en el análisis datos vinculados a un horizonte temporal tan dilatado. No obstante, si se pudiera disponer de esos inputs, las técnicas multicriterio constituyen una herramienta imprescindible para obtener soluciones más atractivas que permiten al gestor tomar mejores decisiones en su día a día. Finalmente, tampoco se debe olvidar que la utilidad de estos modelos es ya muy importante, aunque se empleen simplemente para ver cómo evolucionaría el sistema forestal si se modificaran algunas decisiones en cuanto a su gestión. Por ejemplo, la pregunta: «¿qué pasaría si...?» se puede resolver con la ayuda de estas técnicas.

## 6. EXTENSIONES

Con el fin de ilustrar la potencialidad del empleo de estas técnicas en el ámbito forestal, a continuación se resumen otros trabajos de los autores en el mismo caso de estudio donde se pueden apreciar las ventajas de su empleo a la hora de encarar problemas concretos de gestión forestal. Simplemente se pretende ilustrar brevemente estas aproximaciones evitando entrar en detalles técnicos, tanto forestales como matemáticos, que pudieran ensombrecer el objetivo anteriormente señalado.

Por ejemplo, una idea utilizada masivamente hoy en día en todos los ámbitos es la de sostenibilidad. Sin embargo, pocos conocen que es un término definido por primera vez para abordar un problema forestal en el siglo XVIII (von Carlowitz, 1713). Desde entonces es un concepto totalmente imbricado en la gestión forestal, pero históricamente vinculado a un manejo forestal que optimizaba solo un determinado servicio ecosistémico de provisión: la producción de madera. Sin embargo, con el cambio de la percepción que las sociedades presentan ante los sistemas forestales, esta idea de sostenibilidad monocriterio ha quedado superada, por lo que conviene encuadrarla en un contexto más amplio. De hecho, resulta muy habitual definir este

concepto abstracto a través de un conjunto de criterios e indicadores de carácter multidisciplinar. Sin embargo, esta aproximación presenta una debilidad inicial: se realiza normalmente a nivel estático (una medida actual de estos indicadores), lo que choca con la duración de la gestión forestal.

Debido al carácter multidisciplinar de este concepto, incorporando indicadores de muy diferente naturaleza, las técnicas multicriterio constituyen una herramienta idónea para evaluar y definir la sostenibilidad a lo largo del tiempo, en términos cuantitativos. A título de ejemplo, en Ezquerro *et al.* (2019a) se presenta un modelo multicriterio donde se integran en el Pinar de Valsaín, seis criterios de diferente índole (económicos, ambientales y sociales) a lo largo de cien años, utilizando otro modelo de programación por metas.

A diferencia del modelo anteriormente explicitado, aquí se han introducido pesos preferenciales proporcionados por los gestores del monte para cada uno de los criterios, y se ha definido para cada rodal diferentes alternativas selvícolas (actuaciones que se llevan a cabo a lo largo del tiempo) que permitan elegir el tratamiento que es más sostenible para cada rodal. De esta forma, el gestor puede justificar la adopción de la gestión forestal más sostenible en base a los indicadores definidos, las alternativas selvícolas factibles en cada rodal y el peso otorgado a cada uno de los indicadores.

Otro problema que afecta directamente a la gestión forestal es el del cambio climático. Recordando la duración extraordinariamente dilatada del ciclo vital de muchos árboles, cambios en las condiciones climáticas pueden afectar a su desarrollo futuro, obligando a tomar alternativas de decisión diferentes a las actuales. Por ello, resultaría de gran utilidad disponer de informaciones que justificaran adoptar un determinado tipo de gestión en el futuro para lograr una mejor adaptación a este fenómeno.

Tomando el mismo caso de estudio (Pinar de Valsaín), en Díaz-Balteiro *et al.* (2017) se ha formulado un modelo multicriterio que permite elegir la mejor alternativa de manejo, entre tres posibles, observando la evolución de un conjunto de indicadores vinculados a cinco servicios ecosistémicos diferentes. El modelo elegido es otra variante de la programación por metas, conocida como programación por metas extendidas (Romero 2004) y donde se ha hecho un esfuerzo notable para integrar las preferencias de distintos *stakeholders* hacia los indicadores elegidos. Así, se obtuvieron 34 respuestas válidas de un conjunto amplio de personas y entidades vinculadas al monte (la propiedad, técnicos, grupos ecologistas, asociaciones, técnicos, investigadores, etc.). Con todo ello, el resultado final,

agregando las preferencias de estos *stakeholders*, justifica elegir la alternativa de manejo de «no gestión», es decir, permitir la evolución natural de esta masa forestal. No obstante, si se singulariza el problema con las opiniones de algunos grupos de *stakeholders* por separado, la solución varía.

Profundizando en aspectos más puntuales de la gestión, un conflicto habitual se centra en la dualidad producción de madera-conservación de la biodiversidad. Suele ser frecuente que alternativas de manejo que priorizan (parcial o exclusivamente) uno de esos dos objetivos lo hacen mediante reducciones significativas del otro. Es por ello por lo que, desde el punto de vista técnico, se buscan herramientas que permitan alcanzar compromisos entre estos dos objetivos. En concreto, situar dónde no se deberían hacer cortas finales y dónde deberían estar situados esos rodales donde se renuncia (al menos durante una serie de décadas) al aprovechamiento comercial de la madera para favorecer la conservación (y la expansión) de especies emblemáticas constituye un reto que se presenta en numerosos sistemas forestales.

El monte Pinar de Valsaín alberga, entre otras especies protegidas, una importante colonia de buitre negro *Aegypius monachus* (Linnaeus, 1766), que sobrepasa las 100 parejas reproductoras. Esta especie necesita, para su correcto desarrollo, disponer de amplias zonas sin cortar cerca de donde se ha ubicado su nido. En concreto, cuando se detecta un nido, se establece un área de 3,41 has a su alrededor donde se prohíben las cortas. Para abordar este problema, es decir, cómo compatibilizar ambos criterios a través de técnicas selvícolas novedosas (se denominan «sistemas de retención variables») se ha construido un modelo multicriterio que, entre otros resultados, asegure una superficie sin cortas que sea no decreciente a lo largo del horizonte de planificación, con el objetivo de proteger a esta especie. En concreto, se ha diseñado un modelo de programación por metas extendido (Ezquerro *et al.* 2019b) con siete metas distintas que incorporan objetivos clásicos de la gestión forestal, así como objetivos de conservación (la cantidad de superficie donde se prohíben las cortas). Además, en diversas partes del modelo se permite que el gestor del monte (o cualquier centro decisor) introduzca sus preferencias sobre dichas metas. Las soluciones de este modelo resultan mucho más atractivas que las mostradas en las matrices de pagos correspondientes, y justifican que, al final del horizonte de planificación, más de 1.500 has permanezcan sin cortar con el fin de mejorar las poblaciones de buitre negro. Como es lógico pensar, el coste de

oportunidad de no realizar estos aprovechamientos ha sido calculado a través de este modelo multicriterio.

Finalmente, y también relacionado con el servicio ecosistémico de conservación de la biodiversidad, se ha diseñado otro modelo multicriterio (Ezquerro *et al.*, 2023) donde se aborda un problema también clásico de gestión forestal: ¿es mejor segregar espacialmente la gestión para un determinado servicio ecosistémico, por ejemplo, la biodiversidad o, por el contrario, conviene integrar con las herramientas de gestión pertinentes los objetivos de producción y conservación en toda la superficie del monte? Este modelo de programación por metas propone para el monte Pinar de Valsaín tres escenarios, uno que representa la gestión pasada, otro la gestión actual y otro que simula en 2070 toda la superficie del monte será catalogada como parque nacional (en la actualidad solo el 35% de su superficie se encuentra afectado por esta figura de protección) según lo dispuesto en la ley de la declaración de este parque nacional. Fijando un conjunto de seis indicadores, y analizando su evolución en el modelo planteado, se concluye que la opción de una gestión integrada resulta más atractiva que segregar zonas del monte con un único uso preferente.

## AGRADECIMIENTOS.

Los autores quisieran agradecer a D. Javier Donés y a D. José García Gámez, gestores del monte durante el tiempo que se ha llevado a cabo estas investigaciones, por las facilidades que siempre nos han dado, así como por el apoyo recibido. Asimismo, se reconoce y se agradece la ayuda recibida por parte de D. Miguel Cabrera en diferentes aspectos relacionados con la gestión de este monte. Finalmente, y no por ello menos importante, las enseñanzas del Profesor D. Carlos Romero han sido imprescindibles a la hora de desarrollar los modelos aquí recogidos. Todo nuestro cariño y agradecimiento hacia él.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Díaz-Balteiro, L., González-Pachón, J. y Romero, C. (2013): «Goal programming in forest management: Customising models for the decision-maker's preferences», *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28, 166-173.

- Díaz-Balteiro, L., Alonso, R., Martínez-Jaúregui, M. y Pardos, M. (2017): «Selecting the best forest management alternative by aggregating ecosystem services indicators over time: a case study in Central Spain», *Ecological Indicators*, 72, 322-329.
- Díaz-Balteiro, L., Iglesias-Merchan, C., Romero, C. y García de Jalón, S. (2020): «The sustainable management of land and fisheries resources using multicriteria techniques: A meta-analysis», *Land*, 9, 380.
- Ezquerro, M., Pardos, M. y Díaz-Balteiro, L. (2019a): «Integrating variable retention systems into strategic forest management to deal with conservation biodiversity objectives», *Forest Ecology and Management*, 433, 585-593.
- Ezquerro, M., Pardos, M. y Díaz-Balteiro, L. (2019b): «Sustainability in forest management revisited using multi-criteria decision-making techniques», *Sustainability*, 11, 3645.
- Ezquerro, M., Díaz-Balteiro, L. y Pardos, M. (2023): «Implications of forest management on the conservation of protected areas: a new proposal in Central Spain», *Forest Ecology and Management*, 548, 121428.
- Ezquerro, M., Pardos, M. y Díaz-Balteiro, L. (2024): «The inclusion of improved forest management in strategic forest planning and its impact on timber harvests, carbon and biodiversity conservation», *Science of the Total Environment*, 949, 174813.
- IPCC (2023): «Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change», en H. Lee y J. Romero (eds.), *Climate change 2023: Synthesis report*. Suiza: The Core Writing Team. IPCC, 35-115.
- Johnson, K. N. y Scheurman, H. L. (1977): «Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis», *Forest Science*, 23 (1), a0001-z0001.
- Mackay, E. (1949): *Fundamentos y métodos de la ordenación de montes*. Segunda parte. Madrid: Escuela Especial de Ingenieros de Montes. Sección de Publicaciones.
- Mei, B. (2023): «Carbon offset as another driver of timberland investment returns in the United States», *Journal of Forest Business Research*, 2(1), 1-19.
- Romero, C. (1991): *Handbook of critical issues in goal programming*. Oxford: Pergamon Press.
- Romero, C. (1994): «Aplicaciones de la Teoría de la Decisión Multicriterio en la gestión de los recursos forestales» *Agricultura y Sociedad*, 73, 41-70.
- Romero, C. (2001): «Extended lexicographic goal programming: A unifying approach», *Omega*, 29, 63-71.
- Romero, C. (2004): «A general structure of achievement function for a goal programming model», *European Journal of Operational Research*, 153, 675-686.
- Von Carlowitz, H. (1713): *Sylvicultura Oeconomica oder haußwirthliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. Leipzig: Johann Friedrich Braun (2 Bände).

# Ayuda a la decisión en la gestión de incendios forestales

BIBIANA GRANDA CHICO  
*Universidad Complutense de Madrid*

JAVIER LEÓN CABALLERO  
*Decide soluciones*

M<sup>a</sup> TERESA ORTUÑO SÁNCHEZ  
*Universidad Complutense de Madrid*

ADÁN RODRÍGUEZ MARTÍNEZ  
*Universidad de Oviedo*

GREGORIO TIRADO DOMÍNGUEZ  
*Universidad Complutense de Madrid*

BEGOÑA VITORIANO VILLANUEVA  
*Universidad Complutense de Madrid*

## INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales forman parte de un conjunto de eventos que acontecen periódicamente en la naturaleza, conocidos como *desastres naturales*. Este conjunto incluye inundaciones, riadas, terremotos, tsunamis, grandes tormentas como huracanes, tifones o ciclones, deslizamientos de tierra e incendios forestales, entre otros.

Para gestionar los desastres y minimizar su impacto sobre la población y su entorno, se desarrollan acciones a lo largo del tiempo, organizadas en un ciclo, ya que en la mayoría de los casos las amenazas no desaparecen. Se estructuran en cuatro etapas o fases:

- La etapa de mitigación y prevención engloba acciones dedicadas a reducir el impacto del desastre o incluso a evitar su ocurrencia.
- La etapa de preparación de la respuesta se centra en obtener y ubicar los recursos, así como de diseñar planes de contingencia y de respuesta para lidiar con el desastre.
- En la etapa de respuesta se llevan a cabo las acciones para contener el desastre y reducir sus consecuencias, atendiendo a las necesidades de la población afectada. Se inicia desde que se declara la emergencia y termina cuando el desastre remite y se estabiliza la situación.
- La etapa de recuperación contempla todas aquellas tareas que tratan de devolver a la comunidad a algo parecido a la normalidad.

## 1. GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

Aunque muchas veces los incendios forestales sean provocados por la acción humana (tanto de forma intencionada como por negligencias), se consideran como un tipo más de desastre natural. Al igual que en todos ellos, su gestión es una tarea compleja que involucra múltiples factores y decisiones estratégicas, que se materializan en acciones específicas en cada una de sus fases.

Las cuatro fases de la gestión de desastres junto con acciones específicas de la gestión de incendios forestales se presentan a continuación, pudiendo ver su naturaleza cíclica en la [figura 9.1](#).

En el caso de los incendios forestales las labores de *prevención* y *mitigación* se centran en acciones para evitar el inicio de un incendio, o limitar su propagación una vez iniciado para que sus consecuencias sean menos graves. Se incluyen acciones educativas, normativas, diseños del paisaje y también la gestión del combustible (es decir, todo aquello que puede arder y propagar, como ramas, restos de hojas, etc.) mediante poda, limpieza mecánica, quemas controladas y cortafuegos. Además, se incluyen acciones de vigilancia para detección temprana de incendios. Las labores de prevención incluyen campañas de concienciación ciudadana, limitación del uso

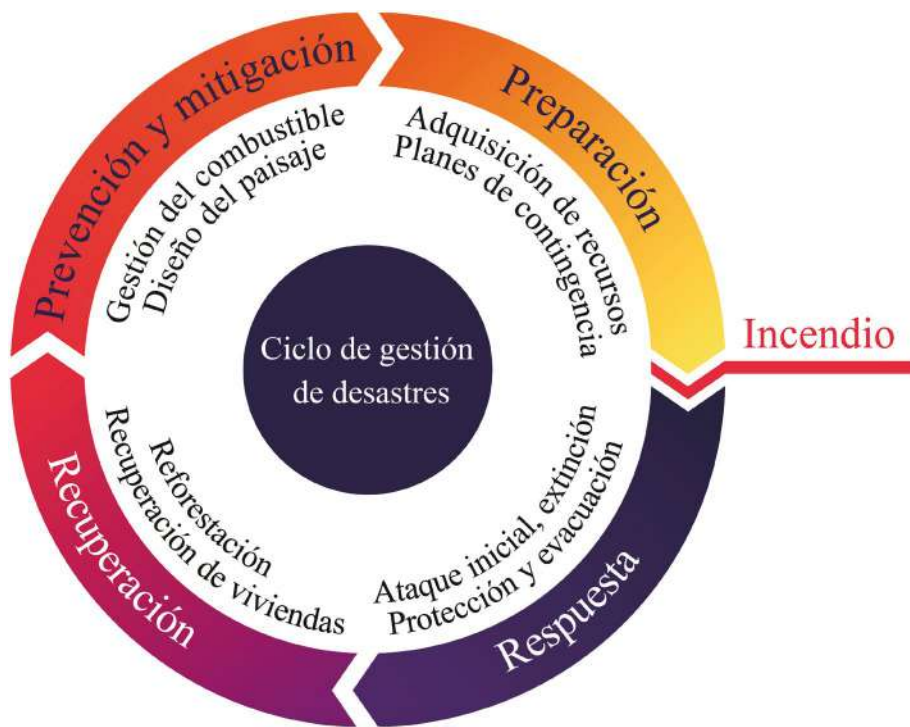


Figura 9.1. Fases de la gestión de incendios forestales como ciclo de gestión de desastres. Fuente: elaboración propia

del fuego, prohibiciones específicas de acciones susceptibles de iniciar un incendio forestal, etc.

La fase de *preparación* se centra en la adquisición, contratación y preubicación de recursos, incluyendo sistemas de ayuda a la decisión para monitorización, simulación y visualización, la contratación de personal, junto con su entrenamiento y simulacros, diseño de planes de contingencia, etc.

La fase de *respuesta* se inicia cuando se detecta un incendio, activándose los protocolos para responder a él. En general, los primeros que se activan son de alertas y extinción en un ataque inicial para intentar que el fuego no se descontrole y escape. En caso de no tener éxito, se mantienen las labores de extinción intentando la contención y perimetración del incendio, junto con la evacuación de la población amenazada y la protección de activos en el terreno. Esta fase no termina hasta que el incendio no está totalmente extinguido.

En la fase de *recuperación* se llevan a cabo tareas de reforestación, monitorización de los daños causados por el incendio,

recuperación de viviendas y otros activos del territorio, etc. junto con una evaluación de las causas y las acciones desarrolladas, para revisar las acciones de prevención, mitigación y preparación.

## **2. APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**

Cada una de las fases de la gestión de un incendio forestal enfrenta desafíos únicos, debido a las diferencias en sus horizontes temporales. En la fase de mitigación y prevención las decisiones se toman con un enfoque a largo plazo, evaluando riesgos futuros y planificando medidas que pueden tardar años en mostrar resultados. De igual modo, la fase de recuperación necesita de decisiones basadas en una visión a medio y largo plazo, ya que los ecosistemas pueden tardar décadas en recuperarse. En contraposición, durante la fase de respuesta, las decisiones han de ser inmediatas, utilizando incluso sistemas de apoyo a la decisión en tiempo real. En esta fase, factores como la velocidad de respuesta y la disponibilidad de recursos son cruciales para minimizar los daños. La heterogeneidad en los horizontes temporales implica, pues, la necesidad de desarrollar modelos de optimización adaptados a cada fase, considerando sus distintas características. A pesar de ello, las distintas fases de gestión no dejan de estar interrelacionadas y las decisiones de una etapa influyen en las siguientes, por ejemplo, las acciones de mitigación influyen en cómo se desarrollará el incendio, o las de preparación en cómo se desarrollará la respuesta. Por este motivo, también existen enfoques integrados que abordan varias fases de manera conjunta.

Por otra parte, la gestión de incendios forestales debe tratar con una fuerte incertidumbre, dada la naturaleza estocástica de los incendios y su evolución, dependiente de factores que también tienen una fuerte aleatoriedad que no puede ser despreciada. En la fase de respuesta existe cierta incertidumbre debida al propio comportamiento del fuego y a las condiciones del entorno, como la meteorología. Sin embargo, en las fases de mitigación, prevención y preparación esta incertidumbre es todavía mayor, ya que se desconoce cuándo o dónde van a suceder los posibles incendios futuros.

A la hora de desarrollar las acciones en cada etapa, las personas responsables se enfrentan a la necesidad de seleccionar entre una serie de alternativas posibles dados unos recursos limitados, valorando sus opciones con una serie de criterios, tales como el impacto ambiental, la seguridad de las personas, los costes asociados,

la efectividad de las medidas, etc. Habitualmente, estos criterios entran en conflicto, de modo que las acciones que son mejores desde el punto de vista de un criterio no lo son desde otro. La *decisión multicriterio* (DMC) se presenta como una herramienta clave para abordar este desafío, ya que permite analizar y comparar alternativas en problemas donde no existe una solución óptima que lo sea para todos los criterios. Esto permite tomar decisiones más objetivas, fundamentadas y robustas bajo incertidumbre y riesgo, de especial relevancia cuando se trata de la gestión de incendios forestales, donde los errores pueden tener consecuencias devastadoras.

A continuación, se describen algunos problemas de decisión que pueden abordarse en dos de las fases de gestión de incendios forestales: la fase de mitigación y prevención, y la fase de respuesta.

## **2.1. Fase de prevención y mitigación: quemadas controladas y cortafuegos**

En la fase de prevención y mitigación se toman medidas para evitar el inicio de un incendio o, en su defecto, su propagación. Hay muchos tipos de medidas diferentes para este fin, siendo la gestión del combustible un conjunto de medidas que actúan sobre la vegetación para modificar su distribución en el paisaje. El fin es reducir el volumen de lo que puede iniciar o propagar un incendio y reducir la conexión del combustible para evitar la propagación.

Las medidas para lograrlo son la eliminación del combustible por medios mecánicos (limpieza, poda...), que es la menos agresiva para el paisaje, pero la más lenta y cara; las quemadas controladas en las que el combustible se elimina mediante el fuego, quemando a baja intensidad la zona, y los cortafuegos como forma para ralentizar la propagación y, si son suficientemente amplios, para facilitar el acceso de los equipos de extinción.

Los dos problemas principales a la hora de diseñar estas medidas de prevención son, por una parte, la limitación de recursos que impiden que se pueda actuar sobre todo el territorio y, por otra, que al no ser reactivas frente a un incendio concreto es difícil valorar su eficacia ante la incertidumbre de futuros incendios.

Al no poder actuar sobre todo el territorio, es necesario seleccionar las zonas donde se aplicarán estos tratamientos o se ubicarán los cortafuegos, con los recursos disponibles. Para ello, lo primero es representar el territorio mediante parcelas como posibles unidades de tratamiento (lo más homogéneas posible) o en cuyos límites



Figura 9.2. Ejemplo de gestión de combustible (cortafuegos, limpieza...)

es posible realizar cortafuegos. Una vez que se ha diseñado esta división del territorio, la selección de las zonas donde aplicar los tratamientos se puede realizar mediante distintas aproximaciones. La más extendida es desarrollar índices compuestos para valorar cada parcela, basados en sus características, como pendiente, vegetación, cercanía a carreteras y zonas habitadas... Estos índices suelen incorporar también datos históricos de incendios, que, en los análisis más elaborados, incluyen estudios de semejanza entre parcelas para incluir esta información, dado que el número de incendios puede ser limitado para poder hacer inferencias a partir de los incendios ocurridos en una parcela. Sin embargo, esta aproximación adolece de la falta de interacción entre labores de tratamiento, no tiene una visión



Figura 9.3. Sierra de los Filabres (Almería)

global del territorio. Por ejemplo, una zona puede tener un índice de peligrosidad, pero si se trataran todas las de alrededor su índice no cambiaría, cuando difícilmente un incendio podría propagarse desde o hasta allí.

Para poder ver el efecto global de las medidas, es necesario trabajar conjuntamente con todas las parcelas y establecer criterios de valoración para dar alguna medida para el riesgo global del territorio que permita comparar las distintas configuraciones bajo un futuro incierto.

Una primera aproximación sería de carácter probabilista. Es decir, medir el riesgo de incendio en un territorio dentro de un periodo de tiempo, como el valor esperado de las áreas quemadas, donde las probabilidades cuantifican el riesgo de que cada una de las parcelas sufra un incendio. Esta probabilidad se podría obtener a partir de la probabilidad de que haya una ignición en cada una de las parcelas en el periodo de tiempo estudiado, y la probabilidad de propagación desde una parcela a otra en caso de incendio. Con ello se tendría una medida para comparar distintas configuraciones de tratamientos en las parcelas y de ubicación de cortafuegos, y plantear modelos matemáticos para decidir cuáles son las mejores en términos de esa medida del riesgo.

Sin embargo, este cálculo de la probabilidad de que arda una parcela a partir de las probabilidades de ignición y propagación no

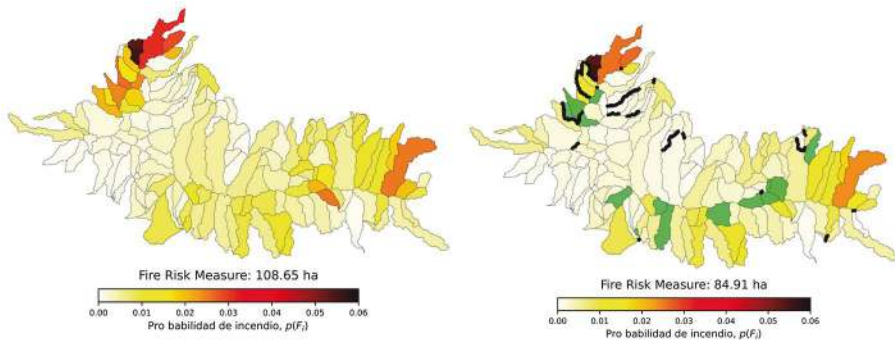


Figura 9.4. Medida de riesgo antes y después de la optimización.

Fuente: elaboración propia

es tan sencillo, como puede verse en (Rodríguez-Martínez y Vitoriano, 2020), teniendo que recurrir a las redes bayesianas como método para calcularlo. A esto hay que añadir que las redes bayesianas no pueden tener ciclos, por lo que se establecen escenarios de dirección e intensidad del viento en el territorio para estimar probabilidades diferentes de propagación de una parcela a otra colindante en función de las características del viento. Una aplicación de esta metodología puede verse en (Rodríguez-Martínez, 2021) para obtener el riesgo de incendio en la sierra de los Filabres (Almería) (figura 9.3), incluyendo un método para obtener los escenarios y estimar las probabilidades de ignición y propagación a partir de datos históricos de viento en la zona.

Esta medida sería el criterio o función objetivo de un modelo de optimización no lineal entero con limitación de recursos representada por el área máxima que se puede tratar y longitud máxima de cortafuegos que se pueden ubicar. En (Ballesteros, 2023) se aborda el problema de optimización para el mismo caso de la sierra de los Filabres, con el resultado que puede verse en la figura 9.4. En verde parcelas tratadas y en negra cortafuegos.

Otras aproximaciones probabilísticas modelizan la propagación de un incendio por el territorio de forma semejante a la propagación de rumores o noticias en redes sociales, utilizando métodos para identificar las parcelas que tienen más influencia en la propagación para actuar sobre ellas.

Sin embargo, la estimación de las probabilidades y la dificultad para resolver esos modelos han llevado a utilizar otras aproximaciones no probabilísticas mediante otras características de las parcelas que puedan servir como aproximación del riesgo del territorio.

En León *et al.*, 2019 se puede ver una aproximación que utiliza como medida de riesgo de una parcela la edad de la vegetación. Cuanto mayor es la edad de la vegetación en la parcela, más fácil es que arda y que se propague un incendio. Así, se plantea el problema de la selección de las parcelas donde desarrollar quemas controladas con el objetivo de minimizar el número de parcelas colindantes cuya vegetación tenga una edad que supere un umbral (como aproximación del riesgo de propagación entre parcelas) a la vez que minimizar el número de parcelas que superan ese umbral (como aproximación al riesgo de ignición). Por otra parte, las quemas controladas son un método muy agresivo con la vegetación que impacta fuertemente sobre la fauna, produciendo migraciones e incluso desaparición de especies en el territorio. Por este motivo, en el problema se considera también un tercer criterio que es el hábitat de los animales que viven en un territorio, teniendo en cuenta que estos tienen una preferencia sobre la edad de la vegetación, ya que habitualmente no les gusta ni vegetación muy joven ni muy aviejada, con la dificultad añadida de que no todas las especies tienen las mismas preferencias. En el problema se incluyen, entonces, las preferencias de edad de vegetación de un número de especies que sea especialmente sensible, como especies protegidas. El problema se plantea como un problema de decisión multicriterio formulado mediante programación entera mixta, donde las variables representan las parcelas seleccionadas como unidades de tratamiento a lo largo de un periodo de planificación de varios años para poder ver los efectos de las decisiones.

Pero el problema es más complejo, ya que los recursos para realizar las quemas previstas pueden no estar disponibles en todo momento. En particular, estas quemas se realizan en periodos de tiempo en que no haya riesgo de que se transformen en quemas descontroladas, es decir, condiciones de temperatura, viento y humedad que no favorezcan la propagación. Y esas condiciones no siempre se dan (ni pueden conocerse con mucha antelación), por lo que hay que añadir la incertidumbre asociada a esa disponibilidad. En León *et al.*, 2020 se plantea esa incertidumbre como escenarios probabilísticos de área que se puede quemar y se impone una ordenación común entre las acciones a realizar en cada escenario, de modo que un escenario con mayor disponibilidad que otro propondrá las mismas unidades de tratamiento que el anterior y, además, posiblemente, otras unidades. De esta forma, el modelo planteado es un modelo de programación estocástica multiobjetivo.

Por otra parte, cuando se trabaja con incertidumbre en la toma de decisiones para minimizar el riesgo de desastre, hay que tener

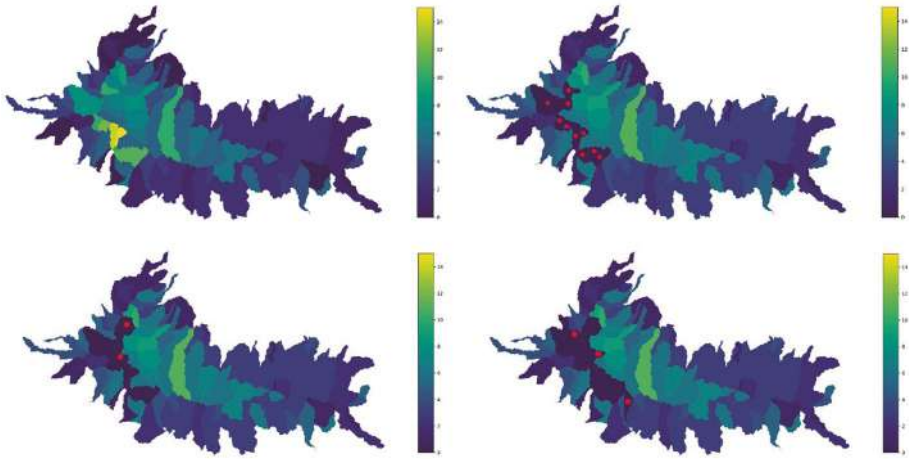


Figura 9.5. Edad inicial (arriba izquierda), parcelas donde actuar con mínima disponibilidad (arriba derecha), parcelas añadidas con disponibilidad media (abajo izquierda) y con disponibilidad máxima (abajo derecha). Fuente: elaboración propia

en cuenta que enfocarse en valores medios puede no ser la mejor opción, ya que no se tiene control sobre escenarios extremos que puedan ser terriblemente devastadores, o sobre algunos criterios que puedan ser minusvalorados. Por este motivo, en situaciones con aversión al riesgo como es la toma de decisiones bajo incertidumbre para protegernos de los riesgos, es habitual usar otro tipo de medidas como el valor en riesgo (VaR), que lo que busca es que un percentil determinado de la distribución de pérdidas sea lo mejor posible, o el valor en riesgo condicional (CVaR), que es el valor esperado de las pérdidas que son peores que ese VaR. El CVaR es numéricamente más tratable que el VaR y por ello más utilizado en modelos de optimización. Respecto a los criterios, para intentar que aquellos que tengan peor rendimiento lo tengan lo menos malo posible, es común usar la técnica de agregación de criterios mediante operadores de media ponderada ordenada (OWA), que permite ponderar los criterios en función del orden de su rendimiento o valor. Por ejemplo, aquí se incluye que el operador pueda fijarse solo en el criterio que peor valor tiene, o en el que mejor, o en los que estén peor y cuya suma de importancias estén por debajo de un umbral. En León *et al.*, 2020 se puede ver la formulación mediante programación lineal de la combinación de CVaR y OWAs para problemas con aversión al riesgo, que es aplicada para la ubicación de quemas controladas en la Sierra de los Filabres en León *et al.*, 2023, cuyos resultados se presentan en la [figura 9.5](#).

## 2.2. Fase de respuesta: extinción y evacuación

La fase de respuesta se desarrolla ante un evento o unos eventos concretos. Ya no hay que tomar medidas generales, sino enfocadas a una zona concreta en un momento concreto. Al conocerse generalmente el punto o los puntos de ignición (y con ello las características de la zona) y las condiciones meteorológicas, es posible hacer estimaciones del comportamiento que va a tener el incendio. Sin embargo, no todo es conocido. La información muchas veces se va revelando poco a poco, la meteorología puede ser cambiante y la propia dinámica del fuego puede alterar su comportamiento frente a estimaciones previstas.

### 2.2.1. Extinción

Una de las actividades en la fase de respuesta ante un incendio, y quizá la más conocida, es la extinción. Las tareas de extinción se centran en intentar sofocar o, al menos, controlar el incendio. Los métodos de combate se dividen en directos e indirectos. Los métodos directos incluyen enfriar el combustible con agua, desplazar el oxígeno atacando la base de las llamas usando batefuegos, cubrir el frente (la línea de fuego) con tierra o crear una línea de defensa en el borde del fuego cortando la continuidad del combustible. Se utilizan en incendios incipientes y/o superficiales. Los métodos indirectos se utilizan en fuegos de propagación rápida o cuando las condiciones de trabajo son difíciles (mucho humo y calor, vegetación densa, topografía abrupta, etc.). El primer paso consiste en establecer una línea de control a cierta distancia del incendio. Para completar el trabajo existen dos opciones: quemar toda la vegetación que hay entre la línea y el incendio (contrafuego) o esperar a que el fuego llegue hasta el borde y se consuma, lo cual puede favorecerse incrementando el contenido en humedad de la vegetación entre la línea de fuego y la de control.

Las decisiones a tomar durante la extinción de un incendio forestal suponen determinar dónde han de colocarse los recursos y cómo han de moverse, de manera que se frene o, al menos, se ralentice el avance del fuego. Estos recursos incluyen medios aéreos y medios terrestres. Entre los medios aéreos se encuentran aviones y helicópteros. También los drones se han incorporado a la lucha contra incendios, pero su función es principalmente para recogida de información. Los medios terrestres incluyen brigadas con todo tipo de

herramientas mecánicas (hacha-azada, rastrillo-azada, batefuegos, extintores de mochila, motosierras, etc.), y vehículos auxiliares (autobombas y vehículos con depósitos de agua desde los que utilizar mangueras, tractores con palas de empuje, etc.).

Las decisiones de cómo, dónde y cuándo actuar con los recursos disponibles han de tomarse teniendo en cuenta el comportamiento de la propagación del incendio, pero este a su vez se ve modificado por las propias acciones desarrolladas en contra de su avance. El problema de la extinción de incendios forestales es particularmente complejo debido a esta interrelación. De hecho, no son pocos los simuladores de propagación de un incendio (Pereira Pacheco *et al.*, 2015) y, sin embargo, pocos sistemas son capaces de integrar las decisiones de extinción modificando el comportamiento del incendio.

En general, los sistemas que integran estas decisiones están basados en modelos de investigación operativa en los que el dinamismo del comportamiento del fuego se representa asumiendo la metodología de tiempo de viaje mínimo (MTT por sus siglas en inglés), la cual supone que el fuego viajará desde el punto de ignición hasta un punto dado del paisaje siguiendo el camino más corto disponible (tiempo de viaje).

La integración de esta representación en los modelos permite establecer restricciones de seguridad a las acciones relacionadas con la distancia entre los recursos y el frente del incendio. Estas restricciones condicionarán las acciones posibles, pero a su vez las acciones modificarán el comportamiento del fuego, ya que su efecto será ir restringiendo los caminos disponibles, algo que la formulación MTT tendrá en cuenta.

La información que utiliza la metodología MTT se basa en la tasa de propagación del fuego. Este dato puede ser calculado mediante simuladores del comportamiento del fuego o por personas expertas, teniéndose en cuenta información del terreno como la cobertura vegetal o la pendiente, información meteorológica como la humedad relativa y la dirección y velocidad del viento y otra información del contexto para hacer la estimación.

El propósito principal de la extinción es acabar con el incendio, pero ¿cómo valorar los planes de operaciones de extinción a la hora de tomar las decisiones? En general, el criterio de valoración que puede venir rápidamente a la cabeza es el de minimizar el área quemada o su valor. Sin embargo, también se siente la necesidad de intentar acabar con él lo más rápido posible, especialmente ante un futuro cambiante. Además, minimizar el tiempo supone menos horas de trabajo, lo que puede ser interesante para evitar estrés por

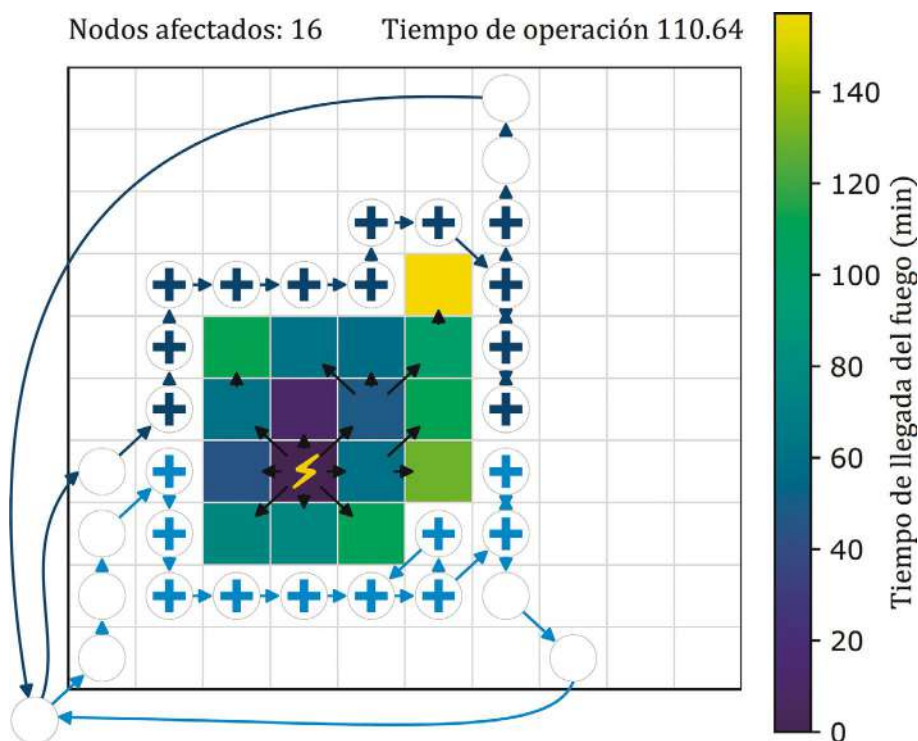


Figura 9.6. Plan de extinción propuesto por un modelo de apoyo a la decisión.

Fuente: elaboración propia

mucha carga en los equipos y les permite estar disponibles ante nuevas amenazas. También una rápida extinción suele estar relacionada con una menor superficie afectada, aunque no directamente.

Por otra parte, los incendios más peligrosos son aquellos que se acercan a la interfaz urbano-forestal (WUI por sus siglas en inglés), amenazando vidas humanas y activos. En este caso, sería interesante priorizar estrategias de extinción que permitan alejar el incendio de estas zonas, aunque no se termine rápidamente con él o acabe quemando un área mayor. También puede ser prioritario contener el incendio para que no se aproxime a carreteras que puedan ser usadas como rutas de evacuación.

Lamentablemente, los recursos para luchar contra los incendios son limitados y muchas organizaciones cuentan con presupuestos muy ajustados. Así pues, los costes de una operación de extinción pueden ser también un criterio que incluir en la valoración de las decisiones.

Si bien algunos de los criterios mencionados están relacionados, muchos de ellos van en direcciones opuestas: si queremos acabar rápidamente con el incendio necesitamos más recursos, aumentando el coste. Si queremos reducir costes, esto puede suponer un incremento del área quemada, por un retraso en la extinción. Si queremos evitar que el fuego arrase una población, quizá debamos centrar los esfuerzos allí, dejando que el fuego escape por otro flanco (menos prioritario), aumentando también el área quemada. En (Alvelos, 2018) se hace un estudio de cómo utilizar distintos criterios como función objetivo y cómo esto afecta a las soluciones obtenidas.

La decisión multicriterio permite combinar varios objetivos, de manera que el plan adoptado sea el mejor en algún sentido, teniendo en cuenta todos los criterios considerados relevantes. Por ejemplo, los criterios mencionados para la extinción de incendios podrían ordenarse por niveles de prioridad, imponiendo como de más importancia los relacionados con la protección de vidas humanas y activos, sin opción de compensar con otros criterios; en segundo lugar, los relacionados con el área quemada o el tiempo de actuación, y, por último, los relacionados con los costes.

Este método *lexicográfico* permite encontrar, dentro de las soluciones que minimizan los daños personales y materiales, aquellas que minimizan el área quemada y/o el tiempo de actuación y seleccionar de estas aquellas que suponen menor coste. En Granda *et al.*, 2025, puede verse un estudio basado en este método lexicográfico (la [figura 9.6](#) presenta una de las soluciones obtenidas. Las cruces representan los lugares en los que deben actuar los equipos, cada color indica un equipo distinto), en el que no se incluye incertidumbre en los parámetros, que debe ser el siguiente paso para poder implementar un sistema de ayuda a la decisión para la extinción de incendios forestales.

Una recopilación actualizada de modelos y metodologías de investigación operativa aplicada a la extinción de incendios forestales puede encontrarse en Granda *et al.*, 2023.

### 2.2.2. Evacuación

En la fase de respuesta inmediata ante un incendio que está propagándose es posible que surja la necesidad de evacuar a parte de la población debido al riesgo de que el incendio se acerque demasiado a zonas habitadas. Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, una evacuación «consiste

en trasladar temporalmente a personas y bienes a lugares más seguros, antes, durante o después de que se produzca un suceso peligroso, con el fin de protegerlos». Son importantes los trabajos que tratan el problema de evacuación de edificios o medios de transporte accidentados, pero ante la presencia de un incendio forestal que se aproxima a zonas residenciales surge el problema de evacuación de todos los habitantes de las zonas afectadas. Según cómo se realice, se distinguen varias formas de evacuación:

- Evacuación independiente: una vez recibido el aviso de evacuación, las personas tomarán sus propias medidas para desplazarse desde un lugar de peligro o amenaza de peligro a un lugar seguro utilizando, generalmente, su propio medio de transporte. No necesitan ayuda de la comunidad más allá de las comunicaciones generales de advertencia e información.
- Evacuación apoyada: las personas son capaces de trasladarse por sí mismas, pero necesitan algún tipo de ayuda, como indicaciones sobre dónde evacuar o por qué medios o bien medios de transporte colectivos que estén en funcionamiento.
- Evacuación asistida: las personas no pueden evacuar por sus propios medios y requieren el apoyo de los servicios de emergencia y las autoridades.

En general, ante un incendio, la mayor parte de la población evacuará de forma independiente si las circunstancias lo permiten. En estos casos, además de los problemas de gestión de sistemas de alarma y aviso para transmitir la orden de evacuación, aparecen problemas de congestión del tráfico, cuellos de botella, patrones y pánico, cuestiones que se modelizan tradicionalmente en la literatura mediante modelos de programación no lineal y teoría de colas. En los últimos años se han desarrollado sistemas de ayuda a la decisión para apoyar a la evacuación por medio de información recogida y enviada a los dispositivos móviles de los usuarios.

Sin embargo, mientras que muchos residentes pueden evacuar de manera independiente, aquellos con discapacidades o necesidades especiales requieren de una evacuación asistida, lo que plantea desafíos logísticos adicionales. La evacuación asistida implica el transporte de estas personas vulnerables a refugios o centros médicos, donde además deben recibir suministros básicos que garanticen su bienestar. En Flores *et al.* (2023) se desarrolla un modelo de evacuación asistida que tiene en cuenta estas dos dimensiones.

El objetivo principal de los modelos de evacuación es maximizar el número de evacuados que llegan a lugar seguro, combinado con minimizar el tiempo de respuesta o la distancia de viaje desde la zona afectada hasta la segura. Además, en problemas de evacuación asistida pueden surgir otros criterios, como el coste, la cobertura, la fiabilidad o la seguridad, por lo que se tratará en general de modelos multicriterio.

Si nos centramos en el problema de evacuación asistida, la literatura ha abordado los problemas de recogida de personas vulnerables y los problemas de distribución de suministros a los refugios de manera separada. Se han propuesto soluciones para la evacuación durante incendios y para la distribución de suministros en escenarios de ayuda humanitaria, pero ninguno ha logrado una integración adecuada de ambas operaciones en situaciones dinámicas, donde tanto las personas como los suministros llegan a diferentes tiempos y lugares bajo la presión del avance de un fuego. Así, en Flores *et al.* (2023) se presenta un nuevo modelo de programación matemática con múltiples criterios que aborda de manera conjunta la evacuación de personas vulnerables y la distribución de suministros esenciales a los refugios durante incendios forestales. El modelo propuesto se distingue por ser más flexible que los enfoques anteriores, al permitir una planificación coordinada que optimiza tanto la evacuación como la distribución de recursos.

El modelo se centra en la creación de un plan detallado para la evacuación asistida de personas vulnerables y la distribución de suministros durante incendios forestales. Se considera que una persona es vulnerable si no puede evacuar por sus propios medios debido a limitaciones físicas o emocionales y requiere ayuda especial, como el uso de ambulancias o transporte adaptado. El problema es intrínsecamente dinámico, ya que los evacuados llegan a los puntos de recogida a lo largo del tiempo en función de su percepción del riesgo y la ayuda recibida de equipos de emergencia. Además, la distribución de suministros (como alimentos, agua y medicinas) a los refugios y hospitales también varía a lo largo del tiempo, lo que añade una mayor complejidad a la planificación logística.

La zona de operación está representada por una red dinámica que abarca tanto las áreas inseguras, donde se encuentran los puntos de recogida de los evacuados, como las áreas seguras, que incluyen refugios, hospitales y depósitos de suministros. Las carreteras que conectan estos lugares pueden tener diferentes características (autopistas, caminos locales, etc.), algunas de las cuales pueden estar bloqueadas o dañadas debido al incendio. El modelo considera

la capacidad de los refugios y hospitales para albergar tanto a las personas evacuadas como los suministros. El transporte de personas y suministros se realiza con una flota heterogénea de vehículos, cada uno con capacidades diferenciadas para evacuar personas o transportar suministros.

Aparecen, además, múltiples criterios que deben ser considerados de manera conjunta. El modelo opta por un tratamiento lexicográfico, donde el primer objetivo es maximizar el número de personas evacuadas, con prioridad para aquellas que tienen necesidades médicas urgentes o discapacidades. El segundo es minimizar el tiempo necesario para evacuar a estas personas prioritarias, mientras que en un tercer nivel se incluye minimizar el tiempo total de la operación, los costes asociados a la evacuación y la distribución de suministros y la demanda insatisfecha de los suministros necesarios para el bienestar de los evacuados. Se opta entonces por un modelo de programación por metas lexicográfico.

Además, se clasifica tanto a las personas evacuadas como a los suministros. Las personas son categorizadas según su estado de salud, lo que afecta a su prioridad de evacuación. Los suministros se dividen en consumibles, como alimentos y medicinas, y no consumibles, como mantas o generadores eléctricos. La disponibilidad de suministros es dinámica, ya que pueden provenir de donaciones o envíos externos durante la operación y se tiene en cuenta la necesidad de asegurar que los suministros lleguen a los refugios a tiempo para cubrir las necesidades de los evacuados, garantizando su bienestar durante la emergencia.

Para validar el modelo, se utiliza un caso de estudio basado en el incendio de Saddleridge, en California, en 2019, en el que más de 100 000 residentes fueron forzados a evacuar y en el que Cruz Roja abrió cuatro refugios y movilizó a 150 trabajadores para la evacuación y atención de más de 440 personas que llamaron solicitando asistencia para la evacuación, algunas de las cuales fueron desviadas a hospitales cercanos. Debido al bloqueo de parte de las vías, algunos traslados tuvieron que hacerse en helicóptero. Este caso resalta los beneficios de un enfoque integrado, mejorando tanto la eficiencia como la capacidad de respuesta. En él queda de manifiesto que la coordinación entre la evacuación y la distribución de suministros es clave para garantizar la seguridad y el bienestar de las personas afectadas, ilustrando la importancia de un enfoque flexible y dinámico en la gestión de la evacuación ante incendios forestales. En la [figura 9.7](#) se muestran alguna de las rutas de evacuación propuestas.

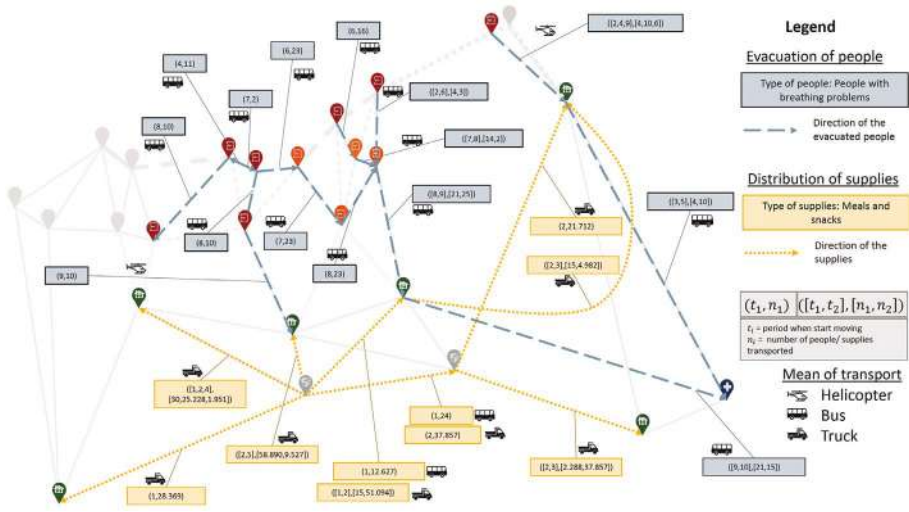


Figura 9.7. Plan parcial de evacuación para personas con problemas respiratorios en el incendio de Saddleridge (California 2019). Fuente: elaboración propia

## CONCLUSIONES

La toma de decisiones en la gestión de desastres naturales es compleja, debido a la multiplicidad de factores y criterios a tener en cuenta. Otros aspectos que incrementan su complejidad son la disponibilidad de recursos, generalmente escasos, y la incertidumbre inherente a este tipo de procesos. Este proceso de toma de decisiones es crítico, ya que, en general, sus consecuencias pueden ser fatales, no solo en términos de bienes materiales, sino también de vidas humanas.

La decisión multicriterio se presenta como una herramienta útil que permite incorporar la visión multifacética en la gestión de incendios forestales. Su capacidad para combinar múltiples objetivos es crucial para minimizar daños sociales, económicos y ambientales.

Al igual que en cualquier otro desastre natural, la gestión de los incendios forestales se estructura en cuatro fases: mitigación y prevención, preparación, respuesta y recuperación. En este capítulo se han mostrado varios ejemplos de cómo las metodologías de la decisión multicriterio pueden incorporarse en distintas situaciones en las fases de mitigación y prevención, y respuesta, ante un incendio forestal.

En la fase de mitigación y prevención la decisión multicriterio permite priorizar medidas que reduzcan la posibilidad y las consecuencias de potenciales incendios, optimizando el uso de los recursos disponibles. Estas medidas deben ser tomadas antes de que suceda un evento crítico y, por tanto, en un contexto de alta incertidumbre.

La integración de técnicas de investigación operativa ayuda a lidiar con este aspecto. Reducir el riesgo asociado a los potenciales incendios forestales en un territorio, tanto en términos de ignición o de propagación mitigando sus consecuencias e incorporando el efecto sobre la calidad del hábitat de la fauna, son objetivos a perseguir en esta fase.

En la fase de respuesta, la decisión multicriterio permite dar apoyo para tomar decisiones rápidas y efectivas, en un contexto de alta presión temporal. Aspectos como la seguridad del personal de respuesta, la protección de áreas de especial interés, la reducción del área afectada en las actividades de extinción, la rapidez de la evacuación, o la seguridad de las personas evacuadas y su atención posterior en la evacuación asistida, son criterios a tener en cuenta en esta fase.

En conclusión, la decisión multicriterio aporta herramientas que facilitan la toma de decisiones informadas a lo largo de todo el ciclo de gestión de desastres. No solo permite desarrollar estrategias durante la fase de respuesta ante un incendio forestal, sino que aumenta la capacidad de anticipación en la fase de mitigación y preparación, ayudando a generar paisajes resilientes, permitiendo enfrentar los desafíos de los futuros incendios forestales en un contexto en el que su severidad y frecuencia van en aumento.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto HURRICANE, Convocatoria HORIZON-CL3-2023-DRS-01-05, número 10116801, de la European Research Executive Agency.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvelos, F. (2018): *Mixed Integer programming models for fire fighting*. Melbourne: Springer.
- Ballesteros, E. (2023): *Un modelo de optimización para la localización de quemas controladas y cortafuegos en prevención de incendios forestales*. [trabajo fin de máster]. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Flores, I., Ortuño, M. y Tirado, G. (2023): «A goal programming model for early evacuation of vulnerable people and relief distribution during a wildfire», *Safety Science*, 164, 106117.

- Granda, B., León, J., Vitoriano, B. y Hearne, J. (2023): «Decision support models and methodologies for fire suppression», *Fire*, 6(2), p. 37.
- Granda, B., Vitoriano, B. y Figueira, J. R. (2025): «A Mathematical programming approach for a wildfire suppression problem», *Operational Research an International Journal*, 25, 16.
- León, J., Puerto, J. y Vitoriano, B. (2020): «A risk-aversion approach for the multiobjective stochastic programming problem», *Mathematics*, 8, 11.
- León, J., Reijnders, V., Hearne, J., Ozlen, M. y Reinke, K. (2019): «A landscape-scale optimisation model to break the hazardous fuel continuum while maintaining habitat quality», *Environmental Modeling & Assessment*, 24(4), 369-379.
- León, J., Vitoriano, B. y Hearne, J. (2023): «A risk-averse solution for the prescribed burning problem», *Safety Science*, 158, 105951.
- Pereira Pacheco, A., Claro, J., Fernandes, P., DeNeufville, R., Oliveira, T., Borges, J. y Coelho Rodrigues, J. (2015): «Cohesive fire management within an uncertain environment: A review of risk handling and decision support systems», *Forest Ecology and Management*, 347, 1-17.
- Rodríguez-Martínez, A. (2021): *Modelización estocástica y generación de escenarios para gestión de desastres*. [tesis doctoral]. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Rodríguez-Martínez, A. y Vitoriano, B. (2020): «Probability-based wildfire risk measure for decision-making», *Mathematics*, 8(4), 557.

# Utilización de técnicas multicriterio en red para la priorización y valoración económica de servicios ecosistémicos

DAVID JORGE GARCÍA  
*Universitat Politècnica de València*

VICENT ESTRUCH GUITART  
*Universitat Politècnica de València*

PABLO ARAGONÉS BELTRÁN  
*Universitat Politècnica de València*

JUAN PASCUAL PASTOR FERRANDO  
*Universitat Politècnica de València*

## INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista ecológico, un ecosistema es un conjunto de especies (factores bióticos) que habitan en un espacio determinado (factores abióticos), los cuales interactúan a través de múltiples procesos ecológicos. De estas relaciones y procesos, los ecosistemas cumplen múltiples funciones ecológicas que contribuyen al desarrollo de la vida del planeta.

El ser humano se ha aproximado a los ecosistemas entendiéndolos como un capital natural del cual se pueden obtener múltiples

beneficios gracias al mantenimiento de sus funciones (Montes, 2007; Martín-López *et al.*, 2009). De esta forma, y siguiendo una visión antropocéntrica de los ecosistemas, nace el concepto de servicios ecosistémicos, que se definen como aquellos beneficios provenientes de los ecosistemas que, aprovechados directa o indirectamente, contribuyen a la calidad de vida del ser humano (MEA, 2005). Dicho de otro modo, las funciones ecológicas de los ecosistemas existen independientemente de su uso, demanda, disfrute o valoración social. Sin embargo, estas funciones o procesos solo se traducen a servicios ecosistémicos cuando son aprovechadas, de forma consciente o inconsciente, por la sociedad (Martín-López y Montes, 2010).

El mantenimiento de los servicios ecosistémicos resulta esencial para lograr un desarrollo sostenible, si bien muchos estudios, como el realizado por Wang *et al.* (2023), corroboran que, durante las últimas décadas, al menos dos tercios de los servicios ecosistémicos a nivel global han decrecido considerablemente. La naturaleza de los ecosistemas genera múltiples externalidades inagotables, lo que conduce a su uso excesivo y, por tanto, a su infravaloración social (Zhou *et al.*, 2020). Además, los servicios ecosistémicos que generan estas áreas, sobre todo aquellos más intangibles, son en gran medida infravalorados por la sociedad que se beneficia de ellos, en gran parte, por no formar parte explícitamente de la economía de mercado (Aznar y Estruch, 2020). Igualmente, en muchos casos tampoco resulta fácilmente observable cómo algunos servicios ecosistémicos afectan al bienestar humano. La mayoría de la gente no los valora, generando un uso excesivo, ineficiente y que provoca un deterioro progresivo de los recursos naturales.

Ante esta situación, un correcto conocimiento y análisis de todas las interacciones entre los servicios ecosistémicos de cualquier área resultan fundamentales para aplicar futuras políticas ambientales encaminadas a una gestión más eficaz y eficiente de los ecosistemas (Liu *et al.*, 2024). Estas interacciones se pueden reflejar como sinergias, es decir, el cambio en el valor de unos servicios ecosistémicos que provoque el cambio en otros en el mismo sentido (positivo o negativo), pero también como compensaciones, a saber, que el aumento de un servicio ecosistémico induzca al descenso de otro o viceversa (Liang *et al.*, 2021).

Atendiendo a estos preceptos, una de las herramientas utilizadas para analizar la relación entre la sociedad y los servicios ecosistémicos es a través de su priorización y valoración (Adams, 2014; Perez-Verdin *et al.*, 2016; Jorge-García y Estruch-Guitart, 2022). Este tipo de estudios puede servir para adaptar futuros planes de conservación

y restauración de los ecosistemas, permitiendo un diseño más racional de las intervenciones públicas. Por ello, y dada la dificultad e incertidumbre de obtener el valor de los servicios ecosistémicos a través de los métodos de valoración tradicionales, se ha adaptado progresivamente el uso de técnicas multicriterio, enmarcadas en la teoría de la decisión.

## 1. UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS MULTICRITERIO EN LA PRIORIZACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Las técnicas basadas en el análisis multicriterio de decisiones (siglas en inglés MCDA) ayudan a los individuos a tomar decisiones que implican puntos de vista diferentes y múltiples actores interesados (Greco *et al.*, 2016). Entre las técnicas MCDA más conocidas y utilizadas para resolver problemas de decisión complejos está el proceso analítico en red (siglas en inglés, ANP) (Vílchez-Román *et al.*, 2024). ANP fue propuesto por T. Saaty, como una generalización del conocido proceso analítico en jerárquico (siglas en inglés, AHP) (Saaty, 1986) y se utiliza para abordar problemas que tienen muchos elementos de decisión, criterios y alternativas, interrelacionadas, creando dependencias y retroalimentación. Para medir estas influencias entre elementos, Saaty propone agrupar los elementos del modelo en grupos y utilizar matrices de comparación por pares que permiten transformar los juicios de los decisores en prioridades y de este modo evaluar la influencia entre elementos y entre grupos. Más detalles del método se pueden encontrar en Saaty (2008) y reflexiones posteriores sobre el mismo en Mu *et al.* (2020).

Como paso previo a la realización de cualquier estudio cuya sistemática incluya la aplicación de técnicas multicriterio, es esencial realizar un diseño que considere todos aquellos factores metodológicos que pueden influir sobre el resultado del mismo. En cuanto al objetivo de priorización de servicios ecosistémicos, y atendiendo a los diferentes casos de estudio que hemos realizados en humedales mediterráneos, uno de los factores más relevantes es la elección de la técnica multicriterio a emplear. Asimismo, se ha comprobado también la existencia de influencia de factores geográficos y socio-culturales sobre los resultados obtenidos, principalmente relacionados con la selección de los expertos o decisores participantes. A continuación, se detallan ambos extremos para este tipo de estudios, si bien muchas de estas cuestiones podrían ser extrapolables a otros tipos de ámbitos en función de cuál sea el objetivo marcado.

## 1.1. Aplicación de técnicas multicriterio en red: ANP y DANP

De entre los métodos de comparación por pares, el más utilizado en el ámbito de la valoración ambiental es el proceso analítico jerárquico (AHP). Sin embargo, esta técnica agrupa los criterios utilizando una estructura jerárquica por lo que no resulta adecuado cuando los criterios están interconectados, como es el caso de los servicios ecosistémicos. No obstante, y a pesar de simplificar la realidad de los ecosistemas, en algunos casos se sigue utilizando AHP debido a la menor complejidad de los cuestionarios que los expertos deben responder, siendo, además, menor el número de comparaciones pareadas que deben realizar. Alternativamente, las técnicas multicriterio en red sí son capaces de capturar todas estas relaciones entre criterios, siendo, por ende, los más apropiados para, entre otros, el estudio de los servicios ecosistémicos.

Ante esta limitación, el propio Thomas L. Saaty ideó también en 1996 el proceso analítico en red (ANP) como método discreto de análisis de decisiones multicriterio de comparación por pares que, utilizando la misma escala que con AHP, permite capturar toda la interdependencia y realimentación entre criterios y clústeres gracias a su representación en forma de red.

Muchos son los estudios en los que se ha utilizado ANP con éxito, también en el ámbito de la priorización de servicios ecosistémicos. Sin embargo, esta técnica también presenta ciertas limitaciones como la mayor complejidad de las cuestiones que los expertos deben responder en los respectivos cuestionarios, puesto que, a diferencia de AHP, las comparaciones pareadas se realizan también entre criterios de distintos grupos y con un tercer elemento como referencia. Además, especialmente reseñable es el hecho de que los cuestionarios sean mucho más largos, lo que provoca en muchas ocasiones, si el número de criterios es abundante, una sensación de fatiga y aburrimiento en los decisores, lo cual también podría provocar imprecisión, inconsistencia de los juicios o directamente errores de apreciación. Asimismo, cuando el objetivo de estudio incluye muchos criterios por cada clúster, es decir, matrices de comparación pareada con un rango superior a cuatro, resulta muy arduo mantener la suficiente consistencia de los juicios emitidos por los expertos o decisores participantes.

Ante estos inconvenientes, en los últimos años han ido apareciendo, alternativamente, nuevas técnicas en red híbridas con el objetivo de simplificar la complejidad. Es el caso del modelo híbrido que combina el uso de ANP con Decision-Making Trial and Evaluation

Laboratory, DEMATEL (Ishizaka y Mu, 2023), desarrollándose diferentes formas de combinación de ambas técnicas en función del objetivo y el ámbito de estudio, incluyendo los de la ecología, el desarrollo sostenible y la gestión medioambiental (Büyükköçkan y Güleriyüz, 2016; Ghosh *et al.*, 2021).

De entre los diferentes modelos, Kadoić *et al.* (2019) crearon una variante de DANP con el fin de simplificar la complejidad de los cuestionarios y su duración, reduciendo el número de preguntas que deben responder los decisores. En esta técnica, las comparaciones pareadas son sustituidas por el uso de categorías (*ratings*) utilizando la escala lineal de cero a cuatro de DEMATEL (otras escalas son posibles). En este punto, cabe recordar que, en cualquier caso, la utilización de categorías o *ratings* no es ajena a AHP o ANP, ya que Thomas L. Saaty ya incorporó esta posibilidad para aquellos casos en los que la realización de comparaciones pareadas no fuera posible por su complejidad (Saaty, 1986). En la [tabla 10.1](#) se muestra un resumen comparativo entre estas tres técnicas multicriterio: AHP, ANP y DANP.

Tabla 10.1. Comparativa entre las técnicas multicriterio valoradas adaptada al estudio de servicios ecosistémicos

	AHP	ANP	DANP
Adecuación al estudio	Por su estructura jerárquica, no captura las interrelaciones entre criterios, simplificando la realidad.	Como métodos en red, son capaces de capturar las interrelaciones entre criterios, siendo, por tanto, adecuados para este tipo de estudios, si bien son más complejos de utilizar.	
Duración y complejidad	Los decisores dedican menos tiempo al no comparar criterios de clústeres diferentes. Al comparar solo criterios del mismo clúster, resulta más fácil.	Método más complejo y lento. Al comparar todos los criterios entre sí, los cuestionarios resultan tediosos, provocando, en ocasiones, sensación de monotonía y repetición.	El proceso es más lento que AHP al comparar todos los criterios entre sí, pero más rápido que ANP al no comparar por pares
Análisis de la inconsistencia de los juicios	Cada matriz de comparación pareada tiene asociada un coeficiente de consistencia (CR). Su análisis garantiza la consistencia de los juicios.		No mide la consistencia de los juicios al utilizar ratings en vez de comparación por pares.

	AHP	ANP	DANP
Escala utilizada	La escala de Saaty está formada por hasta nueve niveles (intensidad de importancia), abarcando un mayor rango de matices de interpretación. No obstante, al ser una escala exponencial, muchos expertos presentan mayor dificultad en entenderla.		Utiliza la escala DEMATEL formada por solo cinco niveles para medir la influencia entre criterios. Al ser una escala lineal, resulta más manejable.

Viendo las cualidades que presentaba DANP como alternativa simplificada a ANP, especialmente para aquellos casos en que el número de criterios o su complejidad de estudio eran muy altos, Schulze-González *et al.* (2021) realizaron una prueba de este método, aplicándolo a nivel teórico a cuarenta y cinco casos de ANP publicados anteriormente en la literatura científica (ninguno de ellos relacionado con servicios ecosistémicos). Dicho estudio expuso que los valores de las prioridades obtenidas eran análogos a los resultados iniciales obtenidos por ANP.

No obstante, al comparar estas tres técnicas en casos prácticos de priorización de servicios ecosistémicos, se ha comprobado que la compatibilidad y correlación de resultados entre ellos no siempre es tan alta como se esperaba de acuerdo con los casos teóricos. Por ejemplo, en el caso de estudio realizado en el delta del Ebro (Jorge-García *et al.*, 2023), se observó la no existencia de una alta compatibilidad entre los resultados obtenidos por estos tres métodos multicriterio. En cuanto a la correlación, el orden de clasificación de los criterios respecto a los dos métodos en red (ANP y DANP) sí es similar. No obstante, en este estudio se observó que tanto la compatibilidad como la correlación entre métodos aumentan cuando se agregan todas las prioridades, utilizando la media geométrica de los resultados obtenidos por cada experto.

## 1.2. Influencia de factores geográficos y socioculturales

La consideración de las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas multicriterio disponibles, en función del objetivo del estudio a realizar, resulta fundamental, pero también existen otros factores transversales a tener en cuenta. En los trabajos enmarcados dentro del ámbito agroalimentario o medioambiental, cabe señalar que las

características ecológicas de cualquier zona de estudio pueden influir en la percepción que tienen los decisores o expertos participantes, al encontrarse influenciada tanto por las propiedades del propio ecosistema como por los componentes sociales, culturales y económicos que la envuelven (Turner *et al.*, 2010; Hamann *et al.*, 2016).

En cuanto a factores geográficos, es importante delimitar la zona de estudio de una forma clara y exacta, puesto que, dependiendo del ámbito territorial elegido, los resultados pueden diferir. Como ejemplo, se pueden comparar los resultados obtenidos en un estudio realizado en el Parque Natural de l'Albufera (Jorge-García y Estruch-Guitart, 2020) y en el realizado en las Marismas del Guadalquivir (Jorge-García y Estruch-Guitart, 2022), dos de las mayores zonas arroceras de España, ambas ubicadas en humedales mediterráneos de alto valor ecológico. Mientras que en el primer estudio se abarcó todo el ámbito del parque natural, el cual incluye tanto el arrozal como el lago y la zona forestal, en las Marismas de Guadalquivir solo se recogió la zona de cultivo, al estar muy separada al resto de la Reserva de la Biosfera de Doñana. De esta forma, al realizar diferentes análisis estadísticos, se observó que las diferencias entre los resultados obtenidos en ambas áreas son significativas. Concretamente, en las Marismas del Guadalquivir, debido a la mayor homogeneidad del área considerada, los resultados son mucho más uniformes, sobrevalorando los servicios de aprovisionamiento.

Por otro lado, otros factores que presentan una gran influencia sobre los resultados obtenidos en estos estudios son los socioculturales, lo cual afecta especialmente al proceso de selección de expertos participantes en los cuestionarios a realizar. Quintas-Soriano *et al.* (2018) concluyeron en sus estudios que el hecho de que un interesado fuera un experto científico o donara a una organización medioambiental afectaba a la percepción de los ecosistemas. En los tres casos de estudios realizados en los arrozales españoles ubicados en humedales mediterráneos se ha corroborado en la práctica esta afirmación (Jorge-García *et al.*, 2023).

Tomando como ejemplo el estudio realizado en el delta del Ebro, el cual se detalla en el siguiente apartado, los expertos pertenecientes a organizaciones conservacionistas han destacado en mayor medida el papel de los servicios de apoyo, mientras que aquellos cuya formación y contexto laboral relaciona directamente con la agricultura o la pesca han hecho lo propio con los servicios de aprovisionamiento. Asimismo, los expertos relacionados con el ecoturismo han ponderado los servicios culturales con un valor significativamente superior que con el que han valorado el resto de expertos. Por lo

tanto, las percepciones de los responsables de la toma de decisiones o sus antecedentes profesionales podrían haber influido en los resultados obtenidos en esta área.

Atendiendo a la influencia de factores geográficos y socioculturales sobre los resultados, los estudios de priorización de servicios ecosistémicos deben implementar acciones y metodologías participativas que consideren en cualquier caso un abanico lo más amplio posible de percepciones y puntos de vista vinculados al área, así como adaptar los modelos globales hacia una escala local.

## 2. CASO DE ESTUDIO REALIZADO EN EL DELTA DEL EBRO

A continuación, se muestra un caso de estudio real de priorización de servicios ecosistémicos utilizando técnicas multicriterio en red, concretamente ANP y DANP, realizado en el delta del Ebro (España) durante los años 2022-2023 (Jorge-García *et al.*, 2023).

### 2.1. Caracterización y delimitación de la zona de estudio en el delta del Ebro

El delta del Ebro es un humedal mediterráneo costero de gran importancia ambiental y social de Europa Occidental, situado al sureste de Cataluña, el cual se ha formado durante muchos siglos fruto de los procesos de erosión, transporte y sedimentación del río Ebro, predominado sobre los de erosión marina. El delta del Ebro contiene una gran diversidad de hábitats, flora y fauna en una interfaz entre tierra (marismas deltaicas) y el mar. El delta del Ebro es un importante lugar de paso de aves migratorias en primavera y otoño, albergando alrededor de 360 especies de aves de las 600 declaradas en Europa (Rodríguez-Santalla y Navarro, 2021).

Como paso previo a la delimitación de la zona de estudio, es necesario realizar un análisis geográfico y socioeconómico de toda la zona. A nivel geográfico, su superficie emergida terrestre ocupa alrededor de 32500 ha (un 15% del Delta), de las cuales 12560 ha forman parte de la Red Natura 2000 (Lugar de Importancia Comunitaria y Zona de Especial Conservación) y, de estas, 7736 ha forman parte del Parque Natural del Delta del Ebro, considerando que parte de la zona marítima también forma parte.

A nivel económico, como principal actividad destaca la agricultura, especialmente el cultivo del arroz que ocupa alrededor del 70%

de la superficie total. Según las estadísticas públicas del Ministerio de Agricultura, los arrozales ocuparon en 2019 una superficie de 19888 ha, con una producción de 129710 t de arroz, lo que equivale al 19,23% de la superficie arrocera española y un 17,27% en producción nacional. El cultivo del arroz en el delta del Ebro genera aproximadamente una cifra anual de negocio de unos 47,95 millones de euros, lo que supone el 3% de la renta agraria catalana, según los datos facilitados por el Instituto de Estadística de Cataluña. Por otro lado, la pesca es también una actividad primaria muy relevante, la cual va desde la pesca tradicional en las lagunas y bahías hasta la acuicultura más puntera de bivalvos, destacando el mejillón mediterráneo como predominante, seguido de la ostra. Además, también destaca la pesca tradicional en las lagunas, como la pesca de la anguila mediante el arte ancestral de la «pantena».

Además, y aunque de forma secundaria, la ganadería, la huerta y la caza son otras actividades económicas de aprovisionamiento en la zona. A nivel industrial no agrícola, una empresa privada explota las salinas de La Trinidad dentro del Parque Natural del Delta del Ebro, produciendo entre 70000 y 80000 toneladas anuales de media. Sin embargo, la actividad económica que más ha crecido en la última década es la terciaria, especialmente el ecoturismo.

Atendiendo al estudio de estas características, cabe destacar que el cultivo del arroz, siendo la actividad económica más importante del delta del Ebro, no se encuentra dentro de los límites que abarca la figura de parque natural, si bien la forma de producción del arroz por inundación se encuentra totalmente ligado a los procesos ecosistémicos y ecológicos de la zona. Por lo tanto, la delimitación de la zona de estudio en este caso sería de todo el delta del Ebro, tomando la N-340 Valencia – Barcelona como límite terrestre, al ser esta la que bordea el propio delta y, asimismo, es considerada por la población como el límite del área.

## **2.2. Selección de criterios: servicios ecosistémicos relevantes en el delta del Ebro**

El uso de una clasificación de servicios ecosistémicos estándar, armonizada y reconocida internacionalmente aumenta la transparencia, la comunicación y la eficiencia en la traslación de los conceptos científicos a la toma de decisiones (Polasky *et al.*, 2015; McDonough *et al.*, 2017). En la actualidad, coexisten diferentes clasificaciones según objetivo y funcionalidad, si bien en general existe un amplio consenso

en dividirlos en tres o cuatro grandes grupos (Jiang, 2017). La clasificación de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) parte de cuatro categorías o grupos de servicios ecosistémicos: soporte o apoyo, aprovisionamiento o abastecimiento, regulación y, finalmente, los servicios culturales.

Los servicios de aprovisionamiento son aquellos productos que el ser humano obtiene de forma directa de los ecosistemas para su consumo o disfrute como, por ejemplo, los alimentos (agricultura, pesca, caza...), el agua dulce, las materias primas, recursos ornamentales; etc. Por otro lado, los servicios de regulación son beneficios que se obtienen indirectamente, como la purificación o mejora de la calidad del agua, la regulación del clima o la erosión del suelo, la mitigación del cambio climático, etc. En tercer lugar, los servicios culturales tratan los beneficios intangibles como el valor estético o paisajístico, el valor artístico, el sentimiento de pertenencia o identitario, etc. Por último, se encuentran los servicios de soporte o apoyo, entendidos como los procesos o funciones ecológicas que subyacen a los restantes servicios ecosistémicos, por lo que son considerados como servicios ecosistémicos intermedios, a diferencia de los otros tres grupos (servicios ecosistémicos finales) (Fisher *et al.*, 2009).

Tabla 10.2. Listado final de criterios (servicios ecosistémicos) a priorizar partiendo como base de la clasificación del MEA (2005)

Servicios apoyo / soporte	C11	Biodiversidad y geodiversidad
	C12	Conectividad y complementariedad ecológica
	C13	Producción primaria
Servicio de provisión / aprov.	C21	Provisión de recursos alimentarios (arroz y pesca)
Servicios regulación	C31	Protección del litoral frente a la salinidad
	C32	Tratamiento y mejora de la calidad del agua
	C33	Mitigación del cambio climático y secuestro de C.
	C34	Polinización y control biológico
Servicios culturales	C41	Disfrute del paisaje
	C42	Conocimiento, activ. de entretenimiento ambiental, ocio y ecoturismo.
	C43	Patrimonio cultural e histórico
	C44	Identidad y sentimiento de pertenencia.

Partiendo de la clasificación del MEA (2005) para humedales como base, se realizó una entrevista con algunos expertos, así como con agricultores y pescadores residentes para que fuera ellos quienes, bajo consenso, adaptaran dicho listado general a la realidad. En un primer lugar, se eliminaron aquellos servicios ecosistémicos que no existían en la zona de estudio y, posteriormente, se descartaron aquellos que eran considerados como muy poco relevantes. Por último, y para garantizar que no hubiera demasiados criterios (servicios ecosistémicos) a priorizar dentro del mismo clúster o grupo, para así evitar una mayor inconsistencia de los juicios a la hora de aplicar ANP, en algunos casos se fusionaron algunos servicios ecosistémicos cuya descripción no difería mucho. Tras este proceso, el listado final de servicios ecosistémicos se estipuló tal como se muestra en la [tabla 10.2](#).

### 2.3. Selección de expertos participantes

Para realizar el estudio de la influencia de factores socioculturales en el uso de técnicas multicriterio en las que se precisa la emisión de juicios por parte de decisores o expertos, la inclusión de múltiples perspectivas de las partes interesadas resulta fundamental para mejorar la eficacia en la aplicación de estos métodos y en la obtención de resultados, especialmente cuando intervienen decisiones complejas como en este ámbito de la gestión y política ambiental.

Por ello, en este estudio se han elegido once expertos que muestran una visión amplia de la realidad social, ecológica y económica de la zona, cuyos contextos además abarcan un abanico amplio de puntos de vista diferentes. A continuación, se enumeran de forma resumida las funciones o contextos sociolaborales de los once expertos seleccionados:

- Técnico experto en filtros verdes.
- Gerente de una empresa de ecoturismo.
- Técnico en una ONG conservacionista de ámbito local.
- Técnico en una ONG conservacionista de ámbito nacional con equipo en la zona.
- Investigador en el Departamento de Cambio Climático en un centro tecnológico.
- Investigador especializado en economía medioambiental.
- Investigador especializado en producción de arroz.
- Investigador especializado en servicios de regulación en arrozales.

- Investigador especializado en acuicultura.
- Investigador especializado en pesca.
- Técnico en el consorcio que administra las Tierras del Ebro.

## 2.4. Aplicación de las técnicas multicriterio en red

Una vez delimitada la zona de estudio, los criterios (servicios ecosistémicos) seleccionados y agrupados y los expertos participantes designados, se pueden aplicar las técnicas multicriterio en red para su priorización.

Como se ha comentado en la introducción, la realización de comparaciones pareadas a través de ANP permite medir y comprobar la consistencia de los juicios emitidos por los expertos, siendo esta de las ventajas más importantes de esta técnica. No obstante, la complejidad de los cuestionarios provoca en múltiples ocasiones una sensación de repetición y aburrimiento en los expertos que puede provocar una distorsión de los resultados en algunos casos. Además, este tipo de estudios, si se quieren realizar de forma muy exhaustiva, tienen el problema adicional de que, debido a la complejidad de los ecosistemas y la interrelación de todas sus funciones, son muchos los criterios a estudiar. Ante esto, cabe resaltar que mantener la consistencia de los juicios, a la hora de completar matrices con un rango superior a cuatro, es muy complicado y, por lo tanto, no recomendable.

Alternativamente, DANP tiene la ventaja de ser más cómodo y fácil de utilizar, lo cual, por un lado, reduce la sensación de cansancio en los expertos y, por otro, permite la introducción de una mayor cantidad de criterios en cada clúster. En su contra, esta técnica no permite medir la consistencia de los juicios emitidos por los expertos por utilizar *ratings* en vez de matrices de comparación pareada. Por lo tanto, se puede señalar que ANP sería la técnica teóricamente más completa, pero cuando el número de criterios a priorizar es muy elevado, DANP surge como una alternativa interesante para tener en cuenta.

En este caso de estudio, el cual presenta una finalidad investigadora y divulgativa, el número de criterios seleccionados en cada clúster no es superior a cuatro, de forma que ambas técnicas, ANP y DANP, pueden ser utilizadas, cada una con sus ventajas e inconvenientes. Por ello, se ha optado por realizar el estudio utilizando ambas técnicas, si bien se han utilizado los mismos criterios y expertos, para así poder ver las diferencias en los resultados obtenidos

con un método y con otro. Asimismo, al finalizar el estudio, se han enseñado los valores obtenidos a cada experto para que, sin saber a qué método correspondía cada resultado, eligiera qué valores, en su opinión, reflejaban mejor su realidad. La metodología seguida en ambas técnicas se encuentra detallada, paso a paso, en el artículo publicado por Jorge-García *et al.* (2023).

## 2.5. Resultados obtenidos

Tras la aplicación de ambas técnicas multicriterio en red, se obtiene la ponderación o importancia relativa de cada servicio ecosistémico para cada experto en tanto por uno. Dichas ponderaciones se podrían transformar en valor monetario utilizando herramientas de valoración económica. En la [tabla 10.3](#) se muestran las ponderaciones obtenidas para cada experto y método, mostrándose los cinco servicios ecosistémicos que han obtenido una mayor prioridad.

Como se observa, tanto para el caso de ANP como DANP, el servicio «C11 - Biodiversidad y geodiversidad» es el más relevante en la zona de estudio para la mayoría de expertos, seguido de «C21 - Provisión de recursos alimentarios». Concretamente, cinco de once y seis de once decisores han clasificado el C11 en primera posición al utilizar ANP y DANP respectivamente. Además, al observar la agrupación de resultados, también se verifica esta tendencia. En cuanto al servicio «C21 - Provisión de recursos alimentarios», dos de los once decisores lo han clasificado en primera posición cuando se utiliza ANP y cuatro de los once con DANP. La impresión general, centrando la atención en los primeros puestos de la lista, corrobora que, a grandes rasgos, DANP sigue una tendencia similar a ANP, manteniendo una coherencia a la hora de ordenar los servicios ecosistémicos por orden de importancia. Esta coherencia entre ambos métodos aumenta, además, cuando se agregan los resultados. Sin embargo, cuando se analizan los valores numéricos, se observa que difieren de un método a otro. Concretamente, las diferencias entre criterios disminuyen cuando se utiliza DANP para todos los decisores.

Tabla 10.3. Resultados obtenidos en el caso de estudio realizado en el delta del Ebro

Resultados obtenidos utilizando ANP*											
DM1		DM2		DM3		DM4		DM5		DM6	
SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor
C32	0.2173	C32	0.1862	C11	0.3126	C12	0.2438	C11	0.2021	C11	0.2282
C11	0.1709	C33	0.1859	C21	0.2010	C11	0.1895	C44	0.1589	C12	0.1658
C12	0.1459	C31	0.1772	C12	0.1423	C13	0.1853	C43	0.1435	C21	0.1466
C31	0.1240	C21	0.1048	C13	0.1419	C21	0.1188	C34	0.1119	C13	0.1453
C21	0.1085	C11	0.0815	C31	0.0476	C32	0.1164	C33	0.0901	C32	0.0893
DM7		DM8		DM9		DM10		DM11		Grupo	
SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor
C21	0.23499	C11	0.20013	C32	0.14343	C21	0.23981	C11	0.15445	C11	0.198331
C11	0.148	C12	0.14526	C34	0.1381	C44	0.219996	C13	0.14576	C21	0.139772
C31	0.12147	C21	0.13351	C11	0.13215	C11	0.10015	C21	0.12358	C12	0.124232
C12	0.09392	C31	0.10408	C13	0.10887	C42	0.086538	C12	0.09334	C13	0.103788
C42	0.09218	C32	0.07478	C12	0.10542	C31	0.08536	C31	0.09014	C31	0.095359
Resultados obtenidos utilizando DANP*											
DM1		DM2		DM3		DM4		DM5		DM6	
SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor
C11	0.1376	C32	0.0994	C11	0.1077	C11	0.1171	C11	0.1285	C11	0.1168
C32	0.1335	C31	0.0985	C21	0.1011	C12	0.1125	C13	0.1050	C32	0.1087
C21	0.1209	C21	0.0942	C13	0.0956	C13	0.1081	C41	0.1011	C13	0.1063
C13	0.1128	C11	0.0939	C31	0.0899	C41	0.0931	C21	0.1005	C21	0.1045
C12	0.0912	C33	0.0885	C34	0.0893	C32	0.0909	C12	0.0995	C31	0.0970
DM7		DM8		DM9		DM10		DM11		Grupo	
SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor	SE	Valor
C21	0.1422	C21	0.1280	C11	0.1188	C21	0.1199	C21	0.1255	C11	0.1139
C11	0.1213	C11	0.0973	C12	0.1125	C34	0.1069	C13	0.1064	C21	0.1122
C42	0.1115	C32	0.0942	C21	0.1046	C13	0.1056	C12	0.0990	C13	0.1008
C31	0.1032	C41	0.0879	C13	0.0979	C32	0.1015	C11	0.0954	C12	0.0977
C12	0.1026	C33	0.0867	C32	0.0965	C11	0.1010	C31	0.0924	C32	0.0947

(\*) Se muestran solo los cinco servicios ecosistémicos con una mayor prioridad obtenida para cada experto. Los valores se muestran en tanto por uno.

Por último, queremos señalar que la mayoría de los expertos, tras analizar los resultados obtenidos sin saber a qué método corresponde cada uno, en su mayoría representan mejor sus prioridades obtenidas con DANP. Este hecho indica que esta técnica híbrida es una alternativa posible en aquellos casos en los que resulta muy complicado utilizar ANP por las desventajas ya mencionadas anteriormente. Además, esta cuestión también provoca una reflexión teórica relevante, ya que, en principio, el uso de comparaciones pareadas parece que reflejaría mejor las prioridades de las influencias ejercidas por un grupo de elementos sobre otro que las calculadas directamente como se realiza con DANP. A nivel de ejemplo, si un experto aprecia que tres elementos de un grupo influyen sobre otro, preguntarle cuál de ellos influye más y cuanto en relación con los otros tres, como se hace con las matrices de comparación pareada, parece que sería mejor que preguntarle directamente por esa influencia elemento a elemento, como se realiza con DANP. Es decir, la pregunta directa hace perder la perspectiva de la influencia relativa que pueden ejercer otros elementos. Sin embargo, esta reflexión teórica contrasta con los resultados empíricos obtenidos.

## AGRADECIMIENTOS.

Queremos realizar un especial agradecimiento a todos los decisores que han participado en la cumplimentación de los cuestionarios, gracias a los cuales se han podido desarrollar satisfactoriamente los diferentes casos de estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, W. M. (2014): «The value of valuing nature», *Science*, 346(6209), 549-551.
- Aznar-Bellver, J. y Estruch-Guitart, A. V. (2020). «Valoración de activos ambientales. Teoría y casos», *Colección Académica*.
- Büyükköçkan, G. y Gülerüç, S. (2016): «An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey», *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448.
- Fisher, B., Turner, R. K. y Morling, P. (2009): «Defining and classifying ecosystem services for decision making», *Ecological Economics*, 68(3), 643-653.
- Ghosh, S., Chatterjee, N. D. y Dinda, S. (2021): «Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov

- models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India», *Sustainable Cities and Society*, 68, 102773.
- Greco, S., Figueira, J. y Ehrgott, M. (2016): *Multiple criteria decision analysis* (Vol. 37). Nueva York: Springer.
- Hamann, M., Biggs, R. y Reyers, B. (2016): «An exploration of human well-being bundles as identifiers of ecosystem service use patterns» *PLoS One*, 11(10), e0163476.
- Ishizaka, A. y Mu, E. (2023): «What is so special about the analytic hierarchy and network process?», *Annals of Operations Research*, 326(2), 625-634.
- Jiang, W. (2017): «Ecosystem services research in China: A critical review», *Ecosystem Services*, 26, 10-16.
- Jorge-García, D. y Estruch-Guitart, V. (2020): «Economic valuation of ecosystem services by using the analytic hierarchy process and the analytic network process. Comparative analysis between both methods in the Albufera Natural Park of València (Spain)», *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 15(1), 1-4.
- Jorge-García, D. y Estruch-Guitart, V. (2022): «Comparative analysis between AHP and ANP in prioritization of ecosystem services - A case study in a rice field area raised in the Guadalquivir marshes (Spain)», *Ecological Informatics*, 70, 101739.
- Jorge-García, D., Estruch-Guitart, V. y Aragonés-Beltrán, P. (2023): «How geographical factors and decision-makers' perceptions influence the prioritization of ecosystem services: Analysis in the Spanish rice field areas in RAMSAR Mediterranean wetlands», *Science of the Total Environment*, 869, 161823.
- Kadoić, N., Divjak, B. y Begičević Ređep, N. (2019): «Integrating the DEMATEL with the analytic network process for effective decision-making», *Central European Journal of Operations Research*, 27(3), 653-678.
- Liang, J., Li, S., Li, X., Li, X., Liu, Q., Meng, Qiang, L., Qianfang, M., Anqi, L. y Li, J. (2021): «Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China», *Journal of Cleaner Production*, 279, 123851.
- Liu, Q., Qiao, J., Li, M. y Huang, M. (2024): «Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin», *Science of the Total Environment*, 908, 168486.
- Martín-López, B., Gómez-Baggethun, E., González, J. A., Lomas, P. L. y Montes, C. (2009): «The assessment of ecosystem services provided by biodiversity: re-thinking concepts and research needs» en J.B. Aronoff (ed.), *Handbook of nature conservation: global, environmental, and economic issues*, 261-282.
- Martín-López, B. y Montes, C. (2010): «Funciones y servicios de los ecosistemas: una herramienta para la gestión de los espacios naturales», *Guía científica de Urdaibai*, 1, 13-32.

- McDonough, K., Hutchinson, S., Moore, T. y Hutchinson, J. S. (2017): «Analysis of publication trends in ecosystem services research», *Ecosystem Services*, 25, 82-88.
- MEA (2005): *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5, 563). Washington, DC: Island press.
- Montes, C. (2007): «Del desarrollo sostenible a los servicios de los ecosistemas», *Ecosistemas*, 16(3), 1-3.
- Mu, E., Cooper, O. y Peasley, M. (2020): «Best practices in analytic network process studies», *Expert Systems with Applications*, 159, 113536.
- Perez-Verdin, G., Sanjurjo-Rivera, E., Galicia, L., Hernandez-Diaz, J. C., Hernandez-Trejo, V. y Marquez-Linares, M. A. (2016): «Economic valuation of ecosystem services in Mexico: Current status and trends», *Ecosystem Services*, 21, 6-19.
- Polasky, S., Tallis, H. y Reyers, B. (2015): «Setting the bar: Standards for ecosystem services», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7356-7361.
- Quintas-Soriano, C., García-Llorente, M. y Castro, A. J. (2018): «What has ecosystem service science achieved in Spanish drylands? Evidences of need for transdisciplinary science», *Journal of Arid Environments*, 159, 4-10.
- Rodríguez-Santalla, I. y Navarro, N. (2021): «Main threats in mediterranean coastal wetlands. The Ebro delta case», *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (11), 1190.
- Saaty, T. L. (1986): Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management Science*, 32 (7), 841-855.
- Saaty, T. L. (2008): «Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process», *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 102, 251-318.
- Schulze-González, E., Pastor-Ferrando, J. P. y Aragonés-Beltrán, P. (2021): «Testing a recent DEMATEL-based proposal to simplify the use of ANP» *Mathematics*, 9(14), 1605.
- Turner, R. K., Morse-Jones, S., y Fisher, B. (2010): «Ecosystem valuation: a sequential decision support system and quality assessment issues», *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1), 79-101.
- Vílchez-Román, C., Florek-Paszowska, A. y Mu, E. (2024): «Charting the evolutionary conceptual pathway of analytic network process research: A main path analysis», *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 31(3-4), e1837.
- Wang, J., Zhai, T., Lin, Y., Kong, X. y He, T. (2019): «Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China», *Science of the Total Environment*, 657, 781-791.
- Zhou, J., Wu, J. y Gong, Y. (2020): «Valuing wetland ecosystem services based on benefit transfer: A meta-analysis of China wetland studies», *Journal of Cleaner Production*, 276, 122988.



# Modelos multicriterio para inversores socialmente responsables

AMELIA BILBAO TEROL  
*Universidad de Oviedo*

MAR ARENAS PARRA  
*Universidad de Oviedo*

VERÓNICA CAÑAL FERNÁNDEZ  
*Universidad de Oviedo*

RAQUEL QUIROGA GARCÍA  
*Universidad de Oviedo*

NIEVES REMO DÍEZ  
*Universidad de León*

## INTRODUCCIÓN

El concepto de responsabilidad social corporativa (RSC) puede definirse como el compromiso de las empresas de contribuir al desarrollo económico sostenible, mejorando al mismo tiempo la calidad de vida de la fuerza laboral, así como de la comunidad local y la sociedad en general. La inversión socialmente responsable (ISR) es una disciplina de inversión que integra consideraciones ambientales, sociales y de gobernanza corporativa (ESG, por sus siglas en

inglés) para generar retornos financieros competitivos a largo plazo e impacto social positivo.

El objetivo de este capítulo es mostrar como los modelos multicriterio pueden constituir una herramienta para la toma de decisiones en inversiones que combinan criterios financieros clásicos (rentabilidad esperada y riesgo asumido) con criterios de buen desempeño en responsabilidad social asociados a los tres pilares: medioambiental, social y de gobernanza. Invertir apoyando buenas prácticas sostenibles y rechazando los comportamientos dañinos para la sociedad y la naturaleza ya es una tendencia global que están adoptando tanto los inversores institucionales como los particulares. Sin embargo, hay una destacable ausencia de modelos financieros que se adapten a este tipo de inversores más allá de la simple exclusión de activos de organizaciones con comportamientos considerados irresponsables. Por ello, nuestra contribución se centra en presentar un modelo multicriterio que puede adaptarse a las necesidades de un inversor socialmente responsable.

La medición del grado de sostenibilidad de las inversiones individuales es complicada, dado que no se dispone de una función de bienestar que incluya todos los aspectos medioambientales, sociales y de gobernanza (Hallerbach et al., 2004). Por otro lado, el UK Social Investment Forum (UKSIF, <http://www.uksif.org/>) indica que, aunque la mayoría de las personas están de acuerdo con cuáles son los problemas éticos, cada individuo debe decidir si una inversión específica cumple con sus criterios: «diferentes personas tienen diferentes puntos de vista sobre lo que es aceptable y cuán importante es un tema determinado para ellos». Sin embargo, el UKSIF identifica qué caracteriza a una buena ISR: «Lo que tienen en común es que expresan claramente sus puntos de vista sobre cuestiones sociales. La clave es proporcionar y utilizar información sobre las inversiones de tal manera que quienes invierten puedan decidir si dichas inversiones son adecuadas para sus clientes y sus fondos de pensiones».

Proponemos construir una cartera con criterios ESG lo más similar posible a la cartera de referencia convencional, es decir, a aquella que el inversor elegiría si solo considerase objetivos financieros. Para ello, presentamos una metodología multicriterio que usa lógica difusa para modelar la imprecisión inherente en la elección de algunos elementos de decisión del modelo. Nuestra propuesta se desarrolla en dos etapas. En la primera, se obtiene una cartera convencional aplicando *Prospect Theory* (PT) (Kahneman y Tversky, 1979) y considerando medidas de riesgo inferior. PT propone un marco de la toma de decisiones bajo incertidumbre, considerando los sesgos cognitivos y

la percepción de las pérdidas más intensamente que las ganancias observadas en los procesos de decisión. Este modelo se adapta bien al contexto financiero, ya que refleja las desviaciones de la teoría clásica de la utilidad en las decisiones de inversión. Un elemento clave de la propuesta de Kahneman y Tversky es una función de valor en forma de S que es cóncava (aversión al riesgo) en el dominio de las ganancias y convexa (búsqueda de riesgo) en el dominio de las pérdidas, ambas medidas en relación con un punto de referencia. En este trabajo se han utilizado etiquetas lingüísticas para modelizar los parámetros de la función de valor. Estas etiquetas lingüísticas determinan de forma «suave» la aversión al riesgo y a las pérdidas.

En la segunda etapa, nos enfrentamos a un problema multiobjetivo que se resuelve utilizando una extensión de la programación por metas, *Extended Goal Programming* (Romero, 2001), considerando las características financieras de la cartera de referencia como niveles de aspiración de los objetivos financieros.

El capítulo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2, se presenta una introducción a la inversión socialmente responsable. La sección 3 muestra un modelo de selección de cartera sostenible basado en programación por metas (GP) y tecnología difusa. La sección 4 presenta una aplicación empírica a un mercado de empresas de energía renovable. El capítulo termina con las principales conclusiones.

## 1. INVERSIÓN SOCIALMENTE RESPONSABLE (ISR)

El desarrollo sostenible entendido como «el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas» (Informe Brundtland, 1987), se ha convertido en un principio fundamental para abordar los desafíos globales actuales, especialmente el cambio climático. Este reto exige una movilización significativa de recursos y en este contexto el sistema financiero juega un papel importante con la asignación de capital a proyectos que promueven un modelo económico más sostenible.

La introducción de la sostenibilidad en el sistema financiero ha impulsado el desarrollo de la Inversión Socialmente Responsable (ISR), que se ha consolidado como una de las tendencias de inversión más significativas de las últimas décadas (Arenas-Parra y Cañal-Fernandez, 2022). Una definición ampliamente aceptada es la que describe la ISR como una filosofía de inversión que integra factores

extrafinancieros: ambientales, sociales y de gobernanza con las clásicas consideraciones financieras de rentabilidad y riesgo (United Nations Principles for Responsible Investment, UNPRI, 2022).

Los antecedentes de la ISR se remontan a principios del siglo XX en Estados Unidos y aparece vinculada a comunidades religiosas como los anabaptistas y los cuáqueros, que evitaban invertir en sectores como el alcohol y el tabaco por razones éticas. En 1928, el Pioneer Fund de Boston marcó un hito al implementar criterios negativos o de exclusión en sus decisiones de inversión, rechazando sectores como el juego, la pornografía y otras actividades consideradas inmorales. Durante las décadas siguientes, especialmente hasta los años 60, la ISR permaneció centrada en criterios éticos. Sin embargo, los eventos sociales y políticos, como la guerra de Vietnam, la carrera armamentística y el creciente daño ambiental, impulsaron un cambio en la actitud de los inversores. En este contexto, surgen fondos como el Pax World Fund (1971) y el Dreyfus Third Century Fund (1972), promovidos por los metodistas. En los años 80, la ISR comenzó a ganar reconocimiento a nivel global debido a movimientos como las protestas contra el Apartheid en Sudáfrica (Marlin, 1986). En esta década la Asamblea Nacional de las Naciones Unidas publica el Informe Brundtland (1987), que define el desarrollo sostenible como el equilibrio entre desarrollo económico, social y ambiental, lo que dotó de mayor legitimidad al enfoque de la ISR (Cañal-Fernández y Gómez-Martín, 2020).

En Europa, comenzaron a surgir fondos éticos, como el Ansvar Aktiefond Sverige en Suecia (1965) y el Stewardship Fund en el Reino Unido (1984), marcando el inicio de un enfoque más estructurado hacia las inversiones sostenibles. Los desastres ambientales, como Bhopal (1984), Chernobyl (1986) y Exxon Valdez (1989), junto con el creciente conocimiento sobre el calentamiento global, aumentaron la preocupación por los problemas ambientales y llevaron a la creación de fondos «verdes» como el Jupiter Merlin Ecology Fund (1988). En España, el primer fondo ético, Iberfondo 2000, surgió en 1994, seguido por otros como Iberfondo 2020 Internacional y Ahorro Arco Iris en 1997, aunque la regulación específica para estos productos no se introdujo en nuestro país hasta 1999 (Cañal-Fernández *et al.*, 2009).

En el siglo XXI, la ISR ha evolucionado para responder a desafíos globales como el cambio climático, la pandemia del COVID-19 y los conflictos políticos como el de Ucrania y Rusia o Gaza e Israel. Estos eventos han reforzado la relevancia de las inversiones sostenibles, con un enfoque dominante en cuestiones ambientales, pero también en temas sociales como la seguridad laboral, la salud y la

educación. Por ejemplo, en 2020, la Unión Europea lanzó el programa Next Generation EU, con un presupuesto de 750 000 millones de euros para abordar las consecuencias económicas y sociales de la pandemia, subrayando la importancia de integrar la sostenibilidad en las políticas económicas.

Por lo tanto, la ISR ha evolucionado desde su enfoque inicial basado en la exclusión de sectores o actividades inmorales hacia estrategias más diversificadas y complejas basadas en el «impacto del inversor» (Busch *et al.*, 2022) y el «nivel de ambición» de la inversión. El «nivel de ambición» se define como la medida en que la inversión busca contribuir activamente a la transición hacia una economía más sostenible, incluyendo el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) u otros estándares y marcos de sostenibilidad, como la taxonomía de la Unión Europea. Este concepto abarca diversos niveles de análisis, desde la economía en su conjunto hasta sectores específicos, carteras financieras o empresas, etc. (Platform on Sustainable Finance, 2022). Este modelo de inversión no es solo una herramienta para mitigar riesgos y mejorar la resiliencia económica, sino que también es una estrategia efectiva para promover un desarrollo global equilibrado y sostenible.

## 2. LAS AGENCIAS DE CALIFICACIÓN ESG

En esta transición de los inversores y empresas hacia la sostenibilidad juegan un papel crucial las agencias de calificación ESG al proporcionar información detallada, objetiva y comparable sobre el desempeño de empresas y organizaciones en aspectos relacionados con la sostenibilidad. Analizan cómo las empresas gestionan los riesgos y oportunidades relacionados con aspectos ambientales (el impacto ambiental, gestión de emisiones de carbono, uso de recursos naturales, políticas de sostenibilidad y adaptación al cambio climático), sociales (condiciones laborales, respeto a los derechos humanos, impacto en las comunidades y diversidad e inclusión) y de gobernanza (estructura del consejo directivo, ética corporativa, transparencia, relaciones con accionistas y gestión de riesgos).

Las calificaciones ESG son utilizadas por inversores, gestores de activos y otras partes interesadas para tomar decisiones más informadas y responsables. Permiten identificar oportunidades y riesgos, ya que ayudan a detectar empresas con prácticas sostenibles sólidas que pueden ofrecer estabilidad y rentabilidad a largo plazo y a evitar

aquellas con riesgos reputacionales o regulatorios. Además, facilitan la inclusión de activos sostenibles en las carteras de inversión.

Sin embargo, aunque las agencias de calificación ESG juegan un importante papel a la hora de promover la sostenibilidad en los mercados financieros, se enfrentan a importantes desafíos que afectan su utilidad y credibilidad (Billio *et al.*, 2021). En este sentido caben citar:

- La *falta de estandarización* entre las diferentes agencias que dificulta la comparación entre las calificaciones. Cada agencia utiliza criterios y metodologías diferentes para evaluar las prácticas ESG, lo que puede llevar a calificaciones dispares para una misma empresa.
- La *falta de transparencia* que afecta tanto a la metodología como a la confidencialidad de los datos. Muchas agencias no explican claramente cómo llegan a sus calificaciones, qué datos consideran y cómo ponderan los factores ESG. Además, basan sus evaluaciones en datos no públicos, lo que dificulta la verificación independiente de sus conclusiones.
- La *calidad y disponibilidad de los datos* ya que las empresas no siempre divulgan información ESG suficiente o precisa, lo que puede incluir sesgos o «*greenwashing*».

Entre las principales agencias de rating podemos citar: MSCI ESG STATS (anteriormente reconocida como KLD Research and Analytics, Inc.), Sustainalytics, Vigeo Eiris (adquirida por Moody's), Refinitiv-LSEG Data & Analytics, Bloomberg y Morningstar, entre otras.

Para cada industria MSCI ESG STATS se seleccionan entre 2 y 7 cuestiones ESG relevantes de un total de 33 posibles, basándose en la exposición de las empresas a riesgos y oportunidades ESG que son financieramente significativos y en su capacidad para gestionarlos. Para determinar una calificación ESG final, las empresas se califican en una escala que va de «AAA» a «CCC». Esta calificación tiene en cuenta su nivel de exposición a los riesgos ESG específicos del sector y su eficacia en la gestión de dichos riesgos. Cada cuestión clave recibe una puntuación de 0 a 10, donde 0 indica una gestión deficiente y 10 una gestión excelente. Se calcula una media ponderada de las puntuaciones de las cuestiones clave, reflejando la importancia relativa de cada una según su impacto potencial en la empresa. Esta puntuación media ponderada se ajusta en relación con los pares de la misma industria, lo que permite una comparación precisa entre empresas del mismo sector. Por último, la puntuación ajustada por industria se traduce en una calificación ESG por letras que va desde líder del sector (AAA) a rezagada (CCC), indicando la resiliencia de la empresa frente a riesgos ESG a largo plazo en comparación con sus pares.

Vigeo Eiris utiliza términos lingüísticos para evaluar el rendimiento relativo ESG de las empresas. Para ello, inicialmente, Vigeo Eiris evalúa seis dimensiones relacionadas con criterios ESG mediante una puntuación que va de 0 a 100. A continuación, calcula una puntuación global utilizando una media geométrica y ponderaciones iguales. Por último, Vigeo Eiris ofrece una calificación complementaria de las empresas basada en la comparación con el sector. Esta calificación está formada por las siguientes categorías: líderes, avanzadas, medias, por debajo de la media o despreocupadas, y la elaboran directamente expertos de la agencia teniendo en cuenta su conocimiento sobre las empresas, los sectores y las puntuaciones obtenidas (que van de 0 a 100) para cada empresa teniendo en cuenta las dimensiones ESG (Liern y Pérez-Gladish 2018; Bilbao-Terol *et al.*, 2019, entre otros).

El *Rating de Sostenibilidad de Morningstar*, creado en 2016 y mejorado en 2019, es una medida de lo bien que las empresas incluidas en un fondo están manejando sus riesgos y oportunidades ESG en comparación con fondos similares. Para su construcción se utilizan datos de *Sustainalytics* (Morningstar, 2021). Teniendo en cuenta este *rating*, los fondos se dividen en cinco grupos en función de su nivel de sostenibilidad, de mayor a menor riesgo ESG. Los fondos que se encuentra en el primer decil reciben 1 globo, del percentil 11 al 32.5 se les califica con 2 globos, del 32.5 al 57.5 reciben 3 globos, del 57.5 al 90 reciben 4 globos y del 90 al 100 reciben la puntuación máxima de 5 globos.

La puntuación ESG de Refinitiv-LSEG Data & Analytics mide el rendimiento, el compromiso y la eficacia de una empresa a través de diferentes dimensiones: innovación medioambiental de productos, derechos humanos, gestión, etc. Esta base de datos cuenta con más de 150 analistas de investigación de contenidos formados para recopilar más de 400 medidas ESG en todo el mundo. Toda la información recopilada se divide en tres pilares: medioambiental, social y gobernanza, que, a su vez, incluyen diferentes categorías y componentes (ver [tabla 11.1](#)). Las empresas reciben puntos en una escala de 0 a 100, siendo todas las categorías del tipo «cuanto más, mejor». Esta puntuación final muestra la eficacia de la empresa en el desempeño ESG, teniendo en cuenta información procedente de fuentes públicas y de las propias empresas (informes anuales, sitios web de las empresas, sitios web de ONG, declaraciones en bolsa, informes de RSC y fuentes de noticias).

Para calcular los pesos de cada categoría de cada pilar, Refinitiv ha desarrollado una matriz de materialidad ESG para evaluar la importancia de cada preocupación ESG para las diferentes industrias

de forma objetiva e imparcial. Sin embargo, Refinitiv no proporciona información sobre su construcción. Esta matriz se aplica a nivel de categoría y los valores de magnitud se ajustan dinámicamente a medida que progresa la divulgación de información ESG por parte de las empresas. Es decir, las ponderaciones de las categorías se obtienen empleando un enfoque objetivo basado en la importancia relativa de cada tema dentro de cada sector industrial específico.

Tabla 11.1. Descripción de los pilares y categorías ESG de Refinitiv-LSEG Data & Analytics

Pilar ESG	Descripción	Categorías
Medio-ambiental	Mide el impacto de una empresa en los sistemas naturales, incluidos el aire, la tierra y el agua, así como ecosistemas completos. Este pilar muestra hasta qué punto una empresa utiliza las mejores prácticas de gestión para evitar riesgos medioambientales y aprovechar las oportunidades medioambientales para generar valor a largo plazo para los accionistas.	<p>C1- Uso de recursos (38 componentes): Refleja el rendimiento y la capacidad de una empresa para reducir el uso de materiales, energía o agua y para encontrar soluciones más ecoeficientes mejorando la gestión de la cadena de suministro.</p> <p>C2- Emisiones (60 componentes): Mide el compromiso y la eficacia de una empresa para reducir las emisiones medioambientales en los procesos de producción y operativos.</p> <p>C3- Innovación (35 componentes): Refleja la capacidad de una empresa para reducir los costes y cargas medioambientales para sus clientes, creando así nuevas oportunidades de mercado a través de nuevas tecnologías y procesos medioambientales o productos ecodiseñados.</p>
Social	Mide la capacidad de una empresa para generar confianza y lealtad con su plantilla, sus clientes y la sociedad, mediante el uso de las mejores prácticas de gestión. Este pilar refleja la reputación de la empresa y la salud de su licencia para operar, que son factores clave para determinar su capacidad de generar valor a largo plazo para los accionistas.	<p>C4- Mano de obra (75 componentes): Mide la eficacia de una empresa en lo que respecta a la satisfacción laboral, un lugar de trabajo sano y seguro, el mantenimiento de la diversidad y la igualdad de oportunidades, y las oportunidades de desarrollo para su plantilla.</p> <p>C5- Derechos Humanos (9 componentes) Mide la eficacia de una empresa en el respeto de los convenios fundamentales de derechos humanos.</p> <p>C6- Comunidad (23 componentes): Mide el compromiso de la empresa para ser un buen ciudadano, proteger la salud pública y respetar la ética empresarial.</p> <p>C7- Responsabilidad del Producto (41 componentes): Refleja la capacidad de una empresa para producir bienes y servicios de calidad integrando la salud y la seguridad del cliente, la integridad y la privacidad de los datos.</p>

Pilar ESG	Descripción	Categorías
Gobernanza	Mide los sistemas y procesos de una empresa, que garantizan que los miembros de su consejo de administración y sus ejecutivos actúan en interés de sus accionistas a largo plazo. Este pilar muestra la capacidad de una empresa para dirigir y controlar sus derechos y responsabilidades mediante la creación de incentivos, así como controles y equilibrios para generar valor a largo plazo para los accionistas.	C8-Gestión (70 componentes): Mide el compromiso y la eficacia de una empresa a la hora de seguir los principios de las mejores prácticas de gobierno corporativo. C9-Accionistas (39 componentes): Mide la eficacia de una empresa en lo que respecta a la igualdad de trato de los accionistas. C10-Estrategía CSR (29 componentes): Refleja las prácticas de una empresa para comunicar que integra las dimensiones económica (financiera), social y medioambiental en sus procesos cotidianos de toma de decisiones.

Fuente: elaboración propia a partir de Refinitiv

Las ponderaciones ESG de cada pilar se calculan como la suma relativa de las ponderaciones de las categorías. A continuación, la puntuación ESG final de cada empresa se calcula teniendo en cuenta las ponderaciones de cada pilar en su sector. Las ponderaciones de los pilares social y medioambiental difieren para cada industria o sector, mientras que las ponderaciones de la gobernanza son las mismas para todos los sectores. No obstante, Refinitiv mantiene la misma ponderación en todas las industrias clasificadas bajo el mismo The Refinitiv Business Classifications (TRBC®). TRBC es un sistema de clasificación de sectores propiedad de Refinitiv y gestionado por esta. Este sistema organiza y agrupa empresas que ofrecen productos y servicios en mercados similares.

Refinitiv evalúa el desempeño ESG relativo de las empresas utilizando una escala de calificación basada en unas calificaciones en letras que van de la D a la A. Estas calificaciones pueden cambiar añadiendo un signo más (+) o menos (-) para mostrar las posiciones relativas dentro de las principales categorías de calificación. Las calificaciones están asociadas a una descripción lingüística que muestra su rendimiento relativo en materia de ESG: deficiente (D), satisfactorio (C), bueno (B) y excelente (A). Estas descripciones lingüísticas

están asociadas a cuartiles (González-Pozo *et al.*, 2024). En este trabajo consideramos las puntuaciones ESG obtenidas de Refinitiv-LSEG Data & Analytics para una muestra de empresas del sector de energía renovable (Bilbao-Terol *et al.*, 2024). Estas puntuaciones se incluyen en un modelo de selección de carteras ESG que presentamos en la siguiente sección.

### 3. MODELO DE SELECCIÓN DE CARTERAS CON CRITERIOS ESG

Las técnicas de decisión multicriterio (MCDM) han ayudado a los inversores a tomar decisiones de acuerdo a sus intereses financieros y a su sensibilidad hacia aspectos ESG. En los últimos años podemos encontrar numerosos trabajos en los que se han desarrollado nuevos enfoques multicriterio para incorporar criterios de sostenibilidad a los clásicos criterios financieros de rentabilidad y riesgo (Billah *et al.*, 2024), lo que ha permitido construir carteras de inversión socialmente responsables.

Entre estos modelos nos encontramos con los que incorporan las preocupaciones ESG, restringiendo el conjunto factible a activos que poseen una etiqueta de sostenibilidad otorgada por alguna de las agencias de rating citadas (ver, por ejemplo, Herzel *et al.*, 2012, Ballester *et al.*, 2012). En estos problemas se aplica la teoría moderna de carteras (Markowitz, 1952) con los criterios clásicos de rentabilidad y riesgo sobre este nuevo conjunto factible de activos sostenibles.

Otros autores han considerado modelos de selección de carteras en los que las preocupaciones ESG se transforman en objetivos que se incorporan a los clásicos de rentabilidad y riesgo. En este caso la frontera eficiente se convierte en una superficie  $n$ -dimensional, dependiendo del número de objetivos ESG y financieros que se consideren (Bilbao-Terol *et al.*, 2012a, Bilbao-Terol *et al.*, 2012b, Bilbao-Terol *et al.*, 2018, Gasser *et al.*, 2017, Xidonas y Essner, 2024, Garcia-Bernabeu *et al.*, 2024, entre otros). El modelo de selección de carteras ESG que presentamos en este capítulo se encuadra en este enfoque.

Proponemos un modelo multicriterio difuso que se desarrolla en dos niveles de decisión (Bilbao-Terol *et al.*, 2018): en la primera etapa se obtiene la cartera de referencia que considera únicamente objetivos financieros. En la segunda etapa se utilizará la cartera de referencia como meta para construir una cartera ESG.

## Etapa 1. Obtención de la cartera eficiente de referencia aplicando Prospect Theory con etiquetas lingüísticas

Para la construcción de la cartera financiera preferida, es decir, la cartera de referencia, se ha utilizado la Prospect Theory de Kahneman y Tversky (1979). La variable aleatoria de rentabilidad de la inversión se representa mediante dos medidas: la rentabilidad esperada ( $RE$ ) y el valor en riesgo condicional ( $CVaR$ ) en un cierto nivel de confianza. Por tanto, el inversor financiero se enfrenta a dos objetivos, la maximización de la rentabilidad esperada y la minimización del  $CVaR$ , una medida de riesgo basada en los percentiles superiores de la distribución de las pérdidas de la inversión y que, por tanto, modela las pérdidas en los peores escenarios. La minimización de  $CVaR$  se realiza siguiendo el modelo lineal propuesto por Rockafellar y Uryasev (2000). Procedemos en dos pasos para encontrar la cartera óptima bajo los criterios  $RE$  y  $CVaR$ .

En primer lugar, generamos una aproximación de la frontera financiera eficiente  $CVaR-RE$  aplicando el método de la  $\varepsilon$ -restricción propuesto por Haimes *et al.* (1971), es decir, encontramos la máxima  $RE$  para cada nivel de riesgo medido por el  $CVaR$ . La [figura 11.1](#), en la que se representan esos pares rentabilidad esperada-riesgo eficientes, pone de manifiesto la conflictividad entre los dos objetivos.

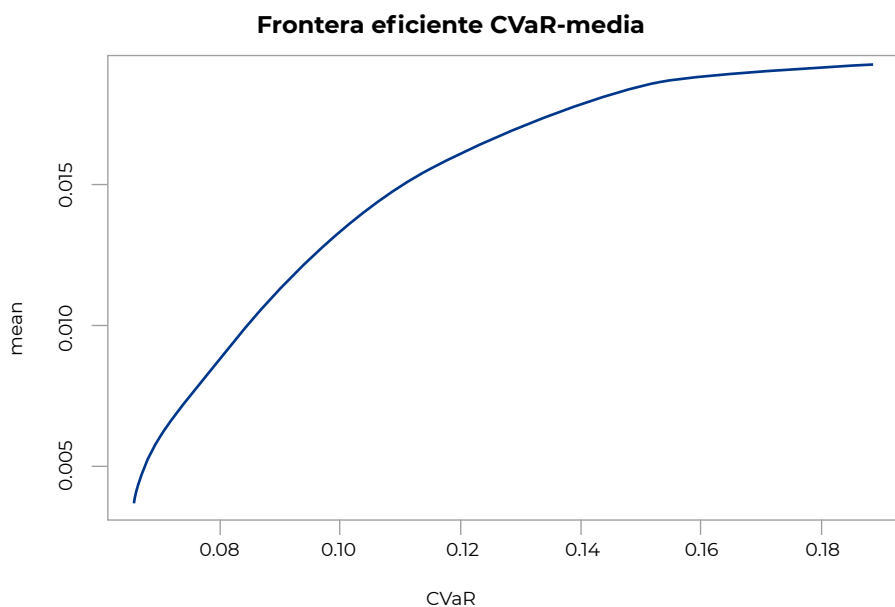


Figura 11.1. Frontera financiera eficiente

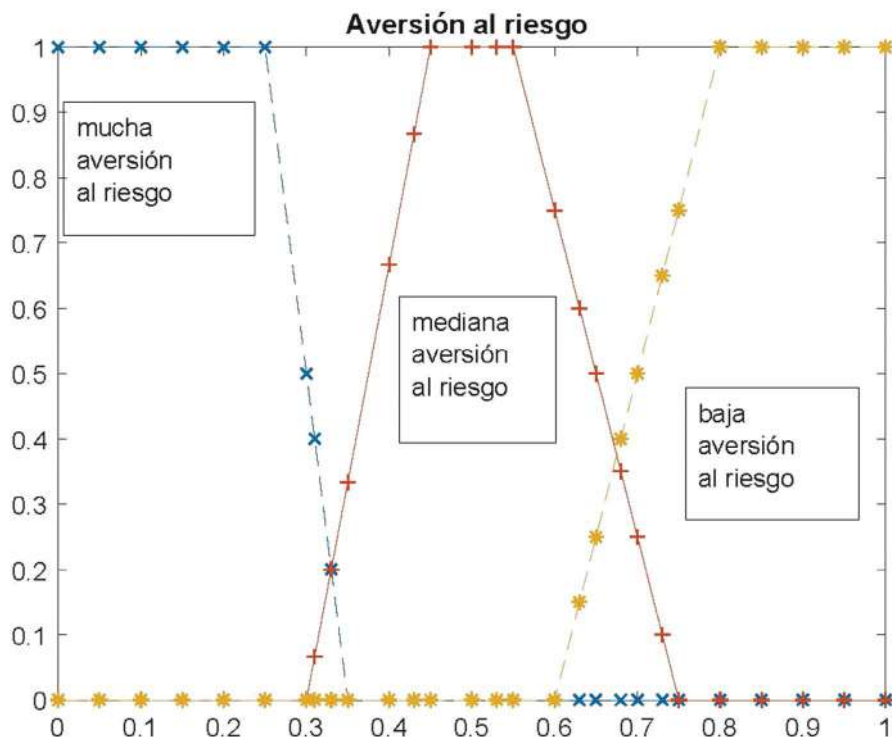


Figura 11.2. Etiquetas lingüísticas para modelizar el parámetro  $\alpha$

En el segundo paso se debe elegir la cartera más preferida sobre la frontera eficiente (figura 11.1) y el criterio de elección será el máximo equivalente cierto. El máximo equivalente cierto es una medida utilizada en la teoría de decisión para cuantificar la cantidad garantizada que un individuo estaría dispuesto a aceptar con certeza en lugar de asumir un riesgo asociado a una inversión. Refleja la percepción subjetiva de riesgo y la aversión al riesgo del individuo: cuanto mayor sea esta aversión, menor será el equivalente cierto comparado con el valor esperado de la opción más arriesgada. Por tanto, será necesario elegir una función de utilidad para valorar los resultados de la inversión, es decir, la rentabilidad de cada cartera eficiente en cada escenario determinado por las rentabilidades históricas. Puesto que nos movemos dentro de la Prospect Theory, se ha utilizado una función de valor que modela el comportamiento asimétrico de los inversores respecto de pérdidas (rentabilidad negativa) y ganancias (rentabilidad positiva), las pérdidas se compensan con ganancias de mayor cuantía. La desutilidad de una pérdida de 100 u.m.

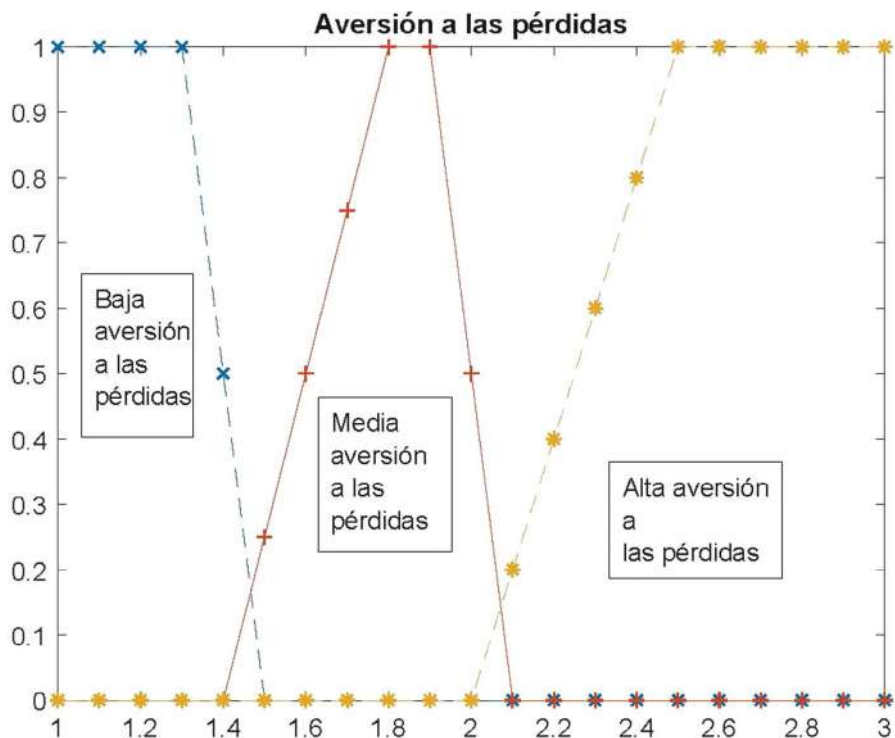


Figura 11.3. Etiquetas lingüísticas para modelizar el parámetro  $\lambda$

puede ser casi el triple de la satisfacción que produce una ganancia de 100 u.m. La función de valor definida como una función potencial a trozos es cóncava en ganancias y convexa en pérdidas. Hay dos parámetros que ajustan el perfil del inversor:  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ) que mide la aversión al riesgo y  $\lambda$  ( $\lambda \geq 1$ ) que recoge la aversión a las pérdidas, es decir, el factor de ponderación de las pérdidas. Dado que determinar estos valores no es una tarea fácil, en nuestro modelo hemos utilizado etiquetas lingüísticas como «mucho/mediana/baja aversión» al riesgo (ver figura 11.2) y «baja/media/alta aversión» a las pérdidas (ver figura 11.3), representadas por números difusos para modelar el perfil del inversor respecto a estas dos características.

Una vez que el inversor elige sus etiquetas, discretizamos sus soportes, es decir, consideramos un número finito de valores para cada par  $(\alpha, \lambda)$  donde se mueven las etiquetas. Por tanto, disponemos de un número finito de funciones de valor asociadas a las preferencias soft del inversor para valorar las carteras eficientes y encontrar las de máximo equivalente cierto. Entre estas carteras se detecta la cartera

### Frontera eficiente CVaR-media y Cartera Financiera Más Preferida

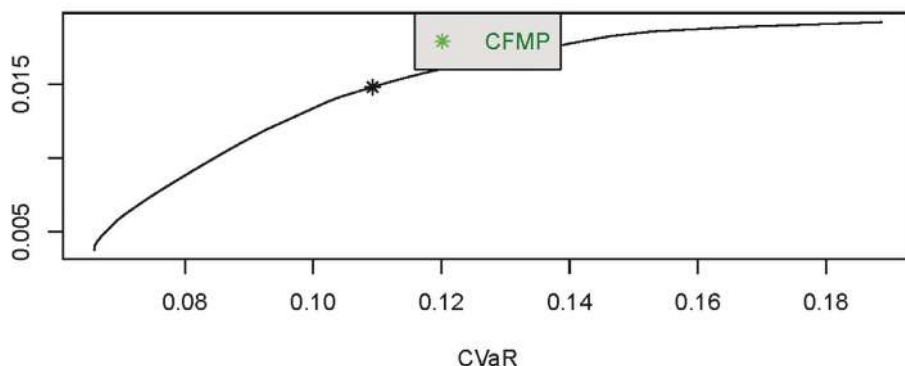


Figura 11.4. Frontera  $CVaR$ - $RE$  eficiente y cartera financiera más preferida

financiera más preferida (CFMP). Para ello se calcula un par ( $CVaR$ ,  $RE$ ) resultado de la ponderación de los  $CVaR$ s y  $RE$ s de las carteras de máximo equivalente cierto correspondientes a la discretización fijada. Para calcular los pesos de la ponderación se tienen en cuenta las áreas y grados de pertenencia de los parámetros  $\alpha$  y  $\lambda$  a las etiquetas lingüísticas elegidas por el inversor. Finalmente, se calcula la cartera más cercana en el conjunto de las carteras con máximo equivalente cierto a este par media ponderada rentabilidad-riesgo. Denotaremos por  $CVaR^*$  y  $RE^*$ , al  $CVaR$  y la  $RE$  de la cartera más preferida con criterios financieros, respectivamente (ver figura 11.4).

### Etapa 2. Modelo de programación por metas extendido (EGP) para la selección de la cartera ESG

Para utilizar la programación por metas es necesario que el inversor establezca niveles de aspiración para cada objetivo (Ignizio, 1983; Tamiz *et al.*, 1998). En nuestro modelo los niveles de aspiración de los objetivos financieros  $CVaR$  y  $RE$  son los valores correspondientes a la cartera de referencia (CFMP) obtenida en la etapa 1: ( $CVaR^*$  y  $RE^*$ ). Para los objetivos  $E$ ,  $S$  y  $G$  el inversor determinará sus niveles de aspiración:  $E^*$ ,  $S^*$  y  $G^*$ . En este trabajo hemos utilizado el modelo de programación por metas extendido (EGP) propuesto por Romero (2001), que considera como función de logro una combinación de la máxima desviación no deseada (métrica  $L_{\infty}$ ) y la media ponderada de las desviaciones no deseadas (métrica  $L_1$ ). Por tanto, se trataría

de encontrar una cartera que satisfaga lo máximo posible las metas propuestas para los 5 objetivos considerados.

#### 4. APLICACIÓN AL MERCADO DE EMPRESAS DE ENERGÍA RENOVABLE

Los datos financieros y ESG de las empresas que forman parte de nuestra base de datos proceden de Refinitiv-LSEG Data & Analytics, uno de los mayores proveedores mundiales de datos e infraestructuras de mercados financieros. Los resultados financieros fundamentales de una empresa están estrechamente relacionados con la evolución de su cotización bursátil. Consideramos los precios semanales de las acciones de cada empresa y calculamos los rendimientos logarítmicos semanales. Se comprobó que los precios semanales de las acciones, así como las puntuaciones ESG, estuvieran completos y solo se eligieron las empresas con todos los datos. El sector elegido para el estudio fue el de empresas de energías renovables (Bilbao-Terol *et al.*, 2024). La [tabla 11.2](#) muestra los filtros utilizados para seleccionar *las* empresas de energías renovables que forman parte de nuestra base de datos.

Tabla 11.2. Filtros Refinitiv

Currency	Euro (EUR)
Universe	Public Companies
Country of Exchange	Asia, Europe, Africa, Americas, Oceania
TRBC Industry name	Renewable energy Equipment & services (269) Renewable Fuels (111)
ESG Score	> 0.01 (2018, 2019, 2020). Total = 26 firms

Tras aplicar estos filtros, nuestra base de datos se compone de 26 empresas incluidas en el sector de energías renovables de Refinitiv. Por regiones, hay 13 empresas americanas, 7 europeas y 6 asiáticas. El periodo considerado para los objetivos financieros fue del 1/1/2020 al 28/2/2022 (ver [figura 11.5](#)).

En la literatura académica podemos encontrar diferentes formas de obtener una medida del desempeño ESG de las empresas (ver, Bilbao-Terol *et al.*, 2012a, 2013; Cabello *et al.*, 2014; Lamata *et al.*, 2016). En general, un criterio ESG para una cartera se define como

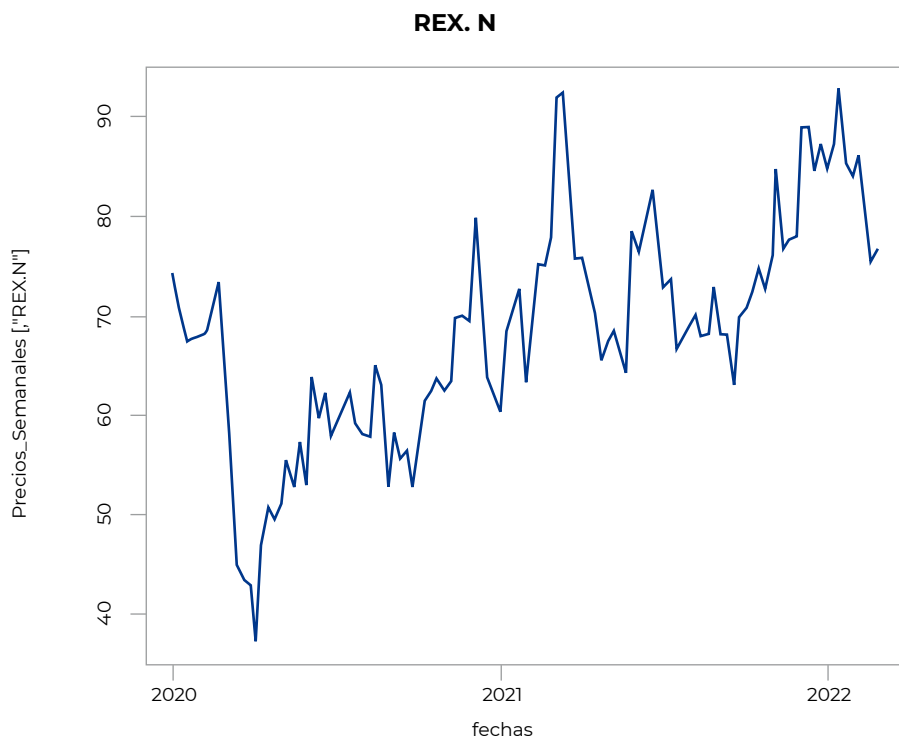


Figura 11.5. Precios semanales de la empresa de energía renovable REX.N

una media ponderada de las puntuaciones ESG de las empresas individuales contenidas en dicha cartera. Es este trabajo hemos considerado tres criterios ESG, uno por cada uno de los pilares E, S y G. Para estos objetivos hemos tenido en cuenta las puntuaciones de las empresas en 2020. En la [tabla 11.3](#) se presenta un resumen descriptivo de la rentabilidad esperada (RE), el  $CVaR_{95}$  con un nivel de confianza del 95% ( $CVaR_{95}$ ) y las puntuaciones ESG de las empresas de energías renovables durante el periodo analizado.

Tabla 11.3. Resumen descriptivo de nuestra base de datos

	<i>RE</i>	$CVaR_{95}$	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>G</i>
Mínimo	-0.01878	0.10758	000000	12.90850	22.30037
Media	0.00569	0.19445	49.33053	57.71550	49.08899
Máximo	0.01922	0.29015	80.53461	88.72290	82.75852

Podemos observar que la puntuación media en el pilar  $S$  de las empresas de nuestra muestra es superior a la de los pilares  $E$  y  $G$ .

Para obtener la cartera convencional, que servirá como cartera de referencia, se fija el perfil del inversor mediante un par de etiquetas lingüísticas: medio para el riesgo (soporte  $(\alpha) = [0,3,0,75]$ , ver figura 11.2) y bajo para las pérdidas (soporte  $(\lambda) = [1,1,5]$ , ver figura 11.3). A partir de esta información, asignamos valores discretos (dentro de su soporte) a ambos parámetros y obtenemos las correspondientes carteras de máximo equivalente cierto en la frontera eficiente (tabla 11.4) y el par media ponderada rentabilidad-riesgo.

Tabla 11.4. Carteras de máximo equivalente cierto en la frontera eficiente para el inversor con aversión al riesgo medio y baja aversión a las pérdidas

Portfolio	34	36	37	42
$CVaR$	0.1043	0.1091	0.1116	0.1271
$RE$	0.01417	0.01480	0.01511	0.01670
Par media ponderada	CVaR = 0.10929		RE = 0.0148219	

La cartera financiera más preferida es la cartera 36 de la frontera eficiente (véase la figura 11.4), la más próxima al par media ponderada, con  $(CVaR^*$  y  $RE^*) = (0.1091, 0.01480)$ . Estos valores serán los niveles de aspiración financieros del modelo de EGP que hay que resolver para obtener la cartera ESG. Para los objetivos ESG se ha elegido como nivel de aspiración el 70% de la máxima puntuación obtenida por las empresas de nuestra muestra  $(E^*, S^*, G^*) = (56.37, 62.11, 57.93)$ .

Aplicando la EGP, fijando como función de logro la media ponderada de las desviaciones no deseadas (es decir, ponderando con 0 la máxima desviación y, en consecuencia, con 1 la media ponderada de las desviaciones no deseadas), se obtiene la cartera ESG  $L_7$  con valores de los criterios  $(CVaR, RE, E, S, G) = (0.1093, 0.01305, 54.37, 62.11, 54.86)$ .

Como se puede comprobar, la cartera ESG  $L_7$  es financieramente peor que la cartera de referencia 36 (tabla 11.4) ofreciendo una menor rentabilidad y mayor riesgo. Respecto, del comportamiento ESG, a esta cartera solo alcanza la meta respecto del objetivo social. La figura 11.6 muestra el sacrificio financiero del inversor ESG.

### Frontera eficiente CVaR-media y Cartera Financiera Más Preferida

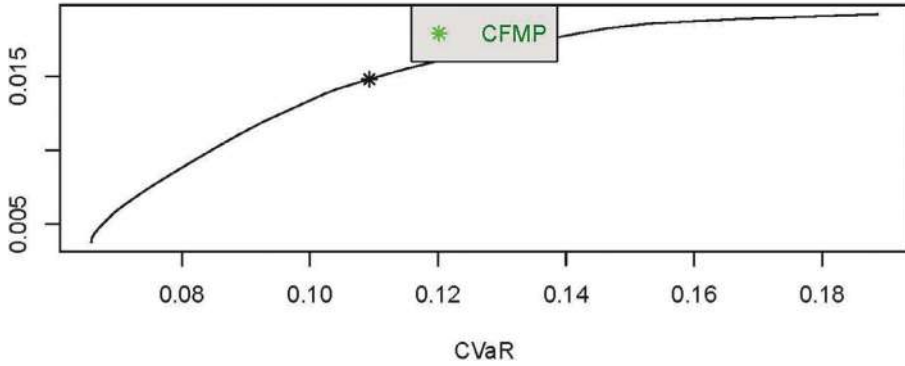


Figura 11.6. Cartera financiera preferida y cartera ESG

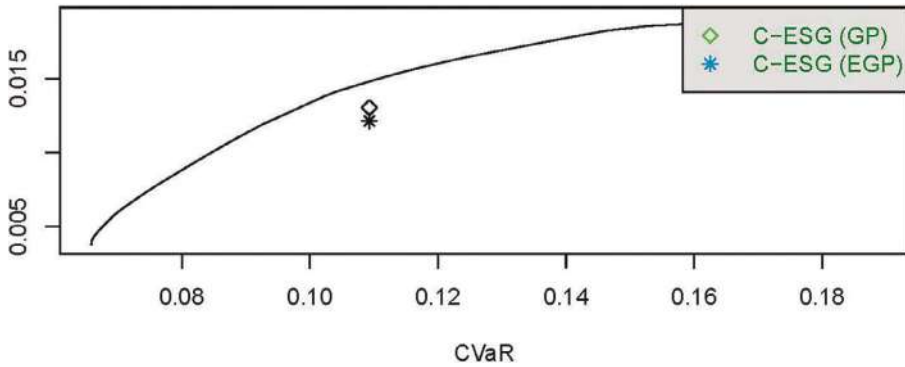


Figura 11.7. Carteras sostenibles (C-ESG [GP] es la cartera ESG  $L_1$  y C-ESG [EGP] es la cartera 0.2-0.8 EGP)

También se ha usado el modelo RGP ponderando con 0.8 la máxima desviación y, en consecuencia, con 0.2 la media ponderada de las desviaciones no deseadas, la cartera resultante presenta los siguientes valores:  $(CVaR, RE, E, S, G) = (0.1093, 0.01215, 54.37, 62.11, 57.93)$ .

Si comparamos esta cartera con la otra cartera ESG  $L_1$ , se puede apreciar la mejora en los objetivos de sostenibilidad, se satisfacen todas las metas ESG, el CVaR permanece igual, pero hay empeoramiento en la RE. Ninguna de las carteras ESG es financieramente eficiente, como se puede observar en la [figura 11.7](#).

## CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta una nueva metodología para aquellos inversores socialmente responsables que prefieren tomar sus propias decisiones sobre los valores en los que invertir. Nuestra propuesta permite obtener una cartera que satisfaga las preocupaciones financieras y de sostenibilidad de estos inversores. Respecto de las decisiones financieras, nuestro modelo se enmarca dentro de la Prospect Theory de Kahneman-Tversky, valorándose los resultados de la inversión con distinta actitud según se clasifiquen en pérdidas o ganancias. Para superar la dificultad que pueden encontrar los inversores en identificarse de manera nítida con respecto a su aversión al riesgo y a las pérdidas, hemos ofrecido un conjunto de etiquetas lingüísticas de manera que el inversor puede elegir entre cualquiera de ellas. La modelización de estas etiquetas mediante números difusos permite un tratamiento flexible de los parámetros que definen la utilidad (o valor) financiera del resultado de la inversión. Con esta herramienta, la cartera financiera más preferida es detectada en la zona de preferencia del inversor. La introducción de criterios de sostenibilidad se lleva a cabo aplicando la metodología de metas extendida para tener en cuenta el resultado global respecto de todos los objetivos y el individual del objetivo peor alcanzado. Con nuestra metodología, el inversor conoce el posible sacrificio financiero que supone su deseo de invertir en empresas preocupadas por las cuestiones ESG y se le ofrece la posibilidad de moverse en un rango de más o menos sacrificio financiero. Nuestro diseño de carteras de inversión utiliza las puntuaciones ESG de las empresas otorgadas por la agencia de calificación Refinitiv y nuestro universo de inversión está formado por acciones de empresas del sector de la energía renovable.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Oviedo en el marco del proyecto PAPI-23-GR-2011-0049. Agradecemos las valiosas enseñanzas recibidas de María Victoria Rodríguez Uría y Mariano Jiménez López durante nuestro tiempo compartido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arenas-Parra, M. y Cañal-Fernández, V. (2022): «Finanzas e inversión responsable, en Sostenibilidad corporativa y RSC: Fundamentos y Prácticas», en A. Blanco Prieto y E. Suárez Serrano (eds.), *Thomson Reuters Aranzadi*, 153-162.
- Ballesteros, E., Bravo, M., Pérez-Gladish, B., Arenas-Parra, M. y Pla-Santamaria, D. (2012): «Socially responsible investment: A multicriteria approach to portfolio selection combining ethical and financial objectives», *European Journal of Operational Research*, 216(2), 487-494.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M. y Cañal-Fernández, V. (2012a): «Selection of socially responsible portfolios using goal programming and fuzzy technology», *Information Sciences*, 189, 110-125.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M. y Cañal-Fernández, V. (2012b): «A fuzzy multi-objective approach for sustainable investments», *Expert Systems with Applications*, 39(12), 10904-10915.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Álvarez-Otero, S. y Cañal-Fernández, V. (2019): «Integrating corporate social responsibility and financial performance», *Management Decision*, 57 (2), 324–348.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Cañal-Fernández V. y Bilbao-Terol, C. (2013): «Selection of socially responsible portfolios using hedonic prices», *Journal of Business Ethics*, 115 (3), 515-529.
- Bilbao-Terol, A., Jiménez-López, M., Arenas-Parra M. y Rodríguez-Uría, M.V. (2018): «Fuzzy multi-criteria support for sustainable and social responsible investments: The case of investors with loss aversion», en E. Gil, E. Gil, J. Gil y M. A. Gil (eds.), *The Mathematics of the Uncertain. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 142, 555-564. Springer, Cham.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Quiroga-García, R. y Bilbao-Terol, C. (2024): «Is investing in the renewable energy stock market both financially and ESG efficient? A COVID-19 pandemic analysis», *Review of Managerial Science*, 18(7), 1885-1916.
- Billah, A. L., Koesrindartoto, D. P. y Faturohman, T. (2024): «Advancing ESG portfolio optimization: Methods, progress, and future directions», *Accounting & Finance Review*, 9 (2), 65-73.
- Billio, M., Costola, M., Hristova, I., Latino, C. y Pelizzon, L. (2021): «Inside the ESG Ratings: (Dis)agreement and performance», *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 28(5), 1426-1445.
- Busch, T., Bruce-Clark, P., Derwall, J., Eccles, R., Hebb, T., Hoepner, A., Klein, C., Krueger, P., Paetzold, F., Scholtens, B. y Weber, O. (2021): «Impact investments: a call for (re)orientation» *SN Business & Economics*, 1(33), 1-13.
- Cabello, J. M., Ruiz, F. y Perez-Gladish, B. (2014): «Synthetic indicators of mutual funds' environmental responsibility: An application of the reference point method», *European Journal of Operational Research*, 236 (1), 313-325.

- Cañal-Fernández, V., Antomil-Ibias J. y Rodríguez-Uría, M. V. (2009): «La selección de carteras socialmente responsables: revisión crítica de la literatura» *Rect@*, 9(1), 147-172.
- Cañal-Fernández, V. y Gómez-Martín, M. (2020): «¿Se puede especular con la conciencia? La evolución histórica de la inversión socialmente responsable», *Rect@*, 21(1), 65-88.
- EU Platform on Sustainable Finance (2022): *Platform on Sustainable Finance, The Extended Environmental Taxonomy: Final Report on Taxonomy extension options supporting a sustainable transition*.
- García-Bernabeu, A., Hilario-Caballero, A., Tardella, F. y Pla-Santamaria, D. (2024): «ESG integration in portfolio selection: A robust preference-based multicriteria approach», *Operations Research Perspectives*, 12, 100305.
- Gasser, S. M., Rammerstorfer, M. y Weinmayer, K. (2017): «Markowitz revisited: Social portfolio engineering», *European Journal of Operational Research*, 258(3), 1181-1190.
- González-Pozo, R., Arenas-Parra, M., Quiroga-García, R. y Bilbao-Terol, A. (2024): «A proposal for refining the ESG methodology used by rating agencies», *International Transactions in Operational Research* (en prensa).
- Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S. y Wismer, D. A. (1971): «On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-1* 3, 296-297.
- Hallerbach, W., Ning, H., Soppe, A., Spronk, J. (2004): «A framework for managing a portfolio of socially responsible investments», *European Journal of Operational Research*, 153(2), 517-529.
- Herzel, S., Nicolosi, M. y Stărică, C. (2012): «The cost of sustainability in optimal portfolio decisions», *The European Journal of Finance*, 18(3-4), 333-349.
- Ignizio, J. P. (1983): «Generalized goal programming: An overview», *Computers and Operations Research*, 10(4), 277-289.
- Kahneman, D. y Tversky, A. (1979): «Prospect theory: An analysis of decision under risk», *Econometrica*, XLVII, 263-291.
- Lamata, M. T., Liern, V. y Pérez-Gladish B. (2016): «Doing good by doing well: a MCDM framework for evaluating corporate social responsibility attractiveness», *Annals Operation Research*, 267, 249-266.
- Liern, V. y Pérez-Gladish, B. (2018): «Ranking corporate sustainability: A flexible multidimensional approach based on linguistic variables», *International Transactions in Operational Research*, 25(3), 1081-1100.
- Markowitz, H. M. (1952): «Portfolio selection», *Journal of Finance*, 7(1), 71-91.
- ONU (1987): Informe Brundland: *Our Common Future*. Nueva York, 1987.
- Rockafellar, R. T. y Uryasev, S. (2000): «Optimization of conditional value-at-risk», *Journal of Risk*, 2, 21-41.
- Romero, C. (2001): «Extended lexicographic goal programming approach: an unifying approach», *OMEGA, International Journal of Management Science*, 29, 63-71.

Tamiz, M., Jones, D. F. y Romero, C. (1998): «Goal programming for decision-making: An overview of the current state-of-the-art», *European Journal of Operational Research*, 111, 569-581.

UNPRI, Reporting Framework glossary (2022): *Principles for responsible investment*, United Nations.

Xidonas, P. y Essner, E. (2024): «On ESG portfolio construction: A multi-objective optimization approach», *Computational Economics*, 63(1), 21-45.

# Metodologías multicriterio para la construcción de indicadores compuestos en economía

ANA GARCÍA BERNABEU

*Universitat Politècnica de València*

ADOLFO HILARIO CABALLERO

*Universitat Politècnica de València*

JAVIER REIG MULLOR

*Universidad Miguel Hernández*

## INTRODUCCIÓN

«Lo que no se mide, no se puede mejorar», decía Peter Drucker en uno de sus libros más relevantes en el campo de la gestión empresarial, *The practice of management* (Drucker, 1954). En el campo de la economía, esta máxima adquiere un significado especial: sin indicadores, no es posible valorar el progreso de una sociedad, la pobreza o el bienestar de la población, ya que se trata de fenómenos que para ser descritos necesitan considerar múltiples dimensiones. En las últimas décadas, vemos que en economía constantemente emergen nuevos conceptos, como la innovación, la calidad de vida, la desigualdad de género o la economía circular que requieren una nueva forma de ser evaluados, abarcando todos los aspectos que caracterizan a estos fenómenos. Un indicador compuesto, a veces también denominado indicador sintético, puede

definirse como un único número o cifra resultante de una combinación de criterios primarios que abarca un conjunto de dimensiones y que afectan al fenómeno que se quiere medir (Freudenberg, 2003). Este valor permite comparar y medir a países, instituciones o empresas tanto de forma global como en cada dimensión específica. Por ello, los indicadores compuestos se utilizan ampliamente por organismos públicos y privados para tomar decisiones informadas, ya que al simplificar la información pueden visualizar la situación y la evolución de un país, región o empresa con respecto al conjunto con el que se comparan y así saber si es necesario actuar para mejorar. También permiten detectar «referentes», ya que si, por ejemplo, un país ocupa la primera posición con respecto a un indicador económico, el resto puede fijarse en qué medidas o actuaciones está llevando a cabo para conseguir esta posición.

La construcción de indicadores compuestos está estrechamente relacionada con los métodos multicriterio, ya que ambos buscan incorporar múltiples dimensiones para evaluar fenómenos complejos de manera integral. Los métodos multicriterio son una herramienta que se utiliza para evaluar, ponderar y agregar distintos criterios, lo cual es esencial en la creación de indicadores compuestos que representen fielmente la realidad de fenómenos económicos y sociales multidimensionales. Los métodos multicriterio que se utilizan para la construcción de indicadores compuestos se enmarcan en la categoría de métodos de decisión multiatributo (MADM, por sus siglas en inglés), ya que se utilizan para resolver problemas discretos en la que las alternativas están predeterminadas y se ordenan o clasifican en función de la importancia que el decisor o el experto asigne a cada una de ellas (Barba-Romero, 1987). Esta característica de los métodos MADM resulta muy útil para la construcción de indicadores compuestos, ya que permite evaluar diversas dimensiones de un fenómeno mediante la asignación de pesos a cada criterio, integrándolos en una única medida que permite ordenar y clasificar las alternativas en función del valor obtenido. Algunos de los métodos multicriterio más utilizados en la construcción de indicadores compuestos incluyen el proceso de análisis jerárquico (AHP), la técnica para el orden de preferencias por similitud con la solución ideal (TOPSIS), el método ELECTRE (eliminación y elección traduciendo la realidad), el análisis de envoltura de datos (DEA) y PROMETHEE (método de organización de preferencias para la evaluación de enriquecimiento). Una revisión completa de los distintos métodos multicriterio aplicados a la construcción de indicadores compuestos puede encontrarse en el trabajo de Samira *et al.* (2019).

En un contexto en el que la mayoría de los problemas del mundo real aparecen como datos inciertos, surge la necesidad de adoptar decisiones en un ambiente de incertidumbre. Además, las preferencias de los decisores cuando evalúan la importancia de los criterios no siempre es un valor exacto. Por tanto, en el binomio multicriterio-indicadores compuestos la incertidumbre o imprecisión tanto en los datos como en la modelización de las preferencias de los decisores no puede obviarse y esto supone incluir en la etapa de construcción de los indicadores compuestos un análisis de robustez (Greco *et al.*, 2019). Una solución robusta es una solución estable para todos o la mayoría de los conjuntos de datos (Escribano Ródenas y Fernández Barberis, 2006). El análisis de robustez se relaciona estrechamente con el método multicriterio *Stochastic Multi-criteria Acceptability Analysis* (SMAA) propuesto inicialmente por Lahdelma *et al.* (1998), ya que permite evaluar la sensibilidad de los resultados frente a la incertidumbre y la variabilidad en los criterios y preferencias. SMAA permite identificar y analizar la estabilidad de las decisiones multicriterio considerando variaciones en los pesos y parámetros de cada criterio. Este análisis de robustez se utiliza como una «garantía de calidad», permitiendo evaluar cómo varía el indicador frente a cambios en alguno de los pasos metodológicos empleados en su construcción. De este modo, se minimizarán significativamente las posibilidades de transmitir interpretaciones erróneas o mensajes engañosos (Saisana *et al.*, 2005).

Para ilustrar la aplicación de los métodos multicriterio en la construcción de indicadores compuestos y mostrar cómo es posible mejorar la calidad de la información que transmiten para tomar decisiones, se analiza la calidad de vida en las diferentes regiones de España. La propuesta consiste en utilizar técnicas multicriterio para tener en cuenta los problemas de robustez relacionados con la variabilidad de los pesos asignados a los indicadores y dimensiones individuales, produciendo así una clasificación probabilística de la calidad de vida. Metodológicamente, se implementa una nueva herramienta híbrida que permite combinar el método SMAA basado en la exploración del espacio de pesos con TOPSIS. La principal ventaja de este indicador compuesto radica en su capacidad para proporcionar una visión más amplia de los aspectos sociales, de bienestar y sostenibilidad asociados al progreso en España, superando así las limitaciones de los índices compuestos convencionales que se basan en un único conjunto de ponderaciones predefinidas.

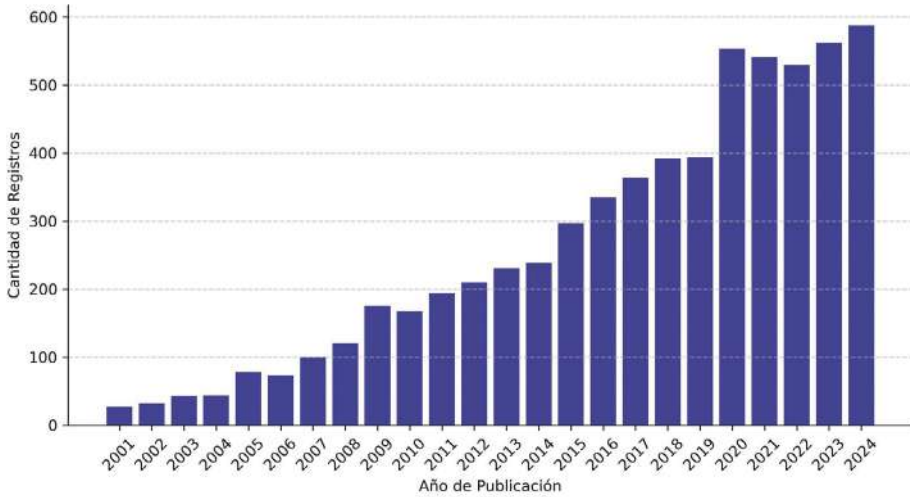


Figura 12.1. Resultados de la búsqueda «composite indicator» en Web of Science durante el periodo 2001-2024

## 1. ORIGEN DE LOS INDICADORES COMPUESTOS Y APLICACIONES EN ECONOMÍA

Los indicadores compuestos tienen su origen en la necesidad de resumir y cuantificar información compleja en un solo valor que sea fácil de interpretar. El uso de indicadores compuestos se ha popularizado en diversas áreas, como la economía, la salud, la educación o la gestión ambiental. Aunque su uso se ha extendido considerablemente en las últimas décadas, su origen está vinculado al avance de la estadística y la economía aplicada en el siglo XX.

Como ejemplo de su popularidad, en una búsqueda del término *composite indicator* en la Web of Science (WOS), se han obtenido más de 6400 resultados, destacando una notable evolución desde el año 2015 (figura 12.1). En cuanto al campo de aplicación, resulta que más de un cuarto de las contribuciones se incluyen categorías afines al campo de estudio de la economía. En concreto, un 13,8% de los trabajos pertenecen a la categoría *Economics*, un 4,01% en *Business* y 6,23% en *Management*.

A pesar de su popularidad y de aportar muchas ventajas en la evaluación de fenómenos multidimensionales como: la simplificación de información, el presentar una visión clara o la evaluación integral, también se ha de tener en cuenta que la información contenida en un único valor no siempre garantiza su interpretabilidad y

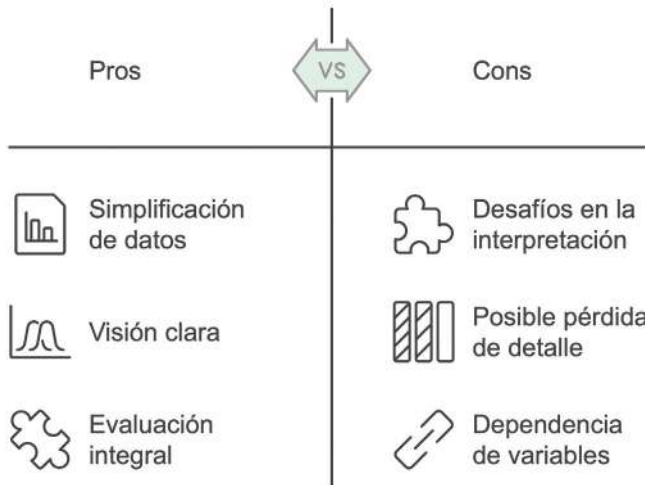


Figura 12.2. Ventajas y desventajas en el uso de indicadores compuestos

transparencia. Algunas de estas ventajas y desventajas se muestran en la [figura 12.2](#), adaptada de Saisana y Tarantola, 2002.

En el ámbito de la economía, uno de los primeros antecedentes importantes de los indicadores compuestos se encuentra en el trabajo de economistas y estadísticos que, en la primera mitad del siglo XX, comenzaron a buscar formas alternativas y más completas de medir el bienestar y el desarrollo. La creación del producto interior bruto (PIB) en los años 1930-1940, aunque unidimensional, fue un hito clave para la macroeconomía y todavía hoy es un referente para la política económica. Sin embargo, a medida que aumentaba la conciencia de que el PIB no reflejaba plenamente el bienestar de una nación (por ejemplo, no consideraba la distribución de ingresos o el medio ambiente), surgió la necesidad de crear medidas que integraran múltiples dimensiones.

La creación del índice de desarrollo humano (IDH) por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en 1990 supuso un avance en la medición del progreso de forma multidimensional. El IDH combina indicadores de salud (esperanza de vida), educación (años promedio de escolarización) y nivel de vida (ingresos) para proporcionar una comprensión más amplia del bienestar en un país. Este índice es uno de los primeros ejemplos modernos de indicadores compuestos y un modelo para muchos otros.

El hecho de que el progreso social, ambiental y económico no siempre va de la mano del aumento del PIB, ha impulsado el uso de indicadores de calidad de vida para ofrecer una visión más completa

y realista del bienestar de las personas (Stiglitz *et al.*, 2009). En la Unión Europea se propone un indicador de calidad de vida basado en la iniciativa Quality of Life Indicators de Eurostat, mientras que en la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) se desarrolla el Índice de Mejor Vida (*Better Life Index*). Estos indicadores, a diferencia de los enfoques basados únicamente en el crecimiento económico, permiten evaluar dimensiones clave como la salud, la educación, la seguridad y el entorno ambiental, ofreciendo un marco más equilibrado para la formulación de políticas. Al centrarse en el bienestar multidimensional, estos indicadores ayudan a identificar áreas de mejora que el PIB por sí solo no refleja, lo cual es fundamental para un desarrollo más inclusivo y sostenible (Fleurbaey y Blanchet, 2013).

Otro ejemplo reciente de indicador compuesto es el índice de desarrollo sostenible (*SDG Index*), que mide el avance de los países en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Este índice permite evaluar el progreso de cada nación hacia 17 metas globales en áreas como pobreza, salud, educación, igualdad de género, energía limpia y justicia, entre otros. El indicador propuesto permite realizar comparaciones internacionales y seguir los avances de los países en el desarrollo sostenible en función de un valor máximo de 100, que representa el cumplimiento total de los objetivos. Este enfoque permite visualizar de manera simplificada y comprensible el estado de desarrollo sostenible de cada país y facilita la identificación de áreas prioritarias de mejora.

## **2. PASO A PASO PARA CONSTRUIR UN INDICADOR COMPUESTO MULTI-CRITERIO: UNA GUÍA BÁSICA**

Al igual que no existe una definición oficial de lo que es un indicador compuesto, tampoco existe un consenso en cómo debe construirse. Sin embargo, un referente fundamental para construir un indicador compuesto es la guía *Handbook of constructing composite indicators* (Nardo *et al.*, 2008). En este manual se propone un proceso que abarca desde el desarrollo del marco teórico hasta la presentación y difusión del indicador compuesto y cuya finalidad es de aumentar la transparencia y la solidez de la metodología seleccionada, representado en la [figura 12.3](#).

La primera etapa implica el desarrollo de un marco teórico que defina la estructura jerárquica de dimensiones y seleccione los

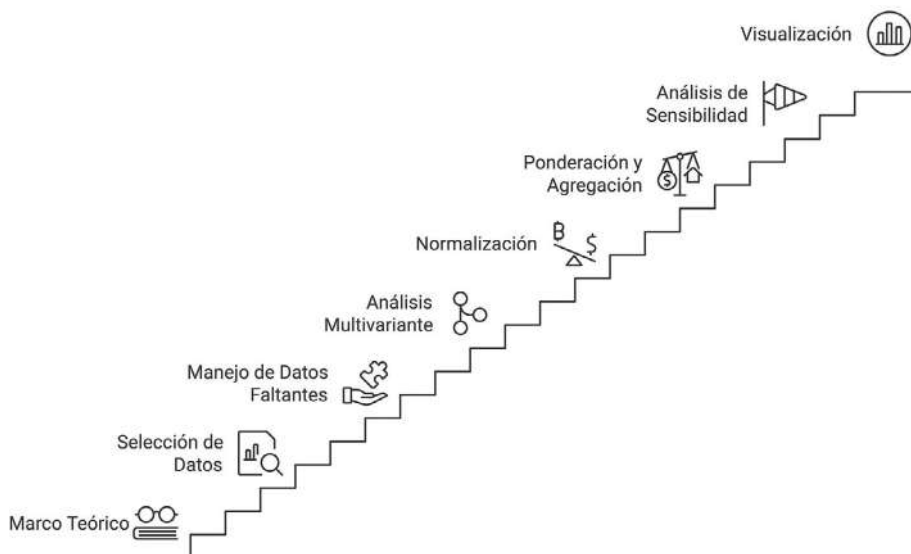


Figura 12.3. Pasos para crear un indicador compuesto

indicadores apropiados para evaluar el fenómeno que se quiere medir. En esta etapa es fundamental la colaboración de expertos que conceptualicen y agrupen en dimensiones o pilares los elementos que componen el índice. Por ejemplo, si se quiere medir el desarrollo urbano sostenible, el marco teórico podría incluir la dimensión económica, ambiental y social. A continuación, se debería especificar qué criterios se incluyen en cada dimensión y qué tipo de datos cualitativos o cuantitativos se van a utilizar. En la dimensión económica se pueden considerar variables como la renta per cápita, el desempleo o la calidad de las infraestructuras. En la dimensión ambiental se podrían incluir indicadores como la calidad del aire, la gestión de residuos o la eficiencia energética. Por último, en términos sociales podrían considerarse variables como el acceso a servicios básicos, el nivel de educación promedio o los niveles de pobreza y desigualdad. Una vez cuantificados los criterios se construye una matriz en la que las filas son las alternativas, en este caso las ciudades a evaluar y las columnas los criterios agrupados por dimensiones.

Las siguientes etapas están relacionadas con el análisis de los datos, incluyendo la imputación de datos faltantes o el análisis estadístico de los mismos. Un paso muy importante para construir un indicador compuesto es la normalización, ya que los datos utilizados suelen provenir de diferentes criterios con escalas y unidades distintas. La normalización convierte estas variables en una escala común,

permitiendo que los datos sean comparables y se puedan combinar de manera coherente en el indicador compuesto. Los métodos de normalización más comunes en la construcción de indicadores compuestos son el escalado Min-Max, que transforma los valores a una escala de 0 a 1, donde el mínimo se asigna como 0 y el máximo como 1, facilitando la comparación entre diferentes criterios; la normalización Z-score, que ajusta los valores en función de la media y la desviación estándar, centrando los datos en torno a 0 con una desviación de 1, permitiendo una evaluación relativa respecto a la distribución de los datos; o la normalización por proporciones (ratio), que mide el valor de cada criterio en relación con una referencia común o un objetivo específico, como el porcentaje de población con acceso a un servicio.

Una vez los datos son comparables, se ha de definir el esquema de ponderación de los criterios y las dimensiones, es decir, qué importancia se asigna a cada uno. La forma más sencilla de ponderar criterios en un indicador compuesto es asignar pesos iguales a cada criterio. Este enfoque es objetivo, fácil de implementar y evita sesgos derivados de preferencias subjetivas. Sin embargo, asignar pesos iguales también es simplista, ya que supone que todos los criterios tienen la misma importancia en la medición del fenómeno, lo cual no siempre refleja la realidad ni las prioridades específicas del análisis. Si se quiere ir más allá de esta simplicidad e incluir opiniones de expertos para captar la relevancia relativa de cada criterio, uno de los métodos multicriterio más conocidos es el AHP. Este método permite estructurar el problema en una jerarquía de criterios y realizar comparaciones por pares entre ellos, facilitando que los expertos asignen un peso a cada criterio de acuerdo con su importancia relativa. Estas comparaciones se traducen en una matriz que luego se utiliza para calcular los pesos finales, asegurando que la ponderación sea consistente y refleje de manera equilibrada la percepción de los expertos sobre la importancia de cada dimensión del fenómeno. Un ejemplo destacado de un indicador compuesto en economía que ha utilizado método AHP para obtener pesos es el índice de competitividad global, desarrollado por el Foro Económico Mundial. Este índice evalúa la competitividad de los países a través de varios factores económicos y sociales.

La siguiente etapa consiste en la agregación de los criterios una vez ponderados en un indicador único. En esta etapa uno de los problemas más frecuentes es el de la compensabilidad, que surge cuando un rendimiento destacado en un área puede «compensar» un rendimiento deficiente en otra, lo que puede llevar a una

evaluación que no refleje adecuadamente la realidad del fenómeno que se está midiendo. Es en esta etapa donde algunos métodos multicriterio como TOPSIS o ELECTRE son particularmente útiles, ya que permiten clasificar y ordenar las alternativas que reflejan la importancia de cada criterio sin depender exclusivamente de la compensación entre ellos.

Las últimas etapas incluyen realizar un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en la elección de las variables o de los métodos de ponderación o agregación afectan el resultado final del indicador. También, y como etapa final, es importante tener en cuenta la forma en la que se presentan los resultados, es decir, qué herramientas de visualización se van a utilizar. De esta forma, a través de gráficos o mapas, se presentan los resultados de la clasificación, facilitando la interpretación y la comunicación de las conclusiones clave al público o a los responsables de la toma de decisiones.

### **3. MEDIR LA CALIDAD DE VIDA REGIONAL CON UN INDICADOR COMPUESTO MULTICRITERIO ROBUSTO**

En la Unión Europea la preocupación por medir más allá del PIB se ha visto acompañada por la creación de un marco de indicadores para medir la «calidad de vida» como concepto amplio que abarca el bienestar físico, mental, emocional y social de las personas e incluye no solo factores objetivos como la salud, los ingresos y el entorno, sino también dimensiones subjetivas como la satisfacción personal y la percepción de bienestar. Siguiendo esta línea, en España, el Instituto Nacional de Estadística (INE) desarrolla una propuesta simplificada de este marco con 17 indicadores principales agrupados en 9 dimensiones, tal y como se refleja en la [figura 12.4](#).

Los indicadores contemplados en cada dimensión se derivan principalmente de encuestas dirigidas a la población, tales como la encuesta de condiciones de vida (ECV) y la encuesta de población activa (EPA). El INE utiliza de forma experimental el método Mazziota Pareto ajustado (AMPI), desarrollado por Mazziotta y Pareto (2013), para agregar primero cada uno de los indicadores en un único indicador a nivel de cada dimensión y luego sumando dimensiones asignando el mismo peso a todas. Esta decisión es claramente discutible, ya que la importancia que se asigna a aspectos como la educación, la salud o el ocio no tiene por qué ser la misma. Por tanto, ante la pregunta «¿es posible mejorar la calidad en los resultados de este indicador?», respondemos que sí. Como solución a la dificultad de



Figura 12.4. Dimensiones y criterios de la calidad de vida según el INE

asignar pesos a los diferentes criterios y dimensiones, proponemos un nuevo y robusto indicador de calidad de vida (IRCV), que combina los métodos SMAA y TOPSIS. Esta propuesta busca superar las limitaciones de la metodología inicial, mejorando la precisión y fiabilidad en la evaluación de la calidad de vida. A continuación, se exponen las características más relevantes de estos dos métodos para proporcionar un poco más de contexto.

El método TOPSIS es uno de los métodos más populares en el grupo de métodos para clasificar y ordenar alternativas en problemas de toma de decisiones multicriterio y que fue propuesto por los investigadores Hwang y Yoon (1981). En los años 70 y 80, las técnicas de toma de decisiones multicriterio estaban en auge, ya que los avances en computación permitían analizar grandes volúmenes de datos y resolver problemas complejos. La idea central de TOPSIS es que una buena solución debería estar lo más cerca posible de una solución ideal (la combinación teórica de los mejores valores para cada criterio) y lo más lejos posible de una solución negativa (la

combinación de los peores valores de cada criterio). TOPSIS es valorado por su simplicidad y eficiencia, ya que no requiere suposiciones complejas ni cálculos demasiado complicados. Sin embargo, su principal limitación es que no considera las interdependencias entre criterios, ya que los trata como independientes entre sí.

Por tanto, TOPSIS es una buena opción para construir indicadores compuestos cuando:

- Es necesario tener un punto de referencia claro (ideal y anti ideal).
- Los subindicadores tienen diferentes pesos o prioridades.
- Los criterios no estén fuertemente correlacionados.
- Se busca una metodología transparente y reproducible.

El método SMAA es un método de toma de decisiones multicriterio que surge en la década de 1990 como una respuesta a las limitaciones de los enfoques tradicionales en problemas con incertidumbre o imprecisión en las preferencias y los pesos de los criterios. El desarrollo de SMAA fue liderado por investigadores como Lahdelma *et al.* (1998), que trabajaron en el campo de la investigación operativa y la toma de decisiones multicriterio.

SMAA fue diseñado para superar uno de los principales desafíos en los métodos multicriterio: la dificultad para asignar pesos precisos a los criterios cuando los decisores no pueden, o no desean, expresar sus preferencias de manera exacta. En los enfoques multicriterio clásicos, como el método de ponderación simple o en el método AHP, es fundamental asignar un peso exacto a cada criterio, lo que introduce subjetividad y puede afectar la robustez de los resultados. SMAA aborda esta cuestión, permitiendo trabajar con distribuciones de probabilidades en lugar de con pesos fijos, de modo que se exploren todas las posibles combinaciones de pesos y preferencias.

El método SMAA es particularmente útil cuando:

- Falta información precisa sobre los pesos de los criterios.
- Los decisores no están dispuestos o no pueden definir explícitamente sus preferencias.
- Existe incertidumbre tanto en los datos como en las preferencias.
- Se requieren resultados robustos que consideren múltiples escenarios.

Su enfoque probabilístico permite obtener resultados más confiables en situaciones de incertidumbre, ya que los resultados se presentan en un *ranking* que incluye para cada posición un índice de aceptabilidad, ofreciendo una información clara sobre la robustez de la clasificación.

Para obtener el IRCV se propone seguir los siguientes pasos:

**Paso 1.** Construir la matriz de decisión. A partir del marco teórico y de la estructura de dimensiones y criterios se ha de construir una matriz de decisión donde las filas representan a las regiones y las columnas a los valores de cada indicador. Por tanto, tendríamos una matriz de 19 alternativas y los valores de los 17 criterios agrupados en 9 dimensiones, tal y como se ha representado en la [figura 12.4](#).

**Paso 2.** Normalización. Como los indicadores pueden tener diferentes unidades de medida, es necesario normalizarlos para poder compararlos en la misma escala. Para ello, el valor de cada variable se divide por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los valores del mismo indicador, lo cual garantiza una escala uniforme y facilita la comparación. Pasamos, entonces, de una matriz con distintas unidades de medida a una matriz normalizada con valores en una misma escala.

**Paso 3.** Obtener la matriz de decisión ponderada normalizada. En primer lugar, se ha de definir el esquema de ponderación probabilístico usando el método SMAA. Este esquema permite asignar pesos a los criterios en función de las preferencias, pero de forma indirecta y flexible, a través de simulaciones estocásticas. Estos pesos se generan mediante el método de Monte Carlo, que simula múltiples combinaciones estocásticas en un espacio de preferencias, habitualmente siguiendo una distribución uniforme.

**Paso 4.** Evaluación de las alternativas. Cada alternativa (región) se evalúa aplicando el método TOPSIS sobre las distintas combinaciones de pesos generadas en las simulaciones. Se calculan los valores ideales (positivos) y anti ideales (negativos) y se determina la distancia de cada alternativa a estos valores. Finalmente, se obtiene un coeficiente de proximidad que mide la cercanía de cada alternativa a la solución ideal. Este coeficiente varía entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican que la alternativa está más cerca de la solución ideal.

**Paso 5.** Calcular el índice de aceptabilidad. La aceptabilidad de una alternativa se define como la proporción de combinaciones de pesos en las que dicha alternativa es preferida sobre las demás. Es decir, cada alternativa obtiene un valor de aceptabilidad que indica la probabilidad de ser elegida, considerando la incertidumbre en la ponderación de los criterios.

**Paso 6.** Evaluación de las regiones. Para cada conjunto de pesos generado con el método SMAA, se calcula la puntuación de las regiones a través del coeficiente de proximidad de TOPSIS. Luego, se ordenan las regiones en función de su índice de aceptabilidad,

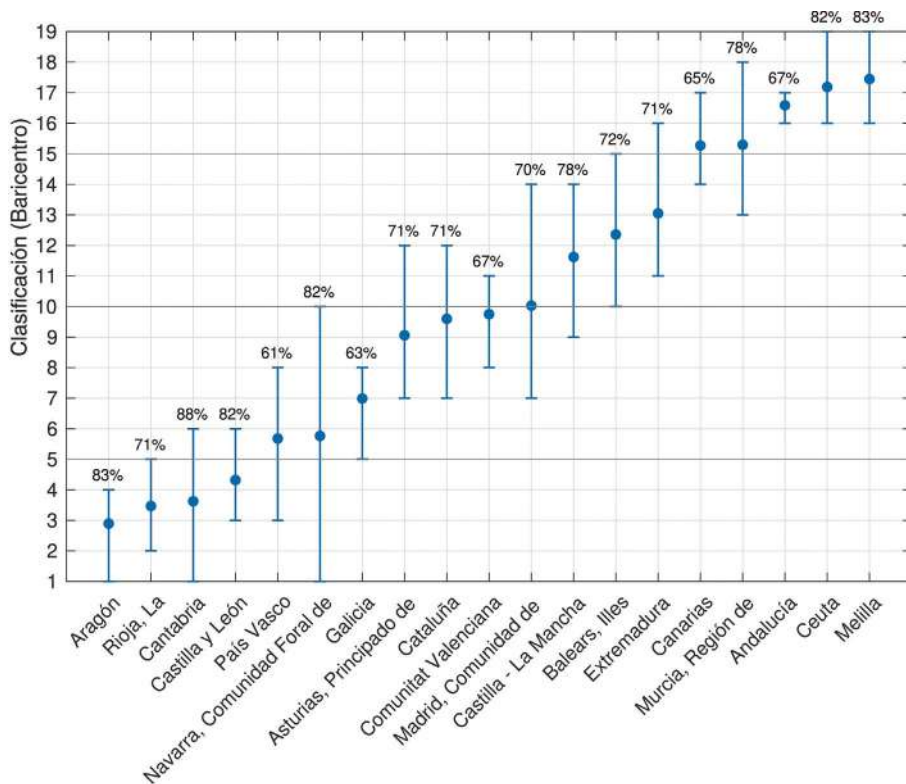


Figura 12.5. Ranking basado en el IRCV para las regiones españolas

mostrando cuántas veces cada región ocupa una posición preferida respecto a las demás. Esta clasificación permite identificar cuáles regiones destacan según el indicador compuesto.

Cada punto en la [figura 12.5](#) representa la posición promedio de una región (baricentro) en el *ranking* de calidad de vida, mientras que las líneas verticales indican la variabilidad o rango de posiciones en el que cada región podría ubicarse debido a la sensibilidad del modelo frente a los criterios y pesos asignados. En este *ranking*, Aragón y La Rioja se destacan como las regiones con mayor calidad de vida, ocupando los primeros lugares (1 y 2 respectivamente) con una baja variabilidad. Esto sugiere que, independientemente de los cambios en los pesos que se asignen por el decisor, estas regiones tienden a mantenerse en posiciones altas, lo que respalda la robustez de su clasificación. Por otro lado, regiones como Andalucía, Ceuta y Melilla se ubican en los últimos lugares, indicando menores niveles de calidad de vida según los criterios evaluados.

Además, el porcentaje que acompaña a algunas regiones (como Navarra, Castilla y León y País Vasco, entre otros) refleja la aceptabilidad o probabilidad de que esa región ocupe posiciones cercanas a su baricentro. En general, los valores porcentuales altos y la baja variabilidad en las primeras posiciones sugieren una mayor consistencia en el *ranking* de calidad de vida de estas regiones. Por el contrario, aquellas con mayor variabilidad muestran que su posición en el *ranking* podría fluctuar más ampliamente debido a la sensibilidad del modelo, lo que refleja cierta inestabilidad en sus resultados.

## CONCLUSIONES

Los indicadores compuestos en economía son útiles en la vida real porque permiten simplificar información compleja, combinando varios criterios en una única cifra que resulta fácil de interpretar. Esto es esencial en el contexto económico actual, donde preocupan temas como la calidad de vida, el desarrollo sostenible o la competitividad y que para ser explicados necesitan considerar varios factores. Las metodologías multicriterio enriquecen la construcción de indicadores compuestos con respecto a métodos más sencillos como la suma ponderada y ofrecen varias alternativas metodológicas para profundizar en aspectos relacionados con la asignación de pesos o la agregación de criterios o dimensiones.

En particular, la incorporación de métodos como el AHP, TOPSIS o SMAA permiten abordar desafíos inherentes a la construcción de indicadores compuestos, como la compensabilidad y la incertidumbre. En este capítulo, nos hemos centrado especialmente en las cuestiones de la ponderación y la agregación, ya que consideramos que son el centro de la mayor parte de las críticas en la literatura. También hemos puesto en el punto de mira la evaluación de la calidad de vida de las regiones españolas como ejemplo de indicador compuesto que puede mejorarse para presentar un análisis más robusto. La combinación de SMAA y TOPSIS permite aprovechar la flexibilidad del primero para modelar incertidumbres en las preferencias y la claridad del segundo para ordenar y clasificar alternativas en función de su proximidad a la solución ideal. De esta manera, se logra un indicador compuesto robusto, que no solo capta las distintas dimensiones de la calidad de vida, sino que además ofrece una clasificación más sólida y estable.

## AGRADECIMIENTOS

Este capítulo ha sido desarrollado en el marco del proyecto SME Dynamics: Leveraging the Digital Footprint for Sustainable Futures (PID2023-152106OB-I00), financiado por la Agencia Estatal de Investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barba-Romero, S. (1987): «Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta», *Investigaciones Económicas*, 11, 279-308.
- Drucker, P. F. (1954): *The practice of management*. Nueva York: Harper & Brothers.
- Escribano Ródenas, M. y Fernández Barberis, G. M. (2006): «Desarrollo histórico del concepto de robustez en la teoría de la decisión: métodos de relaciones de superación vs. métodos bayesianos», en *Historia de la probabilidad y la estadística (III)*. Madrid: Delta Publicaciones Universitarias, 313-329.
- Fleurbaey, M. y Blanchet, D. (2013): *Beyond GDP: Measuring welfare and assessing sustainability*. Oxford: Oxford University Press.
- Freudenberg, M. (2003): «Composite indicators of country performance: A critical assessment», *STI Working Paper*, 16.
- Greco, S., Ishiza, A., Tasiou, M. y Torrisi, G. (2019): «On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness», *Social Indicators Research*, 141, 61-94.
- Hwang, C. L., y Yoon, K. (1981): *Multiple attributes decision making: Methods and applications*. Nueva York: Springer.
- Lahdelma, R., Hokkanen, J. y Salminen, P. (1998): «SMAA - Stochastic multiobjective acceptability analysis», *European Journal of Operational Research*, 106, 137-143.
- Mazziotta, M. y Pareto, A. (2013): «Methods for constructing composite indices: One for all or all for one?», *Rivista Italiana Di Economia, Demografia e Estatistica*, 67, 67-80.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A. y Giovanini, E. (2008): *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide* (2nd ed.). OECD publishing.
- Saisana, M., Nardo, M. y Saitelli, A. (2005): «2005 ESI Sensibility Analysis», en *The 2005 environmental sustainability index*. New Haven: Yale Center for Environmental Law and Policy.
- Saisana, M., y Tarantola, S. (2002): *State-of-the-art report on current methodologies and practices for composite indicator development*. Report EUR 20408 EN.

- Samira, E. G., Núñez, T. y Ruiz, F. (2019): «Building composite indicators using multicriteria methods: a review», *Journal of Business Economics*, 89, 1-24.
- Stiglitz, J., Sen, A. y Fitoussi, J.P. (2009): *The measurement of economic performance and social progress revisited*. París: Observatoire Francais des Conjonctures Economiques.

# Agregación ordinal de valoraciones cualitativas en la toma de decisiones multicriterio

JOSÉ LUIS GARCÍA LAPRESTA  
*Universidad de Valladolid*

DAVID PÉREZ ROMÁN  
*Universidad de Valladolid*

## INTRODUCCIÓN

En muchos problemas reales abordados desde diversas disciplinas (economía, gestión, *marketing*, psicología, salud, sociología, turismo, entre otras) está bastante extendido el uso de escalas cualitativas ordenadas (ECO), las cuales están formadas por términos lingüísticos. A través de las ECO es posible recoger las opiniones emitidas por un grupo de agentes sobre una serie de alternativas, proporcionando un enfoque intuitivo que se alinea con los patrones cognitivos humanos.

En el caso del *marketing*, se han llevado a cabo varios estudios para asignar valores cualitativos de escala a adverbios y adjetivos de modo que se puedan desarrollar escalas de intervalos iguales. Los primeros investigadores, como Myers y Warner (1968), recopilaron valores de escala para 50 adjetivos en dos categorías de respuesta paralelas: una formal con 5 términos lingüísticos: («extremadamente pobre», «razonablemente pobre», «neutral», «bueno», «notablemente

bueno») y una coloquial, compuesta por 7 términos lingüísticos: («horrible», «malo», «moderadamente pobre», «neutral», «agradable», «delicioso», «fantástico»).

Brown *et al.* (1973) utilizan una escala de evaluación de productos con 6 términos lingüísticos: («pobre», «regular», «bueno», «muy bueno», «extremadamente bueno», «excelente»), que ha sido ampliamente utilizada por empresas de alimentación.

Por otra parte, la *escala de ansiedad y depresión hospitalaria* (HADS), desarrollada por Zigmond y Snaith (1983), utiliza diferentes ECO para medir la gravedad de la depresión en atención primaria. Algunas de estas escalas son: («muy pocas veces», «no a menudo», «a veces», «a menudo») y («solo ocasionalmente», «de vez en cuando, pero no demasiado a menudo», «muchas veces», «una gran parte del tiempo»).

En términos generales, las decisiones clave a la hora de diseñar una encuesta pueden desglosarse en dos componentes principales: el número de términos lingüísticos a ofrecer, incluida la opción de un número par o impar de categorías, y el etiquetado de las categorías de respuesta (Weijters *et al.*, 2010).

Aunque el formato de una ECO puede afectar la calidad de los datos de un cuestionario (Greenleaf, 1992; Lietz, 2010), la evidencia específica del mecanismo interno sobre cómo el formato de la ECO afecta la calidad de los datos del cuestionario ha sido muchas veces ignorada en la literatura. Una razón importante para esta brecha es que la mayoría de las investigaciones sobre estilos de respuesta han adoptado un único enfoque, dando por sentado que las ECO son uniformes: la proximidad psicológica entre cada par de términos consecutivos de la escala es percibida como igual. Sin embargo, esta suposición de uniformidad a menudo no se sostiene, ya que los individuos pueden percibir diferentes grados de proximidad entre los términos de una ECO, en función de factores contextuales o subjetivos.

En los ejemplos presentados anteriormente las ECO pueden considerarse uniformes. Por ejemplo, la escala de Myers y Warner (1968) utilizada para evaluar productos o anuncios: («extremadamente pobre», «razonablemente pobre», «neutral», «bueno», «notablemente bueno»). Sin embargo, no todas las ECO son uniformes. Por ejemplo, la escala utilizada por Brown *et al.* (1973) para evaluar productos: («malo», «regular», «bueno», «muy bueno», «extremadamente bueno», «excelente») no puede considerarse uniforme si se percibe que «regular» está más cerca de «bueno» que de «malo» (o si «bueno» está más cerca de «muy bueno» que de «regular», etc.).

Aunque las ECO consisten en términos lingüísticos vagos, a veces estos términos se representan mediante valores numéricos exactos. Por ejemplo, la Asociación Internacional de Enólogos considera que cada atributo de un vino se evalúa en una ECO de 7 términos lingüísticos: («malo», «mediocre», «inadecuado», «pasable», «bueno», «muy bueno», «excelente») y a cada término se le asocia un número entero (Balinski y Laraki, 2013). Las opiniones y juicios de las personas son generalmente imprecisos y, por tanto, sería engañoso representarlos mediante valores numéricos precisos (Beyth-Marom, 1982; Teigen, 1988; Wallsten *et al.*, 1986). A pesar de que esta práctica ha sido ampliamente utilizada en la literatura (Averkin *et al.*, 2006; Franceschini y Romano, 1999), puede generar dudas debido a que diferentes codificaciones de la misma ECO podrían generar diferentes resultados al agregar evaluaciones individuales (Franceschini *et al.*, 2004; Roberts, 1985).

Para captar la vaguedad de las ECO, algunos autores asignan otros objetos cardinales menos precisos que los números reales, como intervalos o números difusos, a los términos lingüísticos de las ECO (Baas y Kwakernaak, 1977; Chen y Hwang, 1992). Estas representaciones pueden generar desconfianza sobre los resultados obtenidos, ya que no se tiene en cuenta cómo se perciben las proximidades entre los términos lingüísticos de las ECO.

Algunas ECO con un número impar de términos lingüísticos se diseñan como uniformes, fijando un término lingüístico central neutro y disponiendo los demás términos a su alrededor de forma simétrica (por ejemplo, la ECO de 5 términos {«muy malo», «malo», «regular», «bueno», «muy bueno»}). Sin embargo, no todas las ECO con un número impar de términos lingüísticos son necesariamente uniformes<sup>1</sup>.

Existen numerosas contribuciones en la literatura que abordan ECO no uniformes que siguen técnicas de lógica difusa y que involucran enfoques cardinales (véanse Herrera *et al.*, 2008; Herrera-Viedma y López-Herrera, 2007, entre otros). Otros autores abordan ECO no uniformes mediante rangos ordinales, evitando medidas cardinales u ordinales de las proximidades entre términos lingüísticos (Franceschini *et al.*, 2004).

---

1. La pregunta HSI40 de la encuesta de estadísticas de la Unión Europea sobre la renta y las condiciones de vida (EU-SILC) realizada por Eurostat utiliza la ECO de 3 términos {«una carga pesada», «una carga algo pesada», «una carga nada pesada»} para preguntar a las personas sobre la carga financiera del coste total de la vivienda. En esta escala de calificación de 3 términos, el término central no es neutro, por lo que no está claro que la escala sea uniforme.

Para tratar las ECO no uniformes de una manera puramente ordinal a través de proximidades psicológicas entre los términos lingüísticos de las ECO, García-Lapresta y Pérez-Román (2015) introducen la noción de *medida de proximidad ordinal* (MPO), con el fin de capturar cómo los individuos perciben las proximidades entre los términos lingüísticos de una ECO, a través de grados ordinales (no numéricos) de proximidad. Los autores también proporcionan algunas aplicaciones para el análisis de consenso y el clustering en el contexto de ECO no uniformes.

## 1. MEDIDAS DE PROXIMIDAD ORDINAL

El concepto de MPO permite abordar las limitaciones de las ECO uniformes. Su enfoque se centra en capturar las percepciones subjetivas de proximidad ordinal entre los términos lingüísticos de una ECO. A diferencia de los enfoques cardinales, las MPO operan dentro de un enfoque puramente ordinal. Este marco permite la comparación de las distancias relativas entre términos sin suponer intervalos iguales entre ellos. Este enfoque ha sido ampliamente adoptado en contextos donde las escalas numéricas tradicionales no logran reflejar fielmente los juicios matizados de los individuos.

Una MPO asigna un grado de proximidad ordinal a cada par de términos lingüísticos de la ECO considerada. Para garantizar su fiabilidad y consistencia se exigen 4 condiciones:

- Exhaustividad: todos los grados de proximidad deben utilizarse al menos una vez.
- Simetría: el grado de proximidad ordinal entre dos términos no depende del orden en el que se comparen.
- Máxima proximidad: el mayor grado de proximidad solo se consigue cuando se compara un término consigo mismo.
- Monotonía: si 3 términos lingüísticos están dispuestos en orden de peor a mejor, el grado de proximidad entre el primero y el segundo debe ser mayor que el grado de proximidad entre el primero y el tercero, y, análogamente, el grado de proximidad entre el segundo y el tercero debe ser mayor que el grado de proximidad entre el primer y el tercero.

Por ejemplo, si en la ECO («mal», «regular», «excelente») se percibe que «regular» está más cerca de «mal» que de «excelente», la MPO asignará primer grado de proximidad al existente entre cada uno de los 3 términos consigo mismo, segundo grado de proximidad al que hay entre «regular» y «mal», tercer grado de proximidad al

que hay entre «regular» y «excelente», y cuarto grado de proximidad al que hay entre «mal» y «excelente».

Posteriormente, García-Lapresta *et al.* (2018) introducen la noción de MPO metrizable<sup>2</sup> y proporcionan un método para generar MPO metrizable a través de secuencias de preguntas adecuadas para el caso de ECO con 4 términos lingüísticos. También introducen un procedimiento de agregación de MPO metrizable basado en métricas ponderadas.

### 1.1. Generación de medidas de proximidad ordinal

La construcción de MPO metrizable es un proceso complejo que puede variar en función del número de términos de la ECO. En las ECO de 3 términos solo existen 3 MPO y todas ellas son metrizable (García-Lapresta *et al.*, 2018). En este caso, respondiendo a una única pregunta sobre la apreciación de proximidad, es posible obtener la MPO correspondiente. Para ECO con 4 términos lingüísticos García-Lapresta *et al.* (2018) desarrollan algoritmos que generan una de las 25 MPO metrizable posibles mediante secuencias adecuadas de 2 a 4 preguntas<sup>3</sup>.

Sin embargo, a medida que aumenta el número de términos lingüísticos, también aumenta la complejidad de cara a la construcción de la MPO. En las ECO de más de 4 términos, para evitar inconsistencias de los agentes, nuevamente se podrían dirigir a los agentes algunas secuencias de preguntas apropiadas sobre las proximidades entre los términos lingüísticos para obtener las MPO metrizable correspondientes. Con 5 términos lingüísticos se necesitarían entre 4 y 10 preguntas para obtener una de las 473 MPO metrizable. Es fácil imaginar que esa cantidad de preguntas interdependientes puede producir agotamiento mental en los agentes.

Claramente, para escalas de más de 5 términos lingüísticos es prácticamente imposible seguir el mismo patrón para obtener las correspondientes MPO metrizable (por ejemplo, para ECO con 6 términos lingüísticos existen 18.262 MPO metrizable). En consecuencia, se necesita un procedimiento diferente cuando las escalas tienen más de 4 términos lingüísticos.

---

2. Aquellas que operan como si el individuo estableciera las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de la ECO a través de las comparaciones de las distancias numéricas entre los términos.

3. Las preguntas están diseñadas de tal manera que evitan a los agentes incurrir en inconsistencias.

Teniendo en cuenta que una métrica lineal sobre una ECO se determina unívocamente a partir de las distancias entre términos lingüísticos consecutivos de una ECO, si un agente pudiera proporcionar esas distancias, entonces sería posible generar la única MPO metrizable compatible con dichas distancias. Es importante destacar que los valores numéricos exactos de las distancias no son relevantes, sino las relaciones de igualdad y desigualdad entre dichas distancias.

García-Lapresta y Pérez-Román (2020) proponen un método visual para generar MPO, el cual ha sido desarrollado e implementado por García-Lapresta *et al.* (2025) mediante la utilización de deslizadores. Estas técnicas permiten a los encuestados indicar visualmente, de forma intuitiva, las distancias percibidas entre los términos.

## 1.2. Agregación de las percepciones de los expertos

Dado que las percepciones sobre las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de una ECO son subjetivas, es posible que coexistan diferentes percepciones en un grupo de agentes. García-Lapresta *et al.* (2018) proponen un procedimiento de agregación de MPO metrizable de forma que, a partir de las percepciones individuales de los agentes sobre las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de una ECO, se genera una MPO metrizable colectiva que sintetiza dichas percepciones, minimizando las desviaciones respecto de las percepciones individuales. Dicho procedimiento se lleva a cabo mediante distancias ponderadas entre MPO metrizable.

## 2. TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Los problemas de toma de decisiones son muy comunes en la investigación operativa, las ciencias de la gestión, la economía y la ingeniería (análisis de control de calidad, estudios de mercado, análisis sensorial, etc.). Una parte significativa de los problemas abordados en la toma de decisiones pueden considerarse problemas de toma de decisiones multicriterio, donde un grupo de expertos evalúa alternativas respecto a múltiples criterios con el fin de obtener la mejor alternativa o una clasificación de estas (Greco *et al.*, 2016; Yan *et al.*, 2017).

En ocasiones, las ECO utilizadas en problemas de toma de decisiones son escalas tipo Likert (Likert, 1932). Estas se caracterizan por tener categorías de respuesta ordenadas de peor a mejor, un número equilibrado de opciones positivas y negativas y un valor numérico asignado a cada categoría. Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, la asignación de valores numéricos puede generar resultados distintos cuando se agregan evaluaciones individuales utilizando diferentes codificaciones de la misma ECO.

## 2.1. Toma de decisiones multicriterio mediante MPO

El concepto de MPO metrizable ha sido implementado en procedimientos de toma de decisiones donde las alternativas siempre se evalúan a través de la misma ECO. García-Lapresta y Pérez-Román (2018) introducen un sistema de votación que jerarquiza las alternativas teniendo en cuenta las medianas de los grados de proximidad ordinal entre las valoraciones individuales obtenidas y el término lingüístico más alto de la escala.

García-Lapresta y González del Pozo (2019) presentan un procedimiento de toma de decisiones multicriterio ordinal bajo incertidumbre, extendiendo el procedimiento anterior a un entorno multicriterio, en el que se permite a los agentes en caso de duda asignar dos términos consecutivos de la ECO a cada alternativa.

González del Pozo *et al.* (2020) proponen un procedimiento de toma de decisiones multicriterio en el que los agentes evalúan un conjunto de alternativas respecto de distintos criterios a través de una ECO para cada criterio. Estas ECO pueden ser no uniformes, distintas para cada criterio e incluso pueden tener un número distinto de términos lingüísticos en diferentes criterios. El procedimiento genera un ranking en el conjunto de alternativas basado en un principio intuitivo de compensación entre ventajas y desventajas de cada alternativa en comparación con sus oponentes, evitando asignar codificaciones numéricas arbitrarias a los términos lingüísticos de las escalas.

García-Lapresta *et al.* (2021) han diseñado un nuevo procedimiento multicriterio, puramente ordinal, para el desarrollo de nuevos productos a partir de encuestas<sup>4</sup>. Dicho trabajo comparte con

---

4. Este procedimiento puede aplicarse a otros escenarios de toma de decisiones multicriterio en donde los agentes evalúen las alternativas atendiendo a diferentes criterios mediante diversas ECO equipadas de MPO metrizable.

González del Pozo *et al.* (2020) el mismo marco, pero ahora se evita cualquier tipo de cardinalización (en ningún momento se utilizan números). Los panelistas evalúan varios tipos de productos en función de diferentes criterios, cada uno de ellos a través de una ECO específica. Estas ECO están equipadas con MPO metrizable que recogen las percepciones sobre las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de las ECO consideradas.

Dado que los criterios implicados en los procesos de toma de decisiones multicriterio pueden tener diferente importancia, y teniendo en cuenta que las valoraciones lingüísticas dadas por los agentes no se pueden multiplicar por números, el procedimiento repite las valoraciones lingüísticas obtenidas por cada alternativa en cada criterio tantas veces como sea necesario de forma que dichas repeticiones reflejen las proporciones entre los pesos<sup>5</sup> (véanse Balinski y Laraki, 2011; García-Lapresta y González del Pozo, 2019; García-Lapresta y Pérez-Román, 2018). A continuación, se calcula el grado de proximidad ordinal entre cada valoración lingüística y el término lingüístico más alto posible en la ECO correspondiente.

Dado que las ECO utilizadas en los diferentes criterios pueden no compartir los términos lingüísticos, tener diferente número de ellos y las OPM correspondientes constar de distinto número de grados de proximidad ordinal, resulta imprescindible disponer de un proceso de normalización. El procedimiento de toma de decisiones multicriterio diseñado por García-Lapresta *et al.* (2021) dirige el proceso de normalización a los conjuntos de grados de proximidad ordinal de las diferentes OPM metrizable.

## 2.2. Procedimiento de normalización

El procedimiento de normalización se centra en los conjuntos de grados de proximidad ordinal (en las ECO correspondientes a los criterios resulta imposible si los términos lingüísticos son distintos, y tampoco en las MPO asociadas a las ECO). Los grados de proximidad ordinal se normalizan siguiendo un proceso de homogeneización, de forma que cada conjunto de grados de proximidad ordinal de cada MPO se representa en un conjunto de grados de proximidad

---

5. Por ejemplo, si hubiera dos criterios, el primero tuviera una ponderación del 70% y el segundo del 30%, se repetirían 7 veces las valoraciones de los panelistas sobre cada alternativa respecto del primer criterio y 3 veces las correspondientes al segundo criterio.

ordinal global en el que se encajan todos ellos. A continuación, las alternativas se ordenan a partir de las medianas de los grados de proximidad ordinal normalizados entre las valoraciones individuales y el término más alto de la ECO correspondiente, teniendo en cuenta un orden lineal adecuado en el conjunto de medianas factibles. El procedimiento finaliza con un método secuencial de desempate que proporciona el *ranking* final en el conjunto de alternativas.

Con objeto de explicar el procedimiento de normalización, se considera a continuación un caso sencillo<sup>6</sup>. Supongamos que un grupo de expertos tiene que evaluar un conjunto de alternativas teniendo en cuenta 3 criterios. Cada criterio es valorado mediante su propia ECO, la cual está equipada de una MPO metrizable que describe la percepción de las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de la ECO correspondiente. Por ejemplo, consideremos que las ECO con las que se evalúan los criterios tienen asociadas MPO metrizable que cuentan con 4, 5 y 7 grados de proximidad ordinales, respectivamente.

En este ejemplo el conjunto de grados de proximidad ordinal global tendrá 13 grados, de forma que en el primer conjunto los grados 1, 2, 3 y 4 pasarán a ser 1, 5, 9 y 13; en el segundo, los grados 1, 2, 3, 4 y 5 pasarán a ser 1, 4, 7, 10 y 13, y en el tercero, los grados 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 pasarán a ser 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13. Obsérvese que en el conjunto de grados de proximidad ordinal global, en los 3 casos, el primer grado de proximidad ordinal original sigue siendo el primero y el último de cada OPM ahora es el decimotercero. Merece la pena destacar que los grados de proximidad normalizados de cada OPM siempre están en progresión aritmética (en el ejemplo, con diferencias 4, 3 y 2, respectivamente).

### 3. UNA APLICACIÓN AL MARKETING

A continuación, se presenta un caso de estudio (García-Lapresta *et al.*, 2021) basado en la tercera mayor exportadora internacional de España en el sector de alimentación y bebidas FMCG (*Fast Moving Consumer Goods*), muy reconocida en la industria a nivel mundial. La compañía cuenta con una unidad científico-técnica dedicada a Investigación y Desarrollo (I+D), compuesta por más de 150 investigadores y tecnólogos. Su propósito consiste en analizar, anticipar y

---

6. El desarrollo completo para un caso general puede verse en García-Lapresta *et al.* (2021, Subsect. 3.3).

predecir las necesidades intrínsecas del consumidor utilizando las tecnologías más avanzadas para desarrollar nuevas bebidas innovadoras, saludables y nutritivas. En su camino de crecimiento, la compañía se ha centrado en el seguimiento del desempeño de nuevos productos en los mercados internacionales. Se ha planteado como reto en este campo conseguir mejorar el conocimiento de la experiencia del consumidor en diferentes contextos, teniendo en cuenta la falta de información previa sobre el desempeño del mercado inherente a los nuevos productos en las diferentes etapas de lo que se denomina «viaje del cliente»<sup>7</sup>.

Hoy en día es muy difícil tener éxito en el desarrollo de nuevos productos. Según Buffoni *et al.* (2017), el 50% de los nuevos productos en el mercado no alcanzan sus objetivos, pero cualquier empresa que busque impulsar el crecimiento de los ingresos necesita desarrollar nuevos productos. Más del 25% de los ingresos y ganancias totales en todas las industrias proviene del desarrollo de nuevos productos.

Por estos motivos el empleo del desarrollo de *indicadores clave de desempeño* (KPI) validados en el mercado, junto a un análisis riguroso y discriminatorio de los resultados, son clave para la toma de decisiones de la empresa. En concreto, la empresa tiene que tomar una decisión sobre qué tipo de nuevo producto se introduce en diferentes mercados a nivel mundial.

En el caso de estudio, la empresa consideró 4 productos: zumos con vitaminas agregadas, zumos 100% naturales (sin agregados), zumos orgánicos y zumos con probióticos. Para tomar la decisión sobre cuál de los 4 tipos de zumos ha de introducirse, se elaboró un cuestionario en el que se incluyeron preguntas sobre 4 factores relevantes de la compra del producto: intención de compra, atractivo del producto, singularidad y valor del precio percibido.

Las respuestas sobre estas 4 variables se refirieron a 4 categorías cualitativas, dos negativas y dos positivas. Posteriormente se recopilieron los datos a través de Cint, la plataforma de intercambio de muestras más grande del mundo, permitiendo una recopilación de datos eficiente al conectar de manera fluida y rápida a los compradores de muestras con los propietarios de paneles en todo el mundo<sup>8</sup>.

---

7. Conjunto de experiencias que una persona, y después cliente, tiene con una empresa en un periodo de tiempo, que puede ser corto o largo, dependiendo del producto o servicio en cuestión.

8. El panel está compuesto por más de 100 millones de usuarios registrados en más de 150 países.

Una vez realizado el análisis de frecuencias de los datos, la decisión de introducir un nuevo producto, dentro de uno de los 4 tipos de zumos, se realizó a través de dos procedimientos distintos. Por un lado, se consideró el que habitualmente utiliza la empresa: en función de las *top 2 tier responses* (frecuencias observadas para las dos respuestas situadas en el extremo positivo de la ECO)<sup>9</sup>. Por otro lado, se aplicó el nuevo procedimiento basado en MPO (García-Lapresta *et al.*, 2021). Además, la empresa tuvo en cuenta otras variables, como el nicho de mercado al que va dirigido el producto, el poder adquisitivo de los consumidores, la cultura del país en cuanto a hábitos saludables, el estilo de vida, etc.

El método de investigación elegido fue una encuesta por cuestionario, lo cual permitió recopilar muchas respuestas en un corto periodo de tiempo, entre junio y agosto de 2020, utilizando un formato cerrado. Los datos fueron recopilados por la empresa utilizando el panel de consumidores Cint en 3 países: Alemania, España y Reino Unido, y fueron representativas a nivel nacional. Los panelistas evaluaron los conceptos del producto que se les presentaron y se utilizaron procedimientos de control de calidad para asegurar la captura correcta de datos del panel y la continuidad del panel.

Se evaluaron los 4 tipos de zumos incluidos en la [tabla 13.1](#) en relación con los 4 criterios que se muestran en la [tabla 13.2](#) por 2028 panelistas (825 en Alemania, 800 en España y 403 en el Reino Unido). A cada criterio se le asoció una ECO específica formada por 4 términos lingüísticos (véanse las Tablas [13.6-9](#)).

Dado que los 4 criterios incluidos en la [tabla 13.2](#) pueden tener diferente importancia, se realizó una encuesta a 26 directivos de empresas, los cuales evaluaron la importancia de estos criterios a través de una escala numérica {1, 2, 3, 4, 5}, de menor a mayor importancia. Las valoraciones obtenidas por cada criterio se muestran en la [tabla 13.3](#), junto con las medias y medianas correspondientes.

---

9. Se suman los números de valoraciones en las dos categorías de respuesta más altas, sin tener en cuenta el resto ni la proximidad entre los términos de la ECO.

Tabla 13.1. Alternativas

$x_1$	zumos con vitaminas agregadas
$x_2$	zumos 100% naturales (sin añadidos)
$x_3$	zumos orgánicos
$x_4$	zumos con probióticos

Tabla 13.2. Criterios

$c_1$	intención de compra
$c_2$	singularidad
$c_3$	valor del precio percibido
$c_4$	atractivo del producto

Tabla 13.3. Determinación de la importancia de los criterios

Criterios	1	2	3	4	5	Media	Mediana
$c_1$	0	0	1	2	23	4,846	5
$c_2$	1	2	6	10	7	3,769	4
$c_3$	1	1	5	11	8	3,923	4
$c_4$	0	5	4	10	7	3,730	4

Teniendo en cuenta los resultados de la [tabla 13.3](#), a cada criterio se le asignó un peso, redondeando los pesos medios y medianos correspondientes (véase la [tabla 13.4](#))<sup>10</sup>. De acuerdo con esos pesos, las opiniones de los panelistas sobre las alternativas respecto a los criterios  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  y  $c_4$  se repitieron 30, 23, 24 y 23 veces, respectivamente.

10. Por ejemplo, el peso medio del criterio  $c_1$  es  $4,846 / (4,846 + 3,769 + 3,933 + 3,730) = 0,297$ . A su vez, el peso mediano del criterio  $c_1$  es  $5 / (5 + 4 + 4 + 4) = 0,294$ .

Las preguntas dirigidas a los panelistas se incluyen en la [tabla 13.5](#). A las ECO incluidas en las Tablas 13.6-9 para la evaluación de las alternativas (véase la [tabla 13.1](#)) respecto de los 4 criterios (véase la [tabla 13.2](#)) se les asociaron combinaciones de dos MPO distintas para comparar los resultados:  $A_{232}$  y  $A_{233}$  (véase García-Lapresta *et al.*, 2021, Sect. 4.1).

Tabla 13.4. Asignación de pesos a cada criterio

Criterios	Media	Mediana	Redondeo
$c_1$	$w_1 = 0,297$	$w_1 = 0,294$	$w_1 = 0,30$
$c_2$	$w_2 = 0,231$	$w_2 = 0,235$	$w_2 = 0,23$
$c_3$	$w_3 = 0,241$	$w_3 = 0,235$	$w_3 = 0,24$
$c_4$	$w_4 = 0,229$	$w_4 = 0,235$	$w_4 = 0,23$

Tabla 13.5. Preguntas utilizadas en la encuesta

$c_1$	Suponiendo que este producto estuviera disponible a un precio que usted considera satisfactorio, ¿qué probabilidad habría de que lo comprara para usted o su familia?
$c_2$	¿Cuál de estas frases describe mejor cuán nuevo y diferente cree usted que es este producto en comparación con otros productos de zumo disponibles?
$c_3$	De lo que ha visto, ¿qué precio esperaría que tuviera este producto en comparación con otros productos de zumo que están disponibles actualmente?
$c_4$	¿Cómo de atractivos son estos productos para usted o su familia?

Tabla 13.6. Términos lingüísticos utilizados para evaluar la intención de compra (criterio  $c_1$ )

$l_1$	definitivamente no lo compraría
$l_2$	probablemente no lo compraría
$l_3$	probablemente lo compraría
$l_4$	definitivamente lo compraría

Tabla 13.7. Términos lingüísticos utilizados para evaluar la singularidad del producto (criterio  $c_2$ )

$I_1^2$	nada nuevo ni diferente
$I_2^2$	algo novedoso y diferente
$I_3^2$	novedoso y diferente
$I_4^2$	muy novedoso y diferente

Tabla 13.8. Términos lingüísticos utilizados para evaluar la percepción del precio (criterio  $c_3$ )

$I_1^3$	precio mucho menor
$I_2^3$	precio algo menor
$I_3^3$	precio mucho mayor
$I_4^3$	precio mucho mayor

Tabla 13.9. Términos lingüísticos utilizados para evaluar lo atractivo del producto (criterio  $c_4$ )

$I_1^4$	me desagrada muchísimo
$I_2^4$	me desagrada moderadamente
$I_3^4$	me gusta moderadamente
$I_4^4$	me gusta muchísimo

#### 4. RESULTADOS

La [tabla 13.10](#) incluye los *rankings* sobre el conjunto de alternativas en cada país cuando se consideran las MPO de las 4 primeras columnas asociadas a las ECO de las [tablas 13.6-9](#).

En el primer caso, todas las ECO fueron equipadas con la MPO  $A_{232}$ , resultando ganadora la alternativa  $x_2$ . En el segundo caso, la cuarta ECO de la [tabla 13.10](#) fue equipada con la MPO  $A_{233}$ . El *ranking* es diferente al caso anterior, pero  $x_2$  sigue siendo la alternativa ganadora. En el tercer caso, la primera ECO de la [tabla 13.10](#) fue equipada

con la MPO  $A_{233}$ . Nuevamente, el ranking es diferente del de los casos anteriores, pero, de nuevo,  $x_2$  sigue siendo la alternativa ganadora. En el cuarto caso, las segunda y cuarta ECO de la [tabla 13.10](#) fueron equipadas con la MPO  $A_{233}$  obteniéndose un *ranking* totalmente diferente al de los casos anteriores. Obsérvese que Alemania y España han obtenido el mismo ranking en cada uno de los casos, siempre distinto del de el Reino Unido.

Tabla 13.10: Resultados

	ECO <sup>1</sup>	ECO <sup>2</sup>	ECO <sup>3</sup>	ECO <sup>4</sup>	Alemania	España	Reino Unido
Caso 1	$A_{232}$	$A_{232}$	$A_{232}$	$A_{232}$	$x_2$ $x_3$ $x_4$ $x_1$	$x_2$ $x_3$ $x_4$ $x_1$	$x_2$ $x_4$ $x_1$ $x_3$
Caso 2	$A_{232}$	$A_{232}$	$A_{232}$	$A_{233}$	$x_2$ $x_3$ $x_1$ $x_4$	$x_2$ $x_3$ $x_1$ $x_4$	$x_2$ $x_1$ $x_3$ $x_4$
Caso 3	$A_{233}$	$A_{232}$	$A_{232}$	$A_{232}$	$x_2$ $x_3$ $x_4$ $x_1$	$x_2$ $x_3$ $x_4$ $x_1$	$x_2$ $x_4$ $x_3$ $x_1$
Caso 4	$A_{232}$	$A_{233}$	$A_{232}$	$A_{233}$	$x_3$ $x_1$ $x_2$ $x_4$	$x_3$ $x_1$ $x_2$ $x_4$	$x_1$ $x_3$ $x_2$ $x_4$

Los resultados obtenidos utilizando el procedimiento habitual de la empresa, *top 2 tier responses*, coinciden con el del primer caso de la [tabla 13.10](#) para Alemania y España, pero es distinto para el Reino Unido:  $x_4, x_1, x_2, x_3$  en los 4 casos de la [tabla 13.10](#).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito un procedimiento multicriterio para guiar el proceso de toma de decisiones en el desarrollo de nuevos productos. Se ha considerado que los criterios bajo los cuales los agentes evalúan las alternativas tienen ECO específicas y también que las proximidades ordinales entre sus términos lingüísticos pueden ser diferentes. Además, se ha proporcionado un procedimiento

de normalización para combinar evaluaciones provenientes de varias ECO, lo que ha permitido llevar a cabo todo el proceso de forma puramente ordinal, sin utilizar números en ningún momento. Esta es una de las contribuciones más novedosas del trabajo.

Como la importancia de los criterios puede ser diferente, un grupo de directivos de empresas valoró los criterios en función de la importancia que percibían respecto al caso de estudio. Teniendo en cuenta la información proporcionada por los directivos, se asoció un peso normalizado a cada criterio dentro del intervalo unidad. Posteriormente, se consideró un procedimiento que genera el número de repeticiones de las evaluaciones de los agentes, en cada uno de los criterios, que son necesarias para reflejar los pesos normalizados de los criterios.

El nuevo procedimiento multicriterio se aplicó a un caso real llevado a cabo por el tercer mayor exportador internacional español en el sector de alimentación y bebidas. La compañía recurrió a la realización de un estudio de mercado para conocer las preferencias de los consumidores alemanes, españoles y británicos sobre 4 categorías de zumos: zumos con vitaminas añadidas, zumos 100% naturales (sin nada añadido), zumos ecológicos y zumos con probióticos. Con los resultados obtenidos, la compañía buscaba orientar mejor la introducción de su nuevo zumo en estos países.

Teniendo en cuenta el objetivo de la empresa, que implica establecer un ranking de las distintas categorías de zumos, puede concluirse que existen diferencias significativas entre el procedimiento de decisión multicriterio presentado en este trabajo y el utilizado habitualmente por la empresa (*top 2 tier responses*). Este último procedimiento, basado en una estadística muy básica, establece un *ranking* sobre el conjunto de alternativas a partir de las respuestas de los consumidores, pero no considera información valiosa que nuestro procedimiento sí integra.

Merece la pena destacar que mediante nuestro procedimiento se pueden alcanzar diferentes rankings sobre el conjunto de alternativas, en función de las MPO que se asocien a las ECO para tener en cuenta las percepciones sobre las proximidades ordinales entre los términos lingüísticos de las diferentes ECO. Ello conduce a soluciones más refinadas y versátiles que el procedimiento de *top 2 tier responses*.

En el caso de que existan diferentes percepciones sobre una ECO, estas se pueden agregar para obtener una MPO que represente esas percepciones de manera global, lo cual se puede llevar

a cabo siguiendo el mecanismo proporcionado por García-Lapresta *et al.* (2018, Sect. 4).

Si bien en este trabajo se ha supuesto que las opiniones de los expertos tienen la misma importancia, es posible extender el procedimiento a un escenario en el que un decisor asigne diferente importancia a los expertos, según su conocimiento. Franceschini y García-Lapresta (2019) proporcionan 3 paradigmas para abordar ese problema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Averkin, A. N., Kuznetsov, O. P., Kulinich, A. A. y Titova, N. V. (2006): «Decision-making support in weakly structured subject domains: Analysis of situations and evaluation of alternatives», *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 45(3), 469-479.
- Baas, S. M. y Kwakernaak, H. (1977): «Rating and ranking of multiple-aspect alternatives using fuzzy sets», *Automatica*, 13(1), 47-58.
- Balinski, M. y Laraki, R. (2011): *Majority judgment: Measuring, ranking, and electing*. MIT Press.
- Balinski, M. y Laraki, R. (2013): «How best to rank wines: Majority judgment. En E. Giraud-Héraud y M. C. Pichery (eds.)», *Wine Economics*. Palgrave Macmillan UK, 149-172.
- Beyth-Marom, R. (1982): «How probable is probable? A numerical translation of verbal probability expressions», *Journal of Forecasting*, 1(3), 257-269.
- Brown, G., Copeland, T. y Millward, M. (1973): «Monadic testing of new products-old problem and some partial solutions», *Journal of the Market Research Society*, 15(2) 112-131.
- Buffoni, A., de Angelis, A., Grüntges, V. y Krieg, A. (2017): *How to make sure your next product or service launch drives growth*. McKinsey & Company <https://mck.co/33ZwYJK>.
- Chen, S. J. y Hwang, C. L. (1992): *Fuzzy multiple attribute decision making. Methods and applications*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 375. Berlín: Springer-Verlag.
- Franceschini, F., Galetto, M. y Varetto, M. (2004): «Qualitative ordinal scales: The concept of ordinal range», *Quality Engineering*, 16(4), 515-524.
- Franceschini, F. y García-Lapresta, J. L. (2019): «Decision-making in semi-democratic contexts», *Information Fusion*, 52, 281-289.
- Franceschini, F. y Romano, D. (1999): «Control chart for linguistic variables: A method based on the use of linguistic quantifiers», *International Journal of Production Research*, 37(16), 3791-3801.

- García-Lapresta, J. L. y González del Pozo, R. (2019): «An ordinal multi-criteria decision-making procedure under imprecise linguistic assessments», *European Journal of Operational Research*, 279(1), 159-167.
- García-Lapresta, J. L., González del Pozo, R. y Pérez-Román, D. (2018): «Metri- zable ordinal proximity measures and their aggregation», *Information Sciences*, 448-449, 149-163.
- García-Lapresta, J. L., Iurev, R. y Pérez-Román, D. (2025): «Managing percep- tions on the linguistic terms of qualitative scales», *Expert Systems with Applications*, 261, 125501.
- García-Lapresta, J. L., Moreno-Albadalejo, P., Pérez-Román, D. y Temprano- García, V. (2021): «A multi-criteria procedure in new product development using different qualitative scales», *Applied Soft Computing*, 106, 107279.
- García-Lapresta, J. L. y Pérez-Román, D. (2015): «Ordinal proximity measures in the context of unbalanced qualitative scales and some applications to consensus and clustering», *Applied Soft Computing*, 35, 864-872.
- García-Lapresta, J. L. y Pérez-Román, D. (2018): «Aggregating opinions in non- uniform ordered qualitative scales», *Applied Soft Computing*, 67, 652-657.
- García-Lapresta, J. L. y Pérez-Román, D. (2020): «Eliciting proximities between terms of ordered qualitative scales», *2020 IEEE 10th International Confe- rence on Intelligent Systems (IS)*, 294-298. Sofia.
- González del Pozo, R., Dias, L. C. y García-Lapresta, J. L. (2020): «Using diffe- rent qualitative scales in a multi-criteria decision-making procedure», *Mathematics*, 8(3), 458.
- Greco, S., Ehrgott, M. y Figueira, J. R. (eds). (2016): *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. International Series in Operations Re- search & Management Science 233. Nueva York: Springer.
- Greenleaf, E. A. (1992): «Improving rating scale measures by detecting and co- rrecting bias components in some response styles», *Journal of Marketing Research*, 29(2), 176-188.
- Herrera, F., Herrera-Viedma, E. y Martínez, L. (2008): «A fuzzy linguistic methodology to deal with unbalanced linguistic term sets», *IEEE Tran- sactions on Fuzzy Systems*, 16(2), 354-370.
- Herrera-Viedma, E. y López-Herrera, A. G. (2007): «A model of an information retrieval system with unbalanced fuzzy linguistic information», *Interna- tional Journal of Intelligent Systems*, 22(11), 1197-1214.
- Lietz, P. (2010): «Research into questionnaire design: A summary of the litera- ture», *International Journal of Market Research*, 52(2), 249-272.
- Likert, R. (1932): «A technique for the measurement of attitudes», *Archives of Psychology*, 2(140), 1-55.
- Myers, J. H. y Warner, G. W. (1968): «Semantic properties of selected evaluation adjectives», *Journal of Marketing Research*, 5(4), 409-412.
- Roberts, F. S. (1985): *Measurement Theory*. Cambridge: Cambridge Univer- sity Press.

- Teigen, K. H. (1988): «The language of uncertainty», *Acta Psychologica*, 68(1-3), 27-38.
- Wallsten, T. S., Fillenbaum, S. y Cox, J. A. (1986): «Base rate effects on the interpretations of probability and frequency expressions», *Journal of Memory and Language*, 25(5), 571-587.
- Weijters, B., Cabooter, E. y Schillewaert, N. (2010): «The effect of rating scale format on response styles: The number of response categories and response category labels», *International Journal of Research in Marketing*, 27(3), 236-247.
- Yan, H. B., Ma, T. y Huynh, V. N. (2017): «On qualitative multi-attribute group decision making and its consensus measure: A probability based perspective», *Omega*, 70, 94-117.
- Zigmond, A. S. y Snaith, R. P. (1983): «The hospital anxiety and depression scale», *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 67(6), 361-370.



# Indicadores sintéticos basados en técnicas multicriterio: síntesis de las principales aplicaciones

FRANCISCO JAVIER BLANCAS PERAL  
*Universidad Pablo de Olavide*

MACARENA LOZANO-OYOLA  
*Universidad Pablo de Olavide*

IGNACIO CONTRERAS RUBIO  
*Universidad Pablo de Olavide*

## INTRODUCCIÓN

**E**ste capítulo presenta un análisis de las principales aplicaciones en las que se han utilizado metodologías de construcción de indicadores sintéticos a partir de resultados obtenidos con la aplicación de técnicas de decisión multicriterio. Para ello, utilizando las similitudes metodológicas como criterio de agrupamiento, presentamos las principales aportaciones en función de los rasgos comunes del procedimiento de agregación aplicado, destacando sus principales ventajas e inconvenientes, e ilustrando las utilidades prácticas.

Cuando se busca analizar fenómenos sociales como la pobreza, el bienestar social, el desarrollo sostenible o la desigualdad en términos de género, el primer paso consiste en establecer instrumentos

de medición que permitan vincular los conceptos teóricos analizados, abstractos, complejos y multidimensionales a valoraciones empíricas, concretas, más sencillas y observables (Carmines y Zeller, 1979; López-Roldán y Fachelli, 2015).

En general, los conceptos sociales no son directamente observables mediante una única variable, sino que requieren la selección de un conjunto de medidas con las que se aproxima cada concepto. A este proceso se le conoce como *operativización del concepto social* (De Vaus, 2001; Creswell y Creswell, 2017; Babbie, 2020; Robson, 2024) y se ejecuta en una serie de pasos básicos (figura 14.1).



Figura 14.1. Operativización del concepto social. Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, es necesario definir claramente el *constructo* o concepto teórico que se pretende evaluar. Dicho constructo es una abstracción claramente delimitada y estructurada, que no es directamente observable y que permite explicar el fenómeno o realidad social analizada, existiendo un consenso científico acerca de lo que designan, que orienta semánticamente su significado y lo hace relevante (Ander-Egg y Aguilar, 1995; Latorre *et al.*, 2021).

Para alcanzar un nivel de concreción que permita medir cada concepto, se inicia un proceso de desagregación que comienza identificando las *dimensiones* conceptuales, entendidas como conjunto de elementos que permiten evaluar y comprender de manera integral una propiedad latente y relevante del concepto, sin ser observables empíricamente. Así, por ejemplo, para la evaluación del objetivo social del desarrollo sostenible, las dimensiones podrían ser de naturaleza social, económica, ambiental e institucional necesarios para que el proceso de desarrollo sea sostenible en el tiempo. La complejidad del concepto determinará el número de dimensiones que serán necesarias.

Cada dimensión actúa como marco donde se identifican diferentes categorías de análisis, facilitando el estudio de la interrelación de la información, la clasificación de las variables operativas y la identificación de fortalezas y debilidades dentro de cada área, permitiendo usar la información para la formulación de políticas más efectivas (Miller y Salkin, 2002; Crano *et al.*, 2014).

Dentro de cada dimensión se identifican *aspectos* o variables operativas, que son características, propiedades o elementos en los que se identifica la dimensión del fenómeno a la que pertenecen, que pueden ser observadas, que adoptan diferentes valores de una unidad a otra y que pueden medirse mediante una o varias variables observables (Abreu, 2012; Reguant-Álvarez y Martínez-Olmo, 2014). Se asigna a cada uno de ellos una o varias *variables observables* o empíricas, que son valores cuantitativos que en conjunto ofrecen un conocimiento comprehensivo del fenómeno analizado. Se trata, por tanto, de seleccionar las mejores medidas estadísticas que permitan traducir los aspectos y dimensiones al plano empírico.

Para realizar esta operativización de los fenómenos sociales, la investigación social se sostiene en el denominado *enfoque de los indicadores sociales* (Zapf, 1975; Land, 1983; Noll, 1996; Grasso y Canova, 2008). Este enfoque constituye una técnica cuantitativa que trata de dimensionar una realidad social compleja y sintetizarla para explicar su funcionamiento mediante la definición de un sistema de indicadores. Dicho sistema es un conjunto de medidas observables que proporcionan la información necesaria para tener un conocimiento comprehensivo del concepto evaluado. Cada componente del sistema permite evaluar un aspecto parcial del concepto, que puede ser analizado individualmente o en conjunto con el resto del sistema.

Cada elemento del sistema de evaluación se denomina *indicador social*. El término indicador social se utilizó por primera vez en el trabajo de Bauer en 1966 (Bauer, 1966). Desde entonces se han sucedido múltiples definiciones al respecto (ONU, 1975; Campbell *et al.*, 1976; OECD, 1976; García-Durán y Puig, 1980; Márquez, 2008), sin que se haya conseguido una definición consensuada del término que esté ampliamente aceptada por la comunidad internacional. Esta falta de consenso se debe, en parte, al hecho de que la definición de un indicador social viene determinada en gran medida por lo que se pretende estudiar con su utilización. Pese a ello, la mayoría de las definiciones propuestas en la literatura recogen unos elementos comunes (Aznar, 1989; Cobb y Rixford, 1998):

- Es una *medida estadística*, que permite evaluar, en términos cuantitativos, la importancia de los fenómenos comparándolos con otros, utilizando una unidad de medida común.
- *Es una medida de un concepto*, de una dimensión o aspecto generalmente a través de medidas directamente observables.
- *Basado en un análisis teórico previo*. Este rasgo es lo que distingue al indicador social del simple dato estadístico.
- *Integrado en un sistema coherente de medidas*, porque un indicador social no se concibe aisladamente, sino como parte de un sistema de indicadores.
- *Que sirve para describir el estado de la realidad social* que conlleva dos aspectos: el estático (actual o instantáneo) y/o el dinámico (su evolución).

Los paneles de indicadores sociales como instrumentos de medición se han consolidado como herramientas de análisis muy efectivas para la investigación social de tipo empírico por varias razones, entre otras, el ajuste a la desagregación del concepto realizada por el analista para su operativización, su adaptación al nivel territorial del análisis o la posibilidad de realizar análisis en términos estáticos y dinámicos.

De igual manera, los paneles presentan limitaciones (Zarzosa, 1996; Zarzosa *et al.*, 2005) como dificultad en la interpretación simultánea de múltiples valores, la escasez de datos estadísticos para construir los indicadores que componen el sistema o que, debido al carácter desagregado, las modificaciones que produzcan indicadores individuales pueden ser diversas (Pena, 1977).

En muchas ocasiones es deseable alcanzar una medida global que mida conjuntamente el estado del constructo analizado, esto es, agregar la información obteniendo medidas sintéticas para completar el análisis del panel. A estos instrumentos de medición se les denomina *indicadores sintéticos o compuestos*. Estas herramientas de medición cuantitativas se han convertido en los últimos años en uno de los principales instrumentos para evaluar conceptos multidimensionales, complejos y ambiguos (tales como la pobreza, el bienestar social, el desarrollo sostenible o las desigualdades de género). Para la construcción de estas medidas se han empleado en la literatura diversas metodologías entre las que aparecen técnicas de decisión multicriterio.

El resto del capítulo se estructura como sigue. En el siguiente apartado se analiza el proceso de construcción de un indicador sintético. A continuación, realizamos un análisis bibliométrico centrado

en los trabajos que proponen la aplicación de técnicas multicriterio para la definición de indicadores compuestos, caracterizando metodológicamente los procedimientos identificados. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.

## 1. EL INDICADOR SINTÉTICO COMO INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

El indicador sintético o compuesto es una medida que agrega matemáticamente el valor de los indicadores simples que componen un sistema para representar de manera resumida y comprensible una dimensión compleja de una realidad o fenómeno social (Saisana y Tarantola, 2002; Nardo *et al.*, 2005a). Al proporcionar un único valor, se facilita una comparación más efectiva entre diversas unidades territoriales o individuos, resumiendo la información de varios aspectos que son difíciles de abordar individualmente de manera simultánea.

A pesar de las críticas, muchas de ellas fundamentadas en la subjetividad del proceso de construcción de los indicadores sintéticos, han sido muy usados como herramientas en la toma de decisiones de política pública, ya que son instrumentos sencillos y adecuados para realizar análisis comparativos en los procedimientos de planificación. Resultan especialmente útiles para ilustrar y evaluar objetivos sociales complejos. Asimismo, permiten establecer tendencias para realizar procedimientos de control y seguimiento. No obstante, estas medidas solo deben suponer un medio de captar la atención y centrar la discusión al adoptar decisiones en los procesos de planificación. La obtención del indicador sintético nunca debe constituir un fin en sí mismo, sino una herramienta que facilite la decisión.

Desde un punto de vista metodológico, existen múltiples procedimientos de construcción de indicadores sintéticos. No obstante, es posible sistematizar su obtención en un conjunto de pasos básicos comunes (figura 14.2), que implican la adopción de decisiones por parte del analista (Sharpe y Salzman, 2003; Freudenberg, 2003; Nardo *et al.*, 2005b; Saltelli, 2007; Joint Research Centre, 2008; Dialga y Thi Hang Giang, 2017; Fernández y Martos, 2020).

La construcción de un indicador compuesto comienza estableciendo su marco teórico, partiendo de una concepción clara de lo que se desea medir, y con el proceso de operativización que se describe en el anterior apartado y que concluye con un panel o sistema de indicadores.

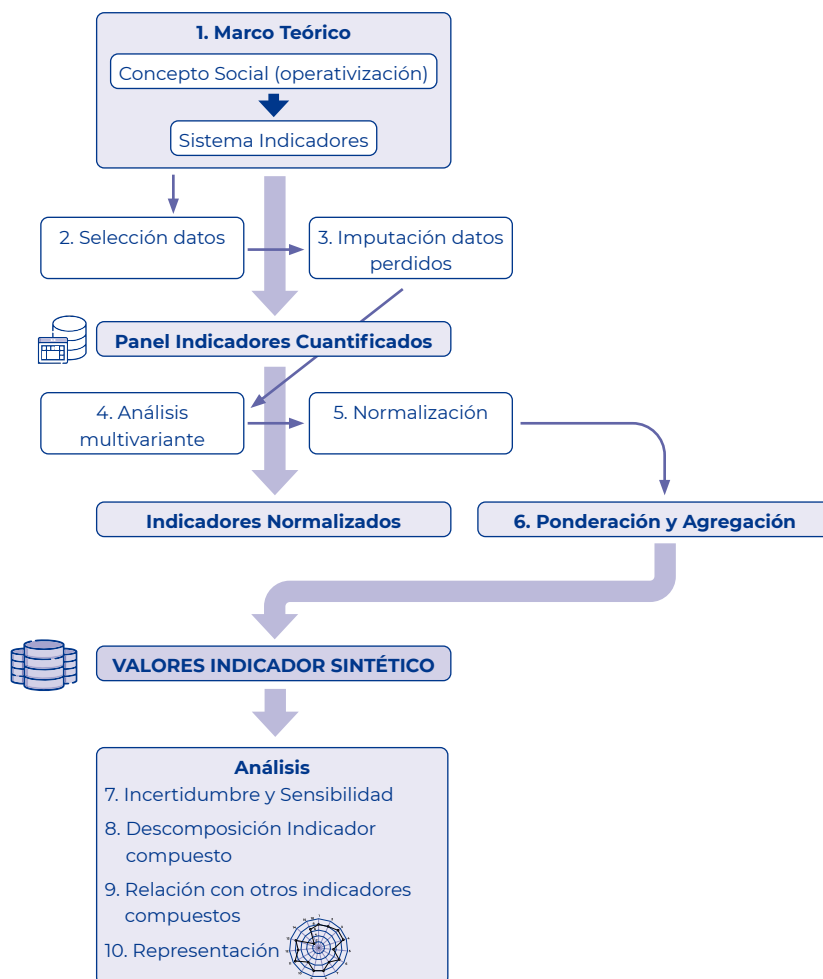


Figura 14.2. Construcción de un indicador sintético: pasos básicos.

Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, se seleccionan las variables de medición más adecuadas para cuantificar cada indicador, ya que las fortalezas y debilidades del indicador final dependen de la calidad de las fuentes de datos (OECD, 2003). La calidad de la información estadística empleada puede garantizarse seleccionando fuentes que cumplan criterios como los de relevancia, precisión, actualidad, accesibilidad, interpretabilidad y coherencia (Nardo *et al.*, 2005a).

Para todos los indicadores del sistema, la información disponible no siempre es completa, existiendo valores perdidos para alguna de las unidades analizadas. En este punto del proceso, es necesario

imputar la información que falta para cuantificar totalmente los indicadores. Tres son las principales estrategias para imputar datos perdidos (Nardo *et al.*, 2005b; Gómez *et al.*, 2006): i) eliminar del análisis las unidades con información incompleta, siempre que las unidades suprimidas no supongan más del 5% del total (Little y Rubin, 2002); ii) realizar una imputación simple usando el valor de unidades similares de la muestra (imputación *Hot-deck*), unidades externas (imputación *Cold-deck*) o valores estimados mediante modelos estadísticos explícitos y iii) considerar procedimientos de imputación múltiple a partir de muestras completas simuladas, utilizando normalmente algoritmos Monte-Carlo basados en Cadenas de Markov (Schafer, 1997).

En un cuarto paso, se analiza la estructura de los datos mediante un análisis estadístico multivariante, agrupando la información por dimensiones o por grupos de unidades (Nardo *et al.*, 2005b).

El primer análisis permite comprobar la consistencia interna de cada dimensión, verificando la correspondencia entre la desagregación conceptual y la estructura de los datos. Por otro lado, el análisis de la información agrupada por unidades permite diagnosticar los posibles impactos de las decisiones adoptadas al construir el indicador sintético (asignación de pesos, procedimiento de agregación, etc.). En este tipo de estudio, la técnica más utilizada es el análisis clúster para definir grupos de unidades en función de su disimilitud en los diferentes indicadores del sistema.

Agregar implica la comparación de los indicadores iniciales que pueden estar expresados en escalas de medición y unidades de medida muy diferentes. Por tanto, antes de ser integrados en una medida global, los indicadores deben ser comparables. Esto se consigue aplicando un procedimiento de normalización que permite expresar sus valores en una escala adimensional común, evitando la influencia de las unidades de medida en el resultado final del proceso de agregación. Existen varios métodos alternativos de normalización (Booyesen, 2002; OECD, 2003; Nardo *et al.*, 2005a, 2005b): jerarquización, estandarización, reescala, categorización o escala de referencia. Cada una de estas técnicas tiene sus pros y sus contras, relacionadas con el nivel de información, la sensibilidad a los valores atípicos o la ponderación implícita (Mazziota y Pareto, 2017). La selección de una técnica de normalización debe guiarse por el marco conceptual, la variabilidad de los indicadores entre las observaciones y el propósito final del ejercicio de medición. La normalización debe permitir, además, unificar la variabilidad de los indicadores iniciales, de forma que

un aumento en el valor del indicador normalizado implique un aumento en el índice compuesto.

Llegados a este punto, es necesario elegir un método para ponderar y agregar la información normalizada. Las ponderaciones son valores que tratan de fijar cuál debe ser la contribución relativa de cada indicador simple al incorporar su información en el valor del indicador sintético. Su asignación siempre implica un juicio de valor (Joint Research Centre, 2008) y puede realizarse, por un lado, mediante la no ponderación y la ponderación equitativa y, por otro, las técnicas de ponderación participativa y estadística.

Lo más frecuente es asignar una ponderación igualitaria (Greco *et al.*, 2019) cuando no hay consenso sobre la distribución de las ponderaciones, falta base teórica o se apela a la simplicidad o a la objetividad. Los métodos participativos (por ejemplo, procesos de asignación presupuestaria, procesos de jerarquía analítica o análisis conjunto) establecen procedimientos técnicos para asignar el valor de las ponderaciones a través de las opiniones consensuadas de un panel de consulta formado por personas expertas, ciudadanas/os o gestores políticos. Finalmente, la ponderación estadística determina los valores de las ponderaciones usando los resultados que se obtienen al aplicar técnicas estadísticas sobre los valores normalizados de los indicadores (tales como el análisis factorial, el análisis de componentes principales o la distancia P2).

La interpretación de las ponderaciones es esencial y puede realizarse en un doble sentido: como la importancia relativa de un indicador o como la compensación (o tasas de sustitución) entre pares de indicadores. La interpretación final depende del carácter compensatorio o no de la técnica de agregación (Munda, 2005). La agregación compensatoria (lineal o multiplicativa) considera que es posible determinar la contribución marginal de cada indicador simple cuya adición da lugar al valor del indicador sintético. Asume así la no existencia de sinergias o conflictos entre los distintos aspectos cuantificados en el sistema. Las ponderaciones muestran, en este caso, los ratios de intercambio entre los indicadores iniciales y deben asignarse para cuantificar las tasas marginales de sustitución entre cada par de indicadores (Decancq y Lugo, 2013). Por ello, asume la posibilidad de que las desventajas presentadas en un grupo de indicadores puedan ser compensadas (total o parcialmente) por una mejor situación en otros.

Se utilizará una agregación no-compensatoria cuando la compensación entre los indicadores no sea coherente conceptualmente, al estar evaluándose aspectos en conflicto por naturaleza

(Podinovskii, 1994; Paruolo *et al.*, 2013). Las técnicas de agregación no compensatoria se definen utilizando un enfoque multicriterio discreto no compensatorio (Joint Research Centre, 2008). Fijadas las ponderaciones, que en este caso representan la importancia relativa de cada iniciador inicial, el proceso de agregación matemática se divide en dos pasos (Munda y Nardo, 2009): la comparación por pares de unidades para todos los indicadores agregados, determinando cuándo una unidad resulta indiferente o preferida a otra incorporando el peso de cada indicador y la obtención de un *ranking* de las unidades utilizando la información de la matriz que recoge las comparaciones del paso anterior.

Como resultado de ello, se obtienen los valores del indicador sintético y se procede al análisis de los valores obtenidos en el que se realiza, en primer lugar, un análisis de incertidumbre y sensibilidad (Tarantola *et al.*, 2000; Saisana *et al.*, 2005) que muestre cómo los valores del indicador sintético se ven influidos por las decisiones realizadas por el analista a lo largo del proceso. Asimismo, se validan los resultados comparando los valores obtenidos para el indicador con los ofrecidos por otros indicadores compuestos que evalúan el mismo constructo. Y, finalmente, se interpretan sus valores realizando una descomposición del valor del indicador compuesto para cada unidad, para relacionar la posición alcanzada por cada unidad en función de las fortalezas y debilidades registradas por la misma en cada indicador simple. La utilización de herramientas gráficas (como los gráficos radiales o las tablas de descomposición) es muy útil en este proceso.

La consideración de técnicas multicriterio en el proceso de construcción de indicadores sintéticos aparece en las fases de ponderación y agregación con una participación diversa dependiendo de qué metodología es la aplicada. Así, encontraremos procesos en los que las técnicas multicriterio permiten determinar el valor final de los indicadores sintéticos partiendo del panel de indicadores (tales son los casos de aplicaciones del análisis envolvente de datos, TOPSIS o PROMETHEE) o procesos en los que esta utilidad se restringe al cálculo del vector de ponderaciones que se utiliza en la agregación de indicadores individuales (AHP o ANP). En el siguiente apartado presentamos una revisión de las principales aplicaciones de técnicas de decisión multicriterio en la construcción de indicadores sintéticos mediante un análisis bibliométrico de las metodologías utilizadas.

## 2 METODOLOGÍAS DE AGREGACIÓN BASADAS EN MÉTODOS MULTICRITERIO: UNA REVISIÓN

La bibliometría permite identificar la producción científica en un campo de conocimiento usando medidas cuantitativas que resumen, clasifican y proporcionan resultados representativos del conjunto de publicaciones científicas analizadas. Para este tipo de análisis se recomienda el uso de bases de datos bibliográficas, tales como *Scopus* o *Web of Science* (WOS), que proporcionan información tanto de los artículos publicados como citados (Pranckutė, 2021; Keenan, 2021). En nuestro estudio utilizamos la base de datos Scopus, ya que incluye más publicaciones que WOS (Thelwall y Sud, 2022) y permite la descarga de información agregada. En 2023, Scopus contaba con más de 90 millones de registros provenientes de 27 950 revistas académicas activas y revisadas por pares (Keenan, 2024).

Para la selección de las publicaciones realizamos una búsqueda en Scopus en octubre de 2024 con los términos de búsqueda «*multicriteria\* composite indicator*» o «*multicriteria\* index*», incluyendo solo los artículos de revistas, ya que la indexación de capítulos de libros y actas de conferencias en Scopus es menos consistente que la de las revistas, sin restricción de periodo. Se descartaron las publicaciones en las que no se proponía un indicador sintético, depurando la búsqueda y clasificándola en función del método multicriterio aplicado. Así, trabajamos con un total de 252 registros agrupados en 6 grupos (tabla 14.1).

Tabla 14.1. Técnicas de decisión multicriterio para la construcción de indicadores compuestos

Técnica	Número de documentos
Data Envelopment Analysis (DEA)	158
UTILIDAD	6
Multi-attribute value theory (MAVT)	5
Multi-attribute utility theory (MAUT)	1
COMPARACION POR PARES	43
Analytic Network Process (ANP)	6
Analytic Hierarchy Process (AHP)	38

Continúa

Técnica	Número de documentos
SUPERACIÓN	15
Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)	3
Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)	13
DISTANCIA	51
Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)	2
Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)	25
Compromise Programming (CP)	2
Goal Programming (GP)	23
PUNTUACIÓN DIRECTA	8
Simple Additive Weighting (SAW)	7
Complex proportional assessment (COPRAS)	1
Total	252

Fuente: elaboración propia

Esta información fue procesada con el software bibliométrico VOS Viewer, que, partiendo de los términos más utilizados en los títulos, resúmenes y palabras clave que aparecen en las publicaciones científicas, crea un mapa en el que se puede ver el peso de cada uno y la relación entre ellos en función de su distancia, que se define por el nivel de coocurrencia de términos (Van Eck y Waltman, 2010). En este trabajo nos hemos centrado en un análisis de coocurrencia de palabras clave, estudiando la aparición simultánea de palabras claves en trabajos de investigación que proponen medidas sintéticas obtenidas usando técnicas de decisión multicriterio. Esto permite identificar las relaciones que existen entre diferentes metodologías, técnicas y materias relacionadas con la producción académica en este campo, así como detectar las técnicas más utilizadas (Ji *et al.*, 2018).

En la práctica, el análisis de coocurrencia permite la creación de mapas de redes conceptuales al mostrar las palabras que se utilizan

de manera simultánea. En ellos, el tamaño de los círculos es proporcional al número de veces que se repite una palabra clave en la literatura analizada, representando las conexiones entre ellos la cercanía entre los elementos. La colocación de los círculos en el mapa y el uso de diferentes colores permite agrupar los elementos (Rosato *et al.*, 2021), siendo los términos que ocupan las posiciones centrales de la red los que mayor relación muestran con el resto, siendo la principal cuestión analizada en la literatura.

Dado que los mapas o redes bibliométricas implican realizar un análisis exploratorio de tipo cualitativo, ya que su interpretación visual es, en cierto grado, intuitiva, completamos el análisis incorporando información cuantitativa básica. En concreto, se analizan: 1) el número de ocurrencias (o número de publicaciones) que incluyen al término en su descripción; 2) la fuerza total de enlace que muestra el número total de coocurrencias que dicho término muestra con el resto de palabras clave analizadas.

A continuación, mostramos los resultados obtenidos en cada análisis de coocurrencia de palabras claves en cada uno de los grupos definidos en función del método multicriterio aplicado. En cada análisis se han obtenido entre 2 y 4 clústeres de palabras clave con alta coocurrencia, lo que muestra, en general, una alta concentración en los temas analizados en las publicaciones incluidas en la muestra.

En el caso de las metodologías que proponen indicadores sintéticos mediante modelos DEA, las palabras clave de mayor ocurrencia y fuerza total del enlace fueron DEA, *composite indicators, sustainability, European countries, decision making y benchmarking*. El mapa bibliométrico (figura 14.3) muestra una alta concentración del tema en la construcción de indicadores para la evaluación de objetivos de sostenibilidad, siendo el principal eje central.

La utilización de los modelos DEA y la incorporación más reciente de evaluaciones de tipo multicriterio han permitido ir configurando indicadores compuestos que buscan la evaluación de cuestiones de tipo ambiental y cuestiones más sociales como el bienestar social, donde la compensación entre indicadores es teóricamente no adecuada. El resto de las publicaciones se han centrado en cuestiones más marginales y que se sitúan más alejadas del eje central para la evaluación de cuestiones económicas concretas asociadas a la toma de decisión de los gestores públicos.

La siguiente red bibliométrica (figura 14.4) muestra el resultado conjunto para las publicaciones que obtienen indicadores compuestos a partir de los métodos de utilidad y comparación por pares, ya que encontramos numerosos términos en común al realizar el

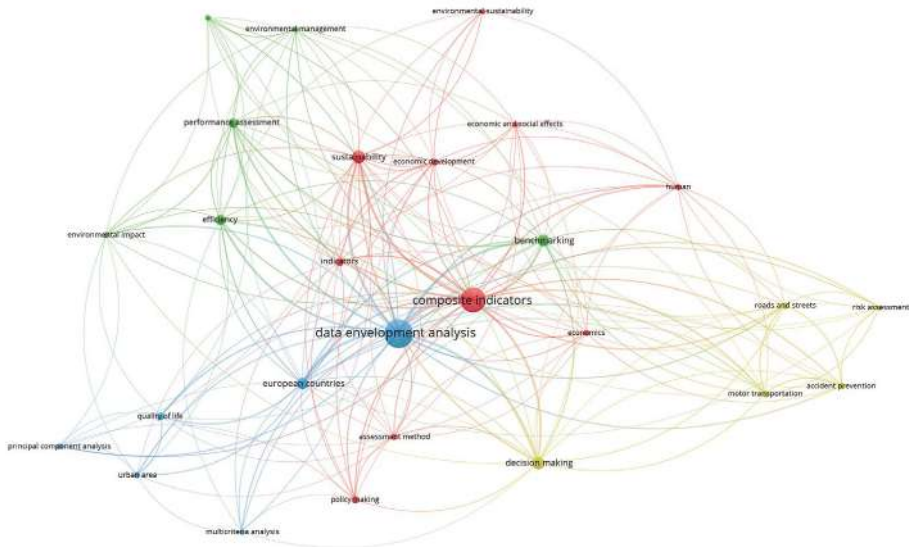


Figura 14.3. Indicadores sintéticos mediante modelos DEA: análisis de coocurrencia palabras clave. Fuente: elaboración propia

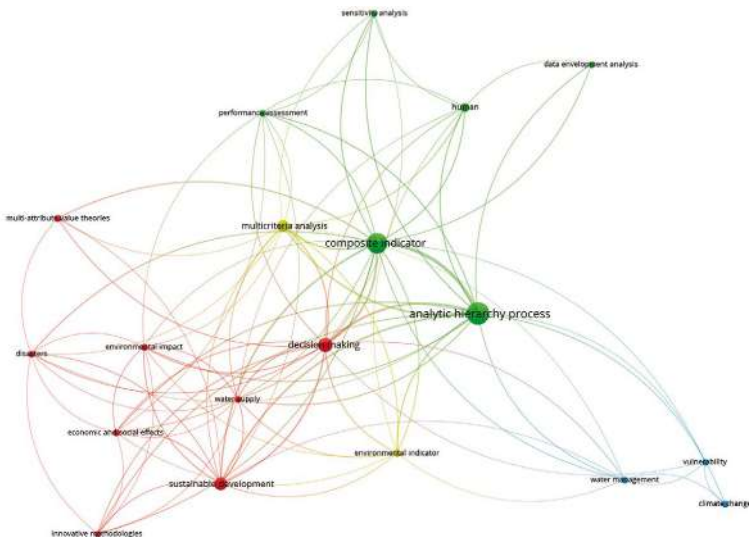


Figura 14.4. Indicadores sintéticos basados en métodos de utilidad y comparación por pares: análisis de coocurrencia de palabras clave Fuente: elaboración propia

análisis individualizado. Observamos claramente que los indicadores sintéticos fundamentalmente están relacionados con la metodología AHP y, en menor medida, con MAUT, para evaluar cuestiones de

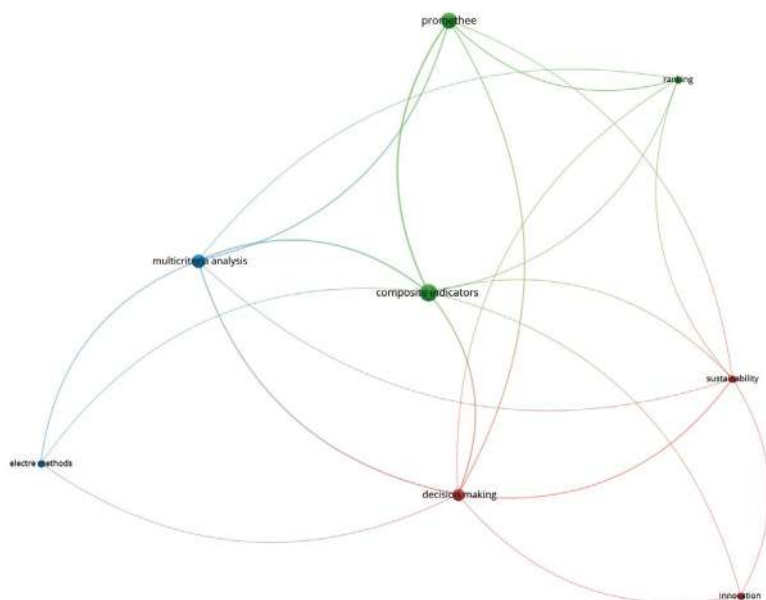


Figura 14.5. Indicadores sintéticos basados en métodos de superación: análisis de coocurrencia de palabras clave. Fuente: elaboración propia

sostenibilidad (social, económica y ambiental) y vincular esas medidas a la toma de decisiones. Dentro de este tipo de cuestiones, son los indicadores ambientales que van alcanzando un mayor protagonismo incorporando evaluaciones de tipo multicriterio. Más alejados del eje central y, por tanto, con un grado más incipiente, estarán las cuestiones relativas al cambio climático, la vulnerabilidad y la gestión del agua.

En este caso, las palabras clave de mayor ocurrencia y fuerza total del enlace fueron AHP, *composite indicator*, *decision making*, *sustainable development*, *multicriteria analysis* y *environmental indicator*.

En relación a los métodos de superación (figura 14.5), claramente se aprecia la relación entre los indicadores sintéticos construidos basándose en Promethee y métodos ELECTRE, con el objetivo de obtener rankings de unidades. Las cuestiones de sostenibilidad son la principal aplicación práctica en la que se centran los indicadores propuestos en este grupo para mejorar la toma de decisiones en términos de planificación.

Las palabras clave con mayor ocurrencia y fuerza total del enlace en estas metodologías fueron *composite indicator*, *multicriteria análisis*, *promethee* y *decision making*.

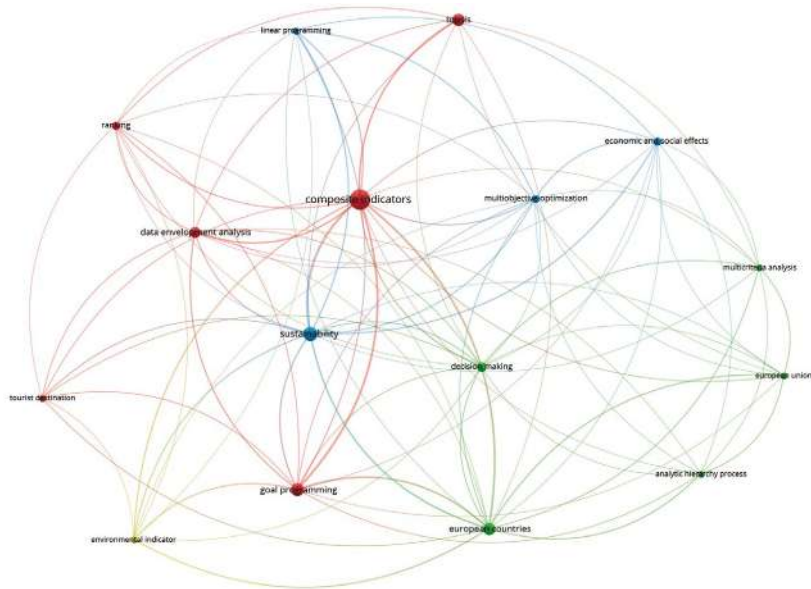


Figura 14.6. Indicadores sintéticos basados en distancias: análisis de coocurrencia de palabras clave. Fuente: elaboración propia

En el caso de metodologías que calculan indicadores sintéticos mediante los métodos basados en la distancia (figura 14.6), el mapa bibliométrico muestra una elevada concentración en la evaluación de cuestiones de sostenibilidad. Metodológicamente, destacan los indicadores obtenidos mediante *goal programming*, TOPSIS y optimización multiobjetivo, que incorporan otras técnicas que se utilizan de manera complementaria como AHP y DEA. Desde un punto de vista práctico, destacan las aplicaciones para análisis centrados en países europeos, abordando cuestiones concretas como el turismo sostenible, el impacto ambiental, los efectos sociales y económicos de los procesos de desarrollo y la mejora de la toma de decisiones pública mediante la incorporación de los indicadores.

En las metodologías basadas en la distancia las palabras clave de mayor ocurrencia y fuerza total del enlace fueron *composite indicators*, *sustainability*, *European countries* y *goal programming*.

Cuando analizamos las metodologías de construcción de indicadores sintéticos basados en la puntuación directa (figura 14.7), observamos que la concentración del tema es aún mayor, ya que solo aparecen 2 clústeres. Los indicadores sintéticos, obtenidos fundamentalmente mediante ponderación aditiva simple incorporando métodos de ponderación externa como el análisis en componentes

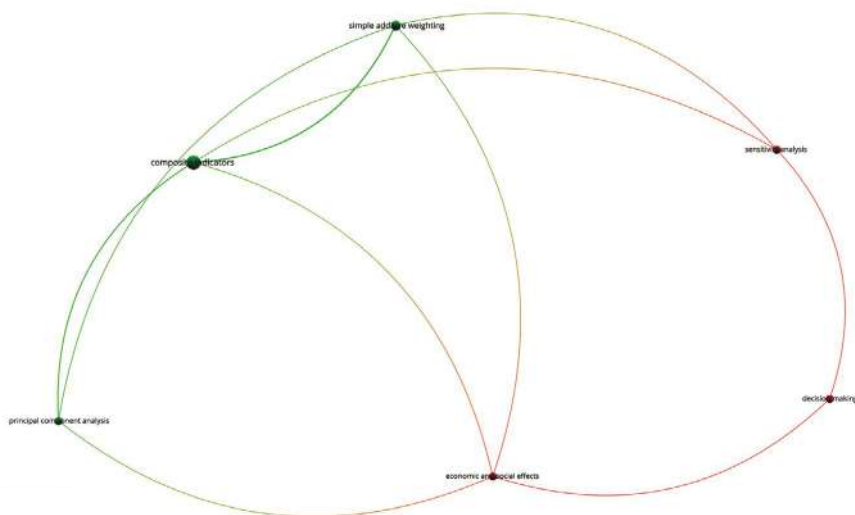


Figura 14.7. Indicadores sintéticos basados en puntuación directa: análisis de coocurrencia de palabras clave. Fuente: elaboración propia

principales, se centran en los estudios de los efectos sociales y económicos de los procesos de desarrollo.

Las palabras clave de mayor ocurrencia y fuerza total del enlace en este caso fueron *composite indicators*, *simple additive weighting*, *economic and social effects* y *principal component analysis*.

Con el objetivo de identificar y caracterizar metodológicamente el proceso de obtención de los indicadores compuestos con cada tipo de técnica multicriterio, realizamos dentro de cada grupo un estudio bibliométrico basado en un análisis de acoplamiento bibliográfico. Este análisis busca la relación entre publicaciones analizando las referencias comunes que poseen, buscando cercanías en su temática. Existe una relación de acoplamiento entre dos publicaciones cuando estas hacen referencia a una tercera publicación común en sus referencias bibliográficas, lo que es indicativo de que la temática abordada es compartida. Su fuerza de acoplamiento será mayor cuanto mayor sea el número de citas de otros documentos que comporten. Identificados los trabajos con mayor fuerza de acoplamiento dentro de cada técnica, se procedió a analizar su contenido para caracterizar el proceso de obtención del indicador compuesto. El resultado de este análisis se sintetiza en la [tabla 14.2](#).

Tabla 14.2. Construcción de indicadores: técnicas de decisión multicriterio.

Análisis Envolvente de Datos	
Métodos más utilizados	Modelos DEA tradicionales (modelos CCR y BCC). Modelos intertemporales (Índice de productividad de Malmquist). Modelos extendidos. Combinación de modelos DEA y métodos estadísticos. Modelos DEA ordinales.
Ponderación	Ponderación endógena: enfoque del beneficio de la duda (pesos individuales para cada unidad. Ponderación endógena con estimación de pesos comunes.
Agregación	Agregación aditiva compensatoria. Agregación multiplicativa con compensación parcial. Agregación no compensatoria mediante modelos DEA ordinales.
Combinación con otras técnicas	Modelos DEA combinados con análisis factorial para reducir la dimensión de los sistemas de partidas y facilitar la aplicación de esta metodología de agregación incrementando su poder discriminatorio entre las unidades.
Ventajas	No requiere de procedimiento de normalización previo y las ponderaciones se determinan de manera endógena reduciendo la subjetividad asociada al indicador compuesto. Proporciona medidas finales fáciles de interpretar por parte del usuario final.
Limitaciones	La flexibilidad con la que se determinan las ponderaciones puede llevar a situaciones extremas, donde el mayor peso se otorgue a un número reducido de indicadores. Bajo poder discriminador del indicador compuesto si el sistema de partida tiene una dimensión amplia. Puede provocarse problemas a la hora de obtener una solución factible en los problemas de programación lineal que definen el indicador. Estas limitaciones pueden solventarse incluyendo restricciones adicionales que reduzcan la flexibilidad a la hora de otorgar la ponderación, que fijen ponderaciones comunes e incrementen el poder discriminador del indicador sintético.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Cherchye <i>et al.</i> , 2008; Hatefi y Torabi, 2010; Reig-Martínez <i>et al.</i> , 2011; Savić y Martić, 2017; Zhou <i>et al.</i> , 2018; Zhou <i>et al.</i> , 2021.
Funciones de Utilidad	
Métodos más utilizados	MAVT, MAUT
Ponderación	Ponderación exógena. Métodos más utilizados: igualdad de ponderación, métodos participativos (panel de expertos) (con valoración directa u oscilante), métodos de comparación por pares.

Agregación	Agregación aditiva de utilidades asociada a cada indicador inicial (compensatoria).
Combinación con otras técnicas	Agregación en varias fases (indicadores dimensionales y globales). Incorporación de técnicas de comparación por pares como método de ponderación.
Ventajas	Método práctico de fácil computación y que facilita la definición de estrategias de mejora para las unidades.
Limitaciones	Requiere la elección de una función de utilidad para cada indicador inicial y la elección de un método de ponderación.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Hassan, 2008; Bottero <i>et al.</i> , 2015; Merz <i>et al.</i> , 2013; Pinar <i>et al.</i> , 2014.
Comparación por pares	
Métodos más utilizados	AHP, ANP
Ponderación	Ponderación endógena a partir de la matriz de comparaciones binarias (conocimiento experto y/o stakeholders).
Agregación	Agregación aditiva compensatoria mediante suma ponderada de valores normalizados (de los indicadores o de las ponderaciones).
Combinación con otras técnicas	Agregación en varias fases (indicadores dimensionales y globales). Utilización de AHP como método de ponderación exógena dentro de otros procedimientos para obtener los valores del indicador compuesto (TOPSIS, PROMETHEE,...). Utilización de Análisis Factorial para reducir dimensión del sistema.
Ventajas	Aporta transparencia al cálculo del indicador y facilita un análisis organizado del problema al descomponer problemas complejos en una jerarquía (en el AHP) o en una red de relaciones (en el ANP). La comparación por pares es intuitiva. Posibilidad de incorporación de indicadores de tipo cualitativo.
Limitaciones	Requiere la aplicación de un procedimiento de normalización previo. Método más utilizado: normalización Min-Max. Alto número de comparaciones binarias necesarias para sistemas con dimensión amplia. Alta sensibilidad de los resultados ante la inclusión de indicadores irrelevantes.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Singh <i>et al.</i> , 2007; Herva y Roca, 2013; Molinos-Senante <i>et al.</i> , 2014; Asadzadeh <i>et al.</i> , 2015.

Basados en la Distancia	
Métodos más utilizados	Goal programming, TOPSIS
Ponderación	Ponderación exógena. Métodos más utilizados: métodos participativos (panel de expertos con puntuación directa; intervalos de preferencia, pesos de consenso).
	Ponderación endógena: uwTOPSIS
Agregación	Agregación con diferente grados de compensación (total, parcial y no compensatoria) al determinar las distancias a la situación ideal: media aritmética, distancia máxima, media geométrica,...
Combinación con otras técnicas	Incorporación de técnicas de comparación por pares como método de ponderación (AHP método más utilizado).
Ventajas	No requiere la aplicación de un procedimiento de normalización previo. Fácil interpretación del valor del indicador en términos de distancia a la situación óptima de referencia.
Limitaciones	Obtención de los valores óptimos (ideal y antiideal) tomados como referencia. Alto coste de computación cuando se trabaja con sistemas de alta dimensión. Elección de método adecuado para asignar las ponderaciones.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Moghadas <i>et al.</i> , 2019; Lozano-Oyola <i>et al.</i> , 2012; Valcacer-Aguilar <i>et al.</i> , 2019; Costa-Freitas <i>et al.</i> , 2022.
Superación	
Métodos más utilizados	PROMETHEE II, ELECTRE III
Ponderación	Ponderación exógena. Métodos más utilizados: ponderación igualitaria, AHP.
Agregación	Agregación compensatoria aditiva mediante los índice de preferencia agregada.
	Agregación no compensatoria: índice de concordancia ELECTRE III.
Combinación con otras técnicas	Combinación con SMAA para la obtención de medidas no compensatorias.

Ventajas	Proporciona indicadores sintéticos simples y fáciles de interpretar. No requiere un procedimiento de normalización previo. La construcción de la relación de superación incorpora facilita la interpretación por parte del decisor. Posee instrumentos gráficos (como el plano GALIA) que apoya su interpretación.
Limitaciones	Requieren la elección de un criterio generalizado para cada indicador inicial y un método de ponderación externo. Alto coste computacional e interpretativo cuando el número de indicadores iniciales es elevado.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Herva y Roca, 2013; Greco <i>et al.</i> , 2021; Matos <i>et al.</i> , 2024.
Puntuación Directa	
Métodos más utilizados	SAW, COPRAS
Ponderación	Ponderación exógena. Métodos más utilizados: ponderación igualitaria. Análisis en Componentes Principales.
Agregación	Agregación aditiva compensatoria mediante suma ponderada de valores normalizados.
Combinación con otras técnicas	
Ventajas	Método práctico de fácil computación y que facilita la definición de estrategias de mejora para las unidades.
Limitaciones	Requieren de un procedimiento de normalización previo. Método más utilizados: Min-Max, Normalización lineal. Requieren de un procedimiento de ponderación.
Trabajos con mayor acoplamiento bibliográfico	Jung, 2012; Dabkiene <i>et al.</i> , 2021.

## CONCLUSIONES

El análisis de los problemas y conceptos sociales para el diseño, ejecución y control de políticas públicas adecuadas requiere de un instrumento de medición que permita dimensionarlos y dotarlos de contenido empírico. En este sentido, los indicadores sociales se han

constituido como instrumentos adecuados para esta tarea, dadas sus características analizadas en este trabajo.

Para facilitar la utilización de la información de un sistema de indicadores, los indicadores sintéticos han sido los instrumentos prácticos utilizados con mayor aceptación entre la comunidad internacional. Desde organismos internacionales como la OCDE o la ONU, se ha potenciado la creación de este tipo de medidas. En este trabajo se ha caracterizado el proceso de creación de los mismos, estableciendo las diferentes tareas que son necesarias realizar y las decisiones que hay que adoptar para su configuración.

En este capítulo, se ha analizado el papel que las técnicas de decisión multicriterio han jugado en la creación de medidas sintéticas y las principales aplicaciones prácticas para las que dichas medidas se han definido. Para ello se han utilizado los resultados de un análisis bibliométrico a partir de la base de datos Scopus, analizando las principales aportaciones existentes en la literatura. En general, el análisis bibliométrico nos permite analizar las tendencias de la literatura científica en un ámbito de conocimiento, midiendo el número, el impacto y las relaciones entre las publicaciones científicas, utilizando herramientas matemáticas y estadísticas. En este capítulo nos hemos centrado en el análisis de palabras claves estudiando su coocurrencia, lo que nos ha permitido conocer en qué ámbitos se han aplicado más las técnicas de decisión multicriterio en los últimos años. Asimismo, hemos completado este estudio con análisis de acoplamiento bibliográfico para identificar los trabajos que comporten temas de investigación común.

El estudio de estos trabajos nos ha permitido identificar las principales metodologías de construcción de indicadores sintéticos usando técnicas multicriterio, caracterizando los procesos de obtención y fijando las principales características diferenciadoras de cada uno de ellos, presentando brevemente sus principales ventajas e inconvenientes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos PID2021-124981NB-I00 y PID2022-139543OB-C4.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J. L. (2012): «Constructos, Variables, Dimensiones, Indicadores y Congruencia (Constructs, Variables, Dimensions, Indicators & Consistency)», *Daena: International Journal of Good Conscience*, 7(3), 123-130.
- Ander-Egg, E. y Aguilar, M. J. (1995): *Técnicas de investigación social* (Vol. 24). Buenos Aires: Lumen.
- Asadzadeh, A., Kötter, T. y Zebardast, E. (2015): «An augmented approach for measurement of disaster resilience using connective factor analysis and analytic network process (F'ANP) model», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 504-518.
- Aznar, F. C. (1989): *Técnicas de investigación social: los indicadores sociales y psicosociales: teoría y práctica*. Promociones y Publicaciones Universitarias.
- Babbie, E. R. (2020): *The practice of social research*. Cengage Au.
- Bauer, R. (1966): *Social Indicators*. Cambridge. The MIT Press.
- Booyesen, F. (2002): «An overview and evaluation of composite index of development», *Social Indicators Research*, 59, 115-151.
- Bottero, M., Ferretti, V. y Mondini, G. (2015): «Calculating composite indicators for sustainability», en *Computational Science and Its Applications--ICCSA 2015: 15th International Conference, Banff, AB, Canada, June 22-25, 2015, Proceedings, Part III 15*, 20-35. Springer International Publishing.
- Campbell, A., Converse, P. y Rodgers, W. (1976): *The quality of American life. Perceptions, evaluation and satisfactions*. Nueva York: Russell Sage Foundation.
- Carmines, E. G. (1979): *Reliability and validity assessment*. Quantitative Applications in the Social Sciences/Sage.
- Cherchye, L., Moesen, W., Rogge, N., Van Puyenbroeck, T., Saisana, M., Saltelli, A. y Tarantola, S. (2008): «Creating composite indicators with DEA and robustness analysis: the case of the Technology Achievement Index», *Journal of the Operational Research Society*, 59(2), 239-251.
- Cobb, C. W. y Rixford, C. (1998): *Lessons learned from the history of social indicators* (Vol. 1). San Francisco: Redefining Progress.
- Costa Freitas, M. D. B., Xavier, A., Fragoso, R. y Antunes, C. (2022): «A composite indicator to measure sustainable water use in Portugal: A compromise programming approach», *Journal of Environmental Management*, 311, 114791.
- Crano, W. D., Brewer, M. B. y Lac, A. (2014): *Principles and methods of social research*. Routledge.
- Creswell, J. W. y Creswell, J. D. (2017): *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications.
- Dabkiene, V., Balezentis, T. y Streimikiene, D. (2021): «Development of agri-environmental footprint indicator using the FADN data: Tracking

- development of sustainable agricultural development in Eastern Europe», *Sustainable Production and Consumption*, 27, 2121-2133.
- De Vaus, D. (2001): *Research design in social research*. SAGE Publications.
- Decancq, K. y Lugo, M. A. (2013): «Weights in multidimensional indices of well-being: An overview», *Econometric Reviews*, 32(1), 7-34.
- Dialga, I. y Thi Hang Giang, L. (2017): «Highlighting methodological limitations in the steps of composite indicators construction», *Social Indicators Research*, 131, 441-465.
- Fernández, E. J. y Martos, M. J. R. (2020): «Review of some statistical methods for constructing composite indicators», *Studies of Applied Economics*, 38(1), 1-15.
- Freudenberg, M. (2003): *Composite indicators of country performance: a critical assessment*, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 2003/16. París: OECD Publishing.
- García-Durán, J. y Puig, P. (1980): *La calidad de la vida en España. Hacia un estudio de los indicadores sociales*. Madrid: Moneda y Crédito.
- Gómez, J., Palarea, J. y Martín, J. A. (2006): «Métodos de Inferencia Estadística con Datos Faltantes. Estudio de Simulación sobre los Efectos en las Estimaciones», *Revista Estadística Española*, 162, 241-270.
- Grasso, M. y Canova, L. (2008): «An assessment of the quality of life in the European Union based on the social indicators approach», *Social Indicators Research*, 87, 1-25.
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M. y Torrisi, G. (2019): «On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness», *Social Indicators Research*, 141, 61-94.
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M. y Torrisi, G. (2021): «The ordinal input for cardinal output approach of non-compensatory composite indicators: The PROMETHEE scoring method», *European Journal of Operational Research*, 288(1), 225-246.
- Hassan, O. A. (2008): «Assessing the sustainability of a region in the light of composite indicators», *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 10(01), 51-65.
- Hatefi, S. M. y Torabi, S. A. (2010): «A common weight MCDA-DEA approach to construct composite indicators», *Ecological Economics*, 70(1), 114-120.
- Herva, M. y Roca, E. (2013): «Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis», *Ecological Indicators*, 25, 77-84.
- Ji, L., Liu, C., Huang, L. y Huang, G. (2018): «The evolution of Resources Conservation and Recycling over the past 30 years: A bibliometric overview», *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 34-43.
- Joint Research Centre (2008): *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD publishing.
- Jung, H. W. (2012): «Process attribute rating and sensitivity analysis in process assessment», *Journal of Software: Evolution and Process*, 24(4), 401-419.

- Keenan, P. (2021): «Thirty years of decision support: A bibliometric view», En J. F. de Sousa, J. Papathanasiou y P. Zaraté (eds.), *EURO working group on DSS: A tour of the DSS developments over the Last 30 Years*, 15–32. Springer.
- Keenan, P. (2024): «A scientometric analysis of multicriteria decision-making research», *Journal of Decision Systems*, 1-11.
- Land, K. C. (1983): «Social indicators», *Annual Review of Sociology*, 9(1), 1-26.
- Latorre, A., Del Rincón, D. y Arnal, J. (2021): *Bases metodológicas de la investigación educativa*. Ediciones experiencia.
- Little, R. J. A. y Rubin, D. B. (2002): *Statistical Analysis with Missing Data*. Hoboken: Wiley Interscience, J. Wiley y Sons.
- López-Roldán, P. y Fachelli, S. (2015): *Metodología de la investigación social cuantitativa*.
- Lozano-Oyola, M., Blancas, F. J., González, M. y Caballero, R. (2012): «Sustainable tourism indicators as planning tools in cultural destinations» *Ecological Indicators*, 18, 659-675.
- Márquez, R. (2008): «El diseño de índices sintéticos a partir de datos secundarios: Metodologías y estrategias para el análisis social», *Revista de Desarrollo Humano*, 43, 1-15.
- Matos, I. D. C., Gomes Costa, H., Roboredo, M. y Lima, D. (2024): «Refining the PROMETHEE-scoring method: Propositions and an economic freedom assessment», *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 31(3-4), e1835.
- Mazziotta, M. y Pareto, A. (2017): «Synthesis of indicators: The composite indicators approach», *Complexity in society: From indicators construction to their synthesis*, 159-191.
- Merz, M., Hiete, M., Comes, T. y Schultmann, F. (2013): «A composite indicator model to assess natural disaster risks in industry on a spatial level», *Journal of Risk Research*, 16(9), 1077-1099.
- Miller, D. C. y Salkind, N. J. (2002): *Handbook of research design and social measurement*. Sage.
- Moghadas, M., Asadzadeh, A., Vafeidis, A., Fekete, A. y Kötter, T. (2019): «A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101069.
- Molinos-Senante, M., Muñoz, S. y Chamorro, A. (2019): «Assessing the quality of service for drinking water supplies in rural settings: A synthetic index approach», *Journal of Environmental Management*, 247, 613-623.
- Munda, G. (2005): «Multiple criteria decision analysis and sustainable development», en S. Greco, M. Ehrgott y J. Figueira (eds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 953-986. Nueva York: Springer.
- Munda, G. y Nardo, M. (2009): «Noncompensatory/Nonlinear composite indicators for ranking countries: A defensible setting», *Applied Economics*, 41, 1513-1523.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A. y Giovannini, E. (2005a): *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Statistics Working Papers.

- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A. y Tarantola, S. (2005b): *Tools for composite indicators building. Institute for the protection and security of the citizen*. European Commission.
- Noll, H. H. (1996): «Social indicators and social reporting: The international experience», en Canadian Council on Social Development (ed.), *Symposium on Measuring Well-Being and Social Indicators*. Final report (<http://www.ccsd.ca/noll1.html>).
- OECD (1976): *Mesure du bien-être social. Progrès accomplis dans l'élaboration des indicateurs sociaux*. París: OCDE.
- OECD (2003): *Quality Framework and Guidelines for OECD Statistical Activities*. Edición electrónica a texto completo en [www.oecd.org/statistics](http://www.oecd.org/statistics).
- ONU (1975): *Hacia un sistema de estadísticas sociales y demográficas (SES)*. Proyecto de normas sobre indicadores sociales. E/CN. 3/450.
- Paruolo, P., Saisana, M. y Saltelli, A. (2013): «Ratings and rankings: Voodoo or science?», *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)* 176(3), 609-634.
- Pena, J. B. (1977): *Problemas de la medición del bienestar y conceptos afines (una aplicación al caso español)*. Madrid: Instituto Nacional de Estadística.
- Pinar, M., Cruciani, C., Giove, S. y Sostero, M. (2014): «Constructing the FEEM sustainability index: A Choquet integral application», *Ecological Indicators*, 39, 189-202.
- Podinovskii, V. V. (1994): «Criteria importance theory», *Mathematical Social Sciences*, 27, 237-252.
- Pranckutė, R. (2021): «Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world», *Publications*, 9(1), 12.
- Reguant, M. y Martínez, F. (2014): *Operacionalización de conceptos/variables*.
- Reig-Martínez, E., Gómez-Limón, J. A. y Picazo-Tadeo, A. J. (2011): «Ranking farms with a composite indicator of sustainability», *Agricultural Economics*, 42(5), 561-575.
- Robson, C. (2024): *Real world research*. John Wiley & Sons.
- Rosato, P. F., Caputo, A., Valente, D. y Pizzi, S. (2021): «2030 Agenda and sustainable business models in tourism: A bibliometric analysis», *Ecological Indicators*, 121, 106978.
- Saisana, M. y Tarantola, S. (2002): *State-of-the-Art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development*. Joint Research Centre, European Commission.
- Saisana, M., Tarantola, S. y Saltelli, A. (2005): «Uncertainty and Sensitivity Techniques as Tools for the Analysis and Validation of Composite Indicators», *Journal of the Royal Statistical Society*, 168(2), 1-17.
- Saltelli, A. (2007): «Composite indicators between analysis and advocacy», *Social Indicators Research*, 81, 65-77.
- Savić, G., y Martić, M. (2017): «Composite indicators construction by data envelopment analysis: Methodological background», en *Emerging trends*

- in the development and application of composite indicators*, pp. 98-126. IGI Global.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K. y Dikshit, A. K. (2007): «Development of composite sustainability performance index for steel industry», *Ecological Indicators*, 7(3), 565-588.
- Schafer, J. L. (1997): *Analysis of Incomplete Multivariate Data*. Londres: Chapman and Hall.
- Tarantola, S., Jesinghaus, J. y Puolamaa, M. (2000): «Global Sensitivity Analysis: A Quality Assurance Tool in Environmental Policy Modelling» en A. Saltelli, K. Chan y M. Scott (eds.) *Sensitivity Analysis*, 385-397. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Thelwall, M. y Sud, P. (2022): «Scopus 1900–2020: Growth in articles, abstracts, countries, fields, and journals», *Quantitative Science Studies*, 3(1), 37-50.
- Valcárcel-Aguiar, B., Murias, P. y Rodríguez-González, D. (2018): «Sustainable urban liveability: A practical proposal based on a composite indicator», *Sustainability*, 11(1), 86.
- Van Eck, N. J. y Waltman, L. (2010): «Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping» *Scientometrics*, 84(2), 523-538.
- Zapf, W. (1975): «Systems of social indicators: current approaches and problems» *International Social Science Journal*, 27(3).
- Zarzosa, P. (1996): *Aproximación a la Medición del Bienestar Social*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Zarzosa, P. (Dir.), Molpeceres, M. M., Pérez, A., Prada, M. D., Prieto, M. M., Rodríguez, C. y Zarzosa, F. (2005): *La calidad de vida en los municipios de la Provincia de Valladolid*. Valladolid: Diputación Provincial de Valladolid.
- Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y. y Zhu, J. (2018): «Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions», *European Journal of Operational Research*, 264(1), 1-16.
- Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y., Zhu, J. y Shi, Y. (2021): *DEA application in sustainability 1996–2019: The origins, development, and future directions*. Pursuing Sustainability: OR/MS Applications in Sustainable Design, Manufacturing, Logistics, and Resource Management, 71-109.

# Selección multicriterio de transporte público en Zaragoza con AHP. Identificación de grupos para un número elevado de actores

JUAN AGUARÓN JÓVEN  
ALFREDO ALTUZARRA CASAS  
MARÍA TERESA ESCOBAR URMENETA  
JOSÉ MARÍA MORENO JIMÉNEZ  
VICTORIA MUERZA MARÍN  
JORGE NAVARRO LÓPEZ  
ALBERTO TURÓN LANUZA  
*Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza*  
*Universidad de Zaragoza*

## INTRODUCCIÓN

Si siguiendo con las actividades divulgativas del Grupo Español de Decisión Multicriterio y de la Red Multicriterio Española, nuestro nodo –Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza (GDMZ)– quiere comenzar agradeciendo a los coordinadores de este nuevo libro de la Red la posibilidad de contribuir al mismo con alguna de las aplicaciones en las que estamos trabajando. No obstante, antes de plantear el caso práctico analizado queremos presentar, brevemente, la línea de investigación que venimos manteniendo desde hace más de treinta años y la orientación seguida actualmente en la misma.

Desde principios de los 90 (s. XX), el GDMZ está trabajando en la resolución científica de problemas complejos en contextos discretos, caracterizados por la existencia de múltiples escenarios, actores y criterios, tanto tangibles como intangibles. El enfoque metodológico seguido está basado en la propuesta del profesor Thomas Saaty (Saaty, 1980): el proceso analítico jerárquico (AHP) y su extensión al caso de dependencias y retroalimentación (Saaty, 1996), el proceso analítico sistémico o en red (ANP).

Básicamente, las ideas que han justificado la elección de esta escuela son dos: (i) su idoneidad para incorporar los aspectos intangibles en los procesos decisionales, y (ii) el potencial que ofrece para trabajar con múltiples actores; algo fundamental en la Sociedad del Conocimiento y de las Inteligencias Artificiales (SdCelA).

En este contexto, dos son los tópicos más destacados cuando se trabaja en decisión en grupo con AHP (AHP-GDM): la *consistencia* (coherencia individual o racionalidad) a la hora de incorporar las preferencias de los decisores, y la *compatibilidad* (coherencia colectiva o representatividad) a la hora de aceptar la posición colectiva por parte de los decisores individuales. Recordemos que en AHP las preferencias vienen dadas por los juicios emitidos al establecer las matrices de comparaciones pareadas (PCM) a partir de las cuales se obtienen las prioridades de los elementos considerados.

Tradicionalmente los dos procedimientos utilizados en AHP-GDM son: AIJ (*Aggregation of individual judgements*) y AIP (*Aggregation of individual priorities*). Ambos procedimientos utilizan una media geométrica ponderada, respectivamente de juicios y de prioridades, para obtener la posición colectiva que puede ser poco representativa. Ahora bien, las medidas de síntesis solo tienen sentido cuando los elementos considerados presentan poca variabilidad. De ahí que antes de sintetizar las posiciones individuales en una colectiva sea necesario comprobar su variabilidad. En nuestro caso, centrado en la ordenación de un conjunto discreto de alternativas a partir de las prioridades asociadas a las mismas, la variabilidad suele referirse a la ordenación (*ranking*) de las alternativas (problema P.g) o a la identificación de la mejor (problema P.a) o de las k mejores (problema P.a[k]).

Cuando se trabaja con muchos individuos ( $n > 20$ ) suele ser frecuente que no todos estén de acuerdo con la posición colectiva. En estas situaciones se recomienda –orientación cognitiva en decisión multicriterio (Moreno-Jiménez y Vargas, 2018; Vargas et al., 2023)– identificar grupos homogéneos de actores con patrones

diferenciados y justificar los argumentos que soportan las diferentes posiciones y decisiones.

El caso de estudio considerado en este trabajo, en el que participaron 22 individuos, analiza un problema real relativo a la selección de la alternativa de transporte urbano preferido para la ciudad de Zaragoza. Para abordar su estudio se utilizó una de las técnicas multicriterio discretas más extendidas y utilizadas en la práctica: el proceso analítico jerárquico (AHP). En esta ocasión se ha considerado una jerarquía con tres criterios, doce atributos (4 para cada criterio) y cuatro alternativas (A1: línea 2 del tranvía; A2: TranBus; A3: AraTren –cercanías mixto– y A4: no hacer nada).

El resto del trabajo se ha estructurado como sigue. La sección 2 incluye algunos conceptos básicos sobre consistencia y compatibilidad –y sus respectivas mejoras (Aguarón *et al.*, 2020, 2021, 2023a; Escobar *et al.*, 2023; Turón *et al.*, 2019)–, así como la determinación de grupos de actores homogéneos. También recoge la metodología seguida en el trabajo. La sección 3 presenta el caso de estudio, obtiene los clústeres o grupos iniciales de actores y sus centroides (posiciones colectivas), mejora la incompatibilidad de la posición colectiva intraclúster y sugiere caminos de negociación para las alternativas más incompatibles que llevan a una posición lo más consensuada posible. Por último, la sección 4 resalta los resultados más destacados del trabajo y ofrece algunas extensiones futuras del mismo.

## 1. METODOLOGÍA

Dos de las características más destacadas de la sociedad del conocimiento son la predisposición colaborativa de unos ciudadanos cada vez más formados y la relevancia de lo subjetivo, intangible y emocional asociado al factor humano. Para aprovechar estas dos características se requieren herramientas que combinen, mediante un tratamiento objetivo de lo subjetivo, lo racional y lo emocional en los modelos formales utilizados para la toma de decisiones.

Una de estas herramientas es AHP, cuya metodología consiste en tres etapas (Saaty, 1980): (i) modelización jerárquica del problema; (ii) valoración o incorporación de las preferencias de los decisores mediante la emisión de los juicios de las PCMs siguiendo la escala fundamental de Saaty; (iii) priorización (prioridades locales y globales de todos los nodos de la jerarquía) y síntesis (prioridades totales de las alternativas). Los dos procedimientos más utilizados en AHP para obtener las prioridades locales son: el del autovector principal

por la derecha (EV), y el de la media geométrica por filas (RGM). Este último (RGM) proporciona los mismos resultados cuando se trabaja (AHP-GDM) con AIJ o con AIP. Las prioridades globales se obtienen aplicando el principio de composición jerárquica y las totales mediante una síntesis multiaditiva (Saaty, 1980).

AHP permitió desde su planteamiento inicial una medición explícita de la inconsistencia de los decisores a la hora de emitir los juicios de las PCM consideradas. Se dice que una matriz de comparaciones pareadas es consistente cuando para cada terna de juicios diferentes se verifica la propiedad de transitividad cardinal, esto es, si A es 3 veces B y B es 2 veces C, entonces A es  $3 \times 2 = 6$  veces C. Los dos métodos más empleados para evaluar la inconsistencia son el *Consistency Ratio* (CR) de Saaty (Saaty, 1980) y el *Geometric Consistency Index* (GCI) de Aguarón y Moreno-Jiménez (2003).

Para evaluar la incompatibilidad de las posiciones individuales con la colectiva, Aguarón *et al.*, (2022) plantearon en un contexto local (un único criterio) diferentes indicadores (GCOMPI<sub>r</sub>,  $r=1,2,3,4$ ) conforme a la información disponible (matrices o vectores de prioridades) de las posiciones individuales y colectiva. A continuación, por sus propiedades matemáticas y facilidad de cálculo, se usará el RGM como método de priorización, el GCI como medida de la inconsistencia y el GCOMPI<sub>2</sub> como medida de la incompatibilidad entre matrices y vectores.

Conviene recordar que en AHP, para dar validez al vector de prioridades derivado de una PCM, es preciso que la inconsistencia de la matriz no supere el umbral fijado para el método de priorización considerado. Saaty (1980) fijó, en función del tamaño de la matriz ( $n$ ), un  $CR(n) < 0,10$  para el EV y Aguarón y Moreno-Jiménez (2003) establecieron los siguientes umbrales para el GCI:  $GCI(n) < 0,31$  para  $n=3$ ,  $GCI(n) < 0,35$  para  $n=4$ , y  $GCI(n) < 0,37$  para  $n>4$ . Respecto a los umbrales de incompatibilidad permitidos, todavía no existe una posición unánimemente aceptada en la literatura, recurriéndose a procedimientos indirectos a la hora de fijarlos (G de Garuti, H de Hilbert, etc.).

En general, para garantizar la similitud de los elementos sintetizados cuando se dispone de un número elevado de decisores ( $n>20$ ), es conveniente comenzar realizando un análisis clúster que permita identificar los elementos similares. Muchos son los procedimientos existentes en la literatura para realizar un análisis clúster. En lo que sigue, asumiendo un único criterio en AHP-GDM y empleando los procedimientos de cálculo mencionados, la obtención de los diferentes clústeres puede efectuarse considerando los juicios emitidos

por los decisores individuales, o bien sus prioridades asociadas. En ambos casos se obtienen los mismos grupos o clústeres (Aguarón *et al.*, 2023b).

El procedimiento seguido para identificarlos es el siguiente. Dado un conjunto de observaciones  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , el algoritmo de las k-medias busca la construcción de una partición de las observaciones en un número  $N_c$  de grupos o clústeres  $(S_1, S_2, \dots, S_{N_c})$ , de forma que se minimice la suma de cuadrados de las distancias euclídeas de cada observación al centroide del grupo al que pertenece (distancias intragrupos). El centroide de cada grupo se obtiene como la media aritmética (puede ser ponderada) de los elementos de dicho grupo.

En este trabajo las observaciones son un conjunto de matrices  $\mathcal{A}=(A^{[1]}, A^{[2]}, \dots, A^{[d]})$  correspondientes a los juicios de los decisores al comparar las alternativas. Se aplica el algoritmo de las k-medias a este conjunto de matrices, pero trabajando con las matrices formadas por los logaritmos, elemento a elemento, de los juicios. Con ello se consigue que la métrica empleada por el algoritmo de las k-medias sea la distancia log-cuadrática entre los juicios de las matrices. Esta expresión coincide, salvo factor de escala, con la medida de incompatibilidad conocida como GCOMPI; en este caso, incompatibilidad entre matrices.  $\log A^{(i)} = (\log a_{ij}^{(i)})$  La «matriz centroide» de las matrices de un clúster es la matriz AIJ (agregación de juicios individuales) de dichas matrices. Además, este resultado puede generalizarse a situaciones en las que los decisores tengan diferentes ponderaciones.

En definitiva, aplicar el algoritmo de las k-medias a los logaritmos de las matrices de juicios de un conjunto de decisores equivale a determinar los grupos de decisores que presentan menores distancias a la matriz AIJ del clúster, midiendo esta distancia mediante el indicador GCOMPI.

Para determinar el número de clústeres, se aplica el algoritmo de las k-medias para diferentes valores de  $k$  (número de clústeres), obteniendo la curva de Elbow, en la que se representa la función objetivo obtenida (suma de los GCOMPIS de cada grupo) frente al número de clústeres. A medida que se aumenta su número, disminuye la función objetivo global. Finalmente, para analizar la validez de los clústeres, esto es, la correcta asignación de los elementos a los clústeres se emplea el método Silhouette (<https://es.wikipedia.org/wiki/Silhouette>).

En síntesis, la identificación de las diferentes posiciones (*rankings*) en decisión en grupo con AHP para un número elevado de actores incluye los siguientes pasos:

**Paso 0:** Se suponen conocidas las PCM's individuales de los  $d$  decisores  $A^{(l)} = (a_{ij}^{(l)}), l=1, \dots, d; ij=1, \dots, n$  y la colectiva  $A^{(0)} = (a_{ij}^{(0)})$ , independientemente de cómo esta se haya obtenido, y se emplea el RGM para obtener los vectores de prioridades asociados.

**Paso 1:** Calcular la inconsistencia de las PCM's individuales y de la colectiva mediante el GCI. Si alguna inconsistencia supera el umbral fijado, es preciso modificar los juicios de partida hasta alcanzar el umbral deseado. La modificación debe realizarla el decisor y existen diversos procedimientos para ayudarle (Aguarón *et al.*, 2021).

**Paso 2:** Se calcula la incompatibilidad de las posiciones individuales con la colectiva. Si la incompatibilidad colectiva no supera el umbral fijado, se da por buena la posición colectiva disponible. Si lo supera, se recurre a separar los decisores en clústeres utilizando el método de las k-medias para las matrices modificadas, como se ha comentado anteriormente. Se identifican el número apropiado de grupos y las particiones de los individuos en grupos homogéneos, empleando el GCOMPI<sub>1</sub> como medida de la compatibilidad entre matrices.

**Paso 3:** Para cada uno de los clústeres se identifica el centroide correspondiente (matriz centroide o vector centroide asociado) por cualquiera de los métodos existentes.

**Paso 4:** Calcular mediante el GCOMPI<sub>2</sub>, o algún otro procedimiento alternativo (Aguarón *et al.*, 2022, 2023a), la incompatibilidad de las PCM's individuales con la posición colectiva de cada clúster dada por su vector de prioridades. Si todos los decisores son compatibles con la posición colectiva, esta es representativa y el vector derivado de la misma refleja el *ranking* de las alternativas para el colectivo.

**Paso 5:** Si la incompatibilidad de los decisores de un clúster no es compatible con la posición colectiva, esta se modifica para mejorar la incompatibilidad siguiendo el método propuesto por Aguarón *et al.* (2023a). Si la incompatibilidad colectiva de un clúster es inferior al umbral fijado, el nuevo vector de prioridades colectivo refleja el ranking de alternativas para el clúster. En caso contrario, ir al siguiente paso.

**Paso 6:** Se presentan posibles caminos de consenso para mejorar la incompatibilidad, intentar reducir el número de clústeres o incrementar su representatividad.

## 2. CASO DE ESTUDIO

### 2.1. Planteamiento del problema

Este caso utiliza los datos de la experiencia realizada en abril del año 2015 con los alumnos de Gobierno Electrónico y Decisiones Públicas (4º curso del Grado de Economía en la Facultad de Economía y Empresa de la Universidad de Zaragoza), relativa a la selección de la mejor estrategia de movilidad en la ciudad de Zaragoza (Escobar *et al.* 2016). En esta ocasión, se han incorporado las nuevas herramientas decisionales desarrolladas en los últimos años por el GDMZ para favorecer toma de decisiones en grupo con AHP para un número elevado de decisores.

Tomando como punto de partida la línea de tranvía existente (línea 1, que une el norte y sur de la ciudad pasando por el centro), las opciones consideradas correspondían a las que los distintos partidos políticos proponían en sus programas electorales para las elecciones municipales que se celebraron en Zaragoza, mayo de 2015. Las alternativas inicialmente consideradas fueron: A1: línea 2 del tranvía (PSOE); A2: TranBus (PP); y A3: AraTren (CHA). A estas se añadió una cuarta, la opción de no hacer nada (A4: no hacer nada).

La primera alternativa, A1: *línea 2 del tranvía*, contemplaba la ampliación de la red del tranvía, construyendo una segunda línea que conectaría los barrios del este y oeste de la ciudad atravesando el centro histórico y comercial. En el centro de la ciudad se aprovecharía el trazado de la línea 1 ya existente, compartiendo paradas y favoreciendo la intermodalidad. El trazado completo tendría una longitud de 7000 metros y 15 paradas y cada unidad del tranvía, como en el ya existente, tendría una capacidad para 200 personas, favoreciendo una mejor eficacia en las líneas de autobús urbano. El diseño contemplaba la posibilidad de crear distintos ramales en los extremos de la línea, así como la posible conexión con barrios nuevos situados en el extrarradio de la ciudad. El presupuesto se desglosaba para los distintos potenciales ramales variando entre 84,1 y 99,6 millones de euros.

La segunda alternativa, A2: *TranBus*, contemplaba la introducción de autobuses biarticulados de alta capacidad (de hasta 166 pasajeros) similares a los vehículos que funcionaban ya en otras ciudades como Barcelona o Granada, buscando combinar lo mejor del tranvía y del autobús. Se planteaba que el TranBus tuviera, como el tranvía, prioridad semafórica. Se estimaba que la velocidad media variaría entre 13 y 15 km por hora y que la frecuencia de paso sería

de 4 minutos. Sería más flexible que el tranvía, pudiendo compartir la calzada con otros medios de transporte y la posibilidad de desviarse por obras. No se concretaron los posibles itinerarios por los que podría circular, que podrían incluir el eje este-oeste y/o recorridos circulares. Esta opción suponía un ahorro económico al evitar las obras de infraestructura de las vías y tampoco serían necesarios los andenes ni obras complementarias en las paradas de bus ya existentes en la ciudad. La demanda energética sería inferior, pudiendo optar por un modelo de propulsión híbrida. El presupuesto para 16 vehículos se estimó en 13,3 millones de euros.

La tercera propuesta, *A3: AraTren*, suponía la creación de una red ferroviaria de cercanías que conectaría con el tranvía de Zaragoza. Emplearía trenes dotados de dos plataformas de acceso para usarlos como trenes de cercanías y como tranvías al entrar en la ciudad y el sistema estaría destinado al transporte tanto de personas como de mercancías. El diseño incluía la construcción de la segunda línea del tranvía (este-oeste) con un recorrido similar al de la propuesta del PSOE (A1), a la que se la dotaría del ancho ibérico, para conectarla sin costes añadidos al ferrocarril. Se planteaba aprovechar las líneas existentes para trazar una comunicación en red con 6 líneas que tendría dos centros neurálgicos, Huesca y Zaragoza. Las líneas se irían completando en distintas fases y quedarían conectadas tanto localidades cercanas a la capital como otras más distantes. El presupuesto estimado para 10 convoyes era de 60 millones de euros.

La cuarta alternativa, *A4: no hacer nada*, supondría mantener la situación actual, con una línea de tranvía (norte-sur) y líneas de autobuses urbanos que se complementan y entre las que se pueden realizar transbordos. Evidentemente, esta opción es la que menor coste supone.

El problema de selección de la mejor estrategia de movilidad se modelizó mediante una jerarquía (figura 15.1) consistente en tres criterios, nueve subcriterios o atributos (3 para cada criterio) y cuatro alternativas. Los criterios son: ECONómico, SOCial y AMBiental. Los subcriterios son: INVersión, MANtenimiento y OAE (otros atributos económicos) para el criterio económico; POBlación, CONfort y OAS (otros atributos sociales) para el criterio social; e IMPacto, REVersibilidad y OAA (otros atributos ambientales) para el criterio ambiental. Finalmente, las cuatro alternativas son: A1: Línea 2 del tranvía (PSOE); A2: TranBus (PP); A3: AraTren (CHA) y A4: No hacer nada.

Esta experiencia se realizó siguiendo la propuesta de la e-Cognocracia (Moreno-Jiménez y Polasek, 2003; Moreno-Jiménez, 2006; Moreno-Jiménez *et al.*, 2014), distinguiendo dos rondas de votaciones

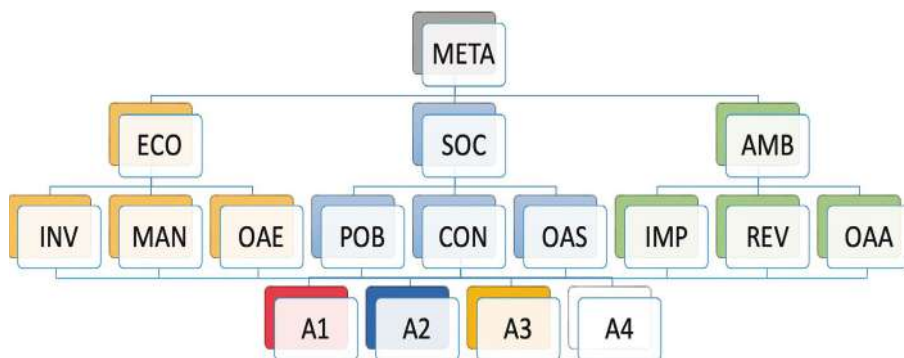


Figura 15.1. Jerarquía del problema

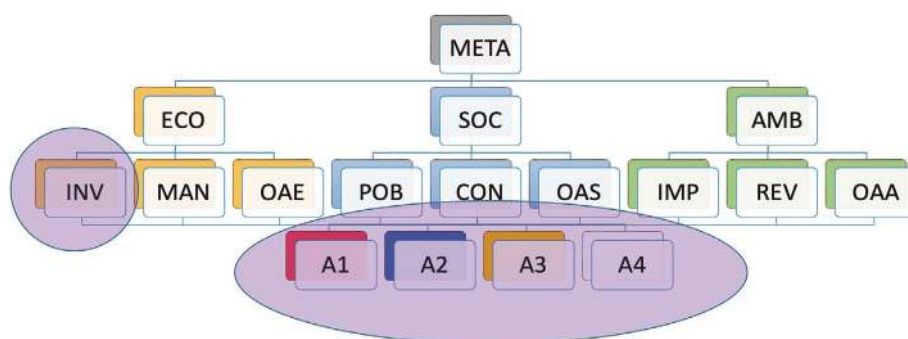


Figura 15.2. Contexto local considerado (atributo INVersión)

en las que los participantes emitieron sus preferencias sobre las alternativas consideradas. Entre las dos votaciones se implementó un foro en el que los alumnos incorporaron los argumentos que sustentaban las distintas posiciones.

Con la finalidad de facilitar la comprensión del procedimiento propuesto, se contemplan exclusivamente los datos de la primera ronda correspondientes al atributo INVersión (figura 15.2).

En total se dispone de los juicios y prioridades de 22 individuos (tabla 15.1).

Tabla 15.1. Juicios y prioridades para el atributo INVersión

Decisor	Juicios						Prioridades			
	a12	a13	a14	a23	a24	a34	w1	w2	w3	w4
D1	1/3	1	1/3	3	1/3	1/3	0,122	0,277	0,122	0,480
D2	1/3	1/2	1/5	3	1/4	1/3	0,083	0,239	0,134	0,543
D3	1/5	1/3	1/2	3	2	1/3	0,088	0,483	0,157	0,272
D4	4	4	5	1	1	1/3	0,585	0,138	0,105	0,172
D5	3	5	1	3	1/3	1/4	0,398	0,154	0,073	0,376
D6	2,618	5	1/6	2,636	1/7	1/8	0,189	0,096	0,049	0,666
D7	1/5	1/4	1/7	1,5	1/3	0,3	0,054	0,233	0,176	0,537
D8	1/3	4	1/5	5	1/3	1/7	0,126	0,262	0,051	0,561
D9	5	0,284	5	1/5	1,5	6	0,286	0,087	0,560	0,068
D10	5	8	5	3	2	1	0,646	0,180	0,078	0,097
D11	1/3	1/3	1	3	3	3	0,122	0,480	0,277	0,122
D12	1/5	1/7	1/9	3	1/2	1/4	0,042	0,291	0,154	0,513
D13	1/2	1/3	1/4	1/2	1/3	1/2	0,095	0,160	0,278	0,467
D14	1/2	1/7	1/2	1/9	2	9	0,065	0,122	0,727	0,086
D15	1/6	1/3	1/9	4	1/3	1/6	0,046	0,275	0,097	0,583
D16	1/3	1/2	1/6	3	1/4	1/6	0,072	0,216	0,102	0,610
D17	1/3	2/3	1/7	2	1/3	1/5	0,078	0,219	0,115	0,589
D18	1/5	3	1/6	6	1/3	1/9	0,091	0,287	0,045	0,576
D19	1/3	1/2	1/9	3	1/9	1/9	0,052	0,141	0,074	0,733
D20	1/5	2/5	1/9	2	1/6	1/6	0,048	0,179	0,106	0,667
D21	1/6	1/3	1/9	4	1/3	2/9	0,047	0,284	0,108	0,561
D22	1/5	1/3	1/9	3	1/4	1/7	0,047	0,221	0,098	0,634

## 2.2. Identificación de grupos o clústeres

Para determinar el número de clústeres, se ha aplicado el algoritmo de las k-medias para diferentes valores de  $N_c$  (empleando para ello la librería scikit-learn de Python), obteniendo la curva de Elbow, en la que se representa la función objetivo obtenida (suma de los GCOMPIS de cada grupo) frente al número de clústeres:

Número de Clústeres	Suma de GCOMPIS
1	169,31
2	92,60
3	58,51
4	43,02
5	31,94
6	25,75
7	19,91
8	15,67
9	12,54
10	9,68

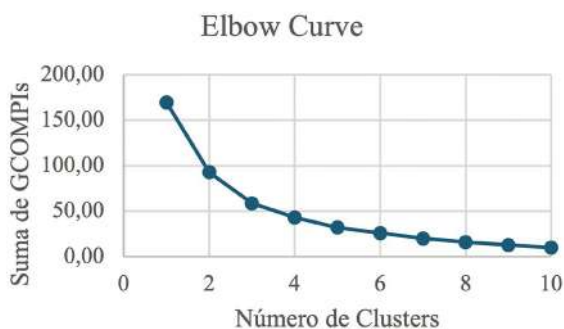


Figura 15.3. Curva de Elbow

Se aprecia que el descenso de la función objetivo global se ralentiza a partir de 4 o 5 clústeres, siendo este un argumento para determinar el número óptimo de clústeres. En lo que sigue, se han analizado dos situaciones: 4 y 5 grupos.

En el primer caso (4 clústeres), se han identificado (tabla 15.2) los siguientes rankings:

Tabla 15.2. *Rankings* para los cuatro clústeres

4 Clústeres	C1:	C2:	C3:	C4:
	13 decisores	3 decisores	3 decisores	3 decisores
4231	(D1, D2, D7, D12, D13, D15, D16, D17, D19, D20, D21, D22)			
2431	1(D3)			
1423		2(D4,D5)		
1243		1(D10)		
4123			1(D6)	
4213			1(D18)	
4231			1(D8)	
2314				1(D11)
3124				1(D9)
3241				1(D14)

En el segundo caso (5 clústeres), se han identificado (Tabla 15.3) los siguientes *rankings*:

Tabla 15.3. *Rankings* para los cinco clústeres

5 Clústeres	C1:	C2:	C3:	C4:	C5:
	12 decisores	3 decisores	3 decisores	2 decisores	2 decisores
4231	(D1, D2, D7, D12, D13, D15, D16, D17, D19, D20, D21, D22)				
1423		2(D4,D5)			
1243		1(D10)			
4123			1(D6)		
4213			1(D18)		
4231			1(D8)		
3124				1(D9)	
3241				1(D14)	
2431					1(D3)
2314					1(D11)

La evolución de una situación a otra se nota más claramente en la [tabla 15.4](#). Como se ve, los dos únicos decisores que modifican su posición son el D3 y D11. El primero de estos decisores pasa del clúster C1 al C5, mientras que el segundo lo hace del C4 al C5.

Tabla 15.4. Clústeres y rankings de cada decisor

Decisor	Ranking	4 Clústeres	5 Clústeres
1	423=1	1	1
2	4231	1	1
3	2431	1	5
4	1423	2	2
5	1423	2	2
6	4123	3	3
7	4231	1	1
8	4231	3	3
9	3124	4	4
10	1243	2	2
11	231=4	4	5
12	4231	1	1
13	4321	1	1
14	3241	4	4
15	4231	1	1
16	4231	1	1
17	4231	1	1
18	4213	3	3
19	4231	1	1
20	4231	1	1
21	4231	1	1
22	4231	1	1

Para evaluar la calidad de la partición efectuada, esto es, para garantizar que se ha elegido un número apropiado de clústeres, se utilizan los valores de la silueta (Silhouette). El valor de la silueta es una medida, asociada a cada elemento, que indica su similaridad con los

elementos de su propio grupo en relación con la similitud con elementos de grupos vecinos.

Su valor oscila entre -1 y 1. Valores cercanos al 1 indican una buena clasificación del elemento dentro de su grupo, mientras que valores negativos son síntoma de una mala clasificación de dicho elemento. Para una clasificación en n.º clústeres, se puede dar el valor global de silueta calculado como la media de los valores de cada elemento:

Tabla 15.5. Valor de la silueta para diferente número de clústeres

n	Silueta
3	0.4861
4	0.4014
5	0.4089
6	0.4008

El valor medio de la silueta es ligeramente mayor para n=3, siendo similares para n=4, 5, 6. Si representamos los valores para cada elemento, obtenemos las siguientes gráficas (para ello hemos utilizado Orange):

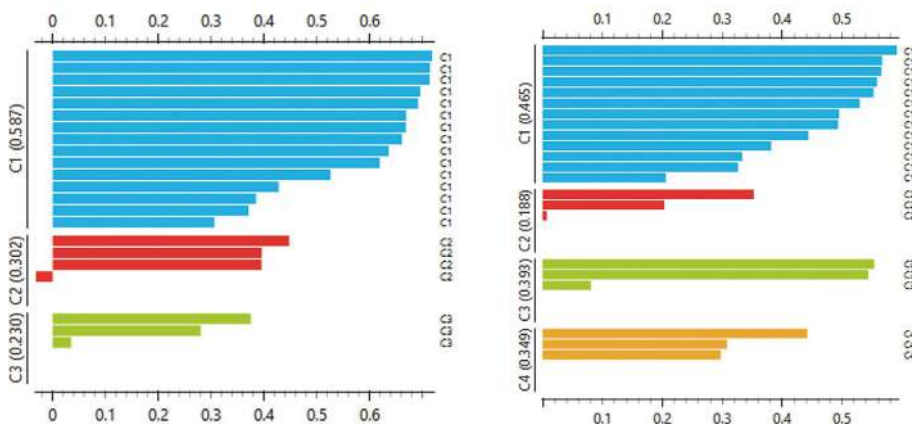


Figura 15.4. Siluetas para 3 y 4 clústeres

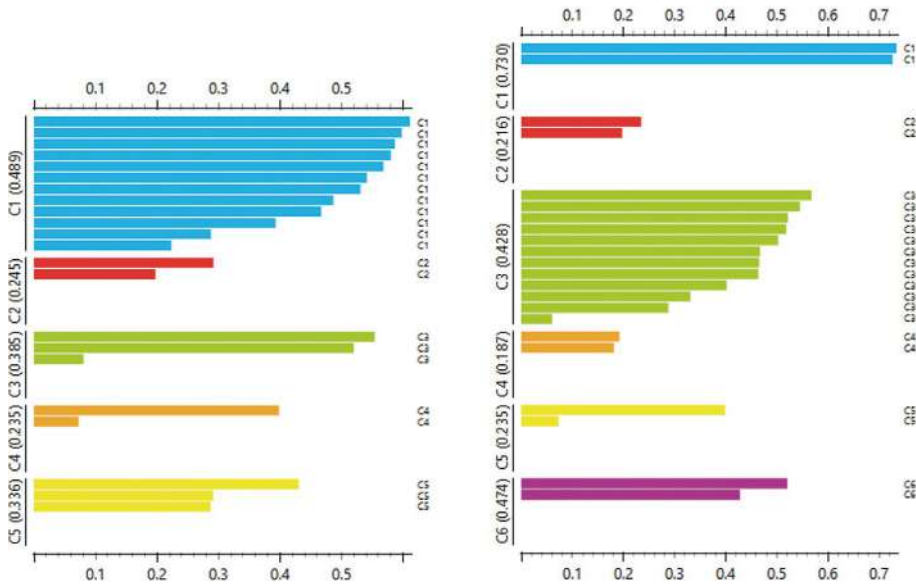


Figura 15.5. Siluetas para 5 y 6 clústeres

Para 3 clústeres se aprecia que en uno de ellos (clúster en rojo) hay un elemento con un valor negativo para la silueta, indicativo de una clasificación no demasiado buena. Para  $n=4$ , ese elemento ha mejorado su silueta, pero con un valor muy cercano a cero.

Finalmente, se muestran las siluetas para  $n=5$  y  $n=6$ , donde se aprecia que todos los elementos presentan valores positivos y, en ningún caso, tan cercanos a cero como el caso anterior.

### 2.3. EXPLOTACIÓN Y NEGOCIACIÓN

Como se ha mencionado, los dos decisores que cambian al pasar de 4 a 5 clúster son D3 y D11. Ambos decisores son los únicos para los que la mejor opción es la alternativa 2. No obstante, en los dos casos, con pequeñas modificaciones en el juicio que directamente compara las dos primeras alternativas, se obtendría un cambio de rango entre ambas.

Para el decisor 3 (D3), basta cambiar el juicio  $a_{24}$  de 2 a  $1/2$  y el  $a_{14}$  de  $1/2$  a  $1/3$  para mantener una inconsistencia aceptable y que cambie el rango de 2431 a 4231. A su vez, para el D11, basta pasar el juicio  $a_{23}$  de 3 (ligero) a 1 (igual) para que la alternativa 3 ocupe la primera posición, empatada con la 2 ( $3=214$ ). De esta forma, solo aparecen

tres opciones como las mejores: la A1 apoyada por tres decisores (4, 5 y 10), la A3 apoyada por otros tres decisores (9, 11, 14) y la A4 apoyada por el resto de los decisores (16 en total).

Una vez justificado que conviene considerar 4 o 5 clústeres, el siguiente paso sería determinar el centroide de cada uno de los clústeres. Hay muchos procedimientos para obtener el centroide. En este caso se consideran tres métodos: AIJ –*Aggregation of Individual Judgements*– (Aguarón *et al.*, 2023a); PCCM –*Precise Consistency Consensus Matrix*– (Escobar *et al.*, 2015); SIC2 –*Simultaneous Improvement of inConsistency and inCompatibility*– (Aguarón *et al.*, 2025).

El procedimiento AIJ proporciona una matriz colectiva para cada clúster en la que cada elemento de esta se obtiene como la media geométrica de los juicios individuales correspondientes a la misma posición. Esta matriz colectiva es la de menor incompatibilidad con la distancia GCOMPI2. La PCCM es una PCM en la que cada juicio pertenece al intervalo de valores en el que todos los decisores son simultáneamente consistentes en sus matrices iniciales; es un procedimiento para mejorar la inconsistencia. Por último, la SIC2 es un procedimiento que mejora simultáneamente la inconsistencia y la incompatibilidad de la matriz colectiva (la PCCM en nuestro caso). En Aguarón *et al.* (2025) puede verse cómo evaluar la eficiencia de la mejora tanto en inconsistencia como en incompatibilidad.

Los valores de la inconsistencia (GCI) y la incompatibilidad (GCO) para tres procedimientos de síntesis considerados (AIJ, PCCM, SIC2) y las dos situaciones contempladas (n=4 y n=5) pueden verse, respectivamente, en las dos siguientes tablas (tabla 15.6 y Tabla 15.7).

Tabla 15.6. Valores del GCI y del GCO para cuatro clústeres

4 clusters	GCI & GCO	AIJ	PCC	SIC2
C1:	C1_GCI	0,1113	0,0086	0,0007
13 restantes	C1_GCO	0,5769	0,6273	0,6082
C2:	C2_GCI	0,0195	0,0178	0,0043
{4,5,10}	C2_GCO	0,6436	0,8235	0,7678
C3:	C3_GCI	0,1600	0,0097	0,0066
{6,8,18}	C3_GCO	0,6872	0,7499	0,7437
C4:	C4_GCI	0,0301	0,0298	0,0141
{9,11,14}	C4_GCO	1,6416	1,6575	1,6445

Tabla 15.7. Valores del GCI y del GCO para cinco clústeres

5 clusters	GCI & GCO	AIJ	PCC	SIC2
C1:	C1_GCI	0,1182	0,0368	0,0131
12 restantes	C1_GCO	0,4759	0,5724	0,5306
C2:	C2_GCI	0,0195	0,0178	0,0043
{4,5,10}	C2_GCO	0,6435	0,8234	0,7678
C3:	C3_GCI	0,1600	0,0097	0,0066
{6,8,18}	C3_GCO	0,6872	0,7499	0,7437
C4:	C4_GCI	0,0450	0,0066	0,0002
{9,14}	C4_GCO	1,0176	1,0366	1,0225
C5:	C4_GCI	0,1108	0,0012	0,0002
{3,11}	C4_GCO	0,5886	0,6498	0,6370

En todos los casos puede apreciarse que, a pesar de estar justificada la calidad de las particiones, la incompatibilidad de los clústeres no es muy buena. La no existencia, por el momento, de umbrales que permitan directamente confirmar una incompatibilidad aceptable suele llevar a considerar otras vías indirectas para establecer esos umbrales; en particular la G de Garuti (Garuti y Salomon 2012).

## CONCLUSIONES

La relevancia del factor humano en la sociedad del conocimiento, su mayor información, formación e implicación de los individuos en las decisiones colectivas y el potencial de las herramientas colaborativas y las redes sociales en la sociedad de las inteligencias artificiales, aprovechando el desarrollo de la tecnología de la información y de las comunicaciones, requieren el desarrollo de herramientas decisionales que ayuden a los individuos a tomar decisiones y resolver problemas en situaciones complejas caracterizadas por la existencia de múltiples escenarios, actores y criterios, tanto tangibles como intangibles.

Habitualmente, en este tipo de contextos la posición colectiva suele obtenerse como una síntesis de las posiciones individuales

mediante alguno de los procedimientos u operadores existentes. Ahora bien, estos procedimientos de síntesis solo son válidos si los elementos considerados presentan poca variabilidad o incompatibilidad, esto es, si las posiciones individuales están suficientemente próximas a la colectiva. Caso de apreciar incompatibilidades entre ellos, es preferible identificar grupos homogéneos (clústeres) de decisores y caracterizar sus posiciones y decisiones.

Estas ideas se han aplicado a una experiencia real relativa a la selección multicriterio de la mejor alternativa para el transporte público de Zaragoza en el futuro. En este caso los decisores han sido 22 alumnos de cuarto curso de la asignatura «Gobierno Electrónico y Decisiones Públicas» de la Facultad de Economía de la Universidad de Zaragoza y las alternativas han sido las presentadas por tres partidos políticos: A1 (PSOE), A2 (PP), A3 (CHA) y A4 (no hacer nada).

Obviamente, el resultado puede presentar sesgos por la edad, formación y motivación (asignatura) de los actores (alumnos de 4º año). No obstante, la mayor contribución del trabajo es la metodología seguida para el estudio. Esta metodología puede extenderse de manera natural a otras muchas situaciones en las que interviengan numerosos decisores y se trabaje con aspectos tangibles e intangibles.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza (GDMZ), grupo investigador del Gobierno de Aragón (Ref.: S35\_23R), y por el proyecto «Codecisión Cognitiva y Colaborativa. Aplicaciones en Salud» (Ref.: PID2022-139863OB-I00), del Programa de Generación del Conocimiento 2022 del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023. Ministerio de Ciencia e Innovación (España).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguarón, J., Altuzarra, A., Escobar, M. T., Moreno-Jiménez, J. M., Navarro, J. y Turón, A. (2023a): «Grupos de actores homogéneos en AHP-GDM», *XL Congreso SEIO*. Elche, 7-10 noviembre 2023.
- Aguarón, J., Escobar, M. T. y Moreno-Jiménez, J. M. (2021): «Reducing inconsistency measured by the geometric consistency index in the Analytic Hierarchy Process», *European Journal of Operational Research*, 288, 576-583.

- Aguarón, J., Escobar, M. T. y Moreno-Jiménez, J. M. (2023b): «Reducing incompatibility in a local AHP- Group decision making», *Annals of Operations Research*, 326(1), 1-26.
- Aguarón, J., Escobar, M. T. y Moreno-Jiménez, J. M. (2025): *A framework for the joint improvement of inconsistency and incompatibility in Group Decision Making with the Analytic Hierarchy Process* (en evaluación).
- Aguarón, J., Escobar, M. T., Moreno-Jiménez, J. M. y Turón, A. (2020): «The triads geometric consistency index in AHP-pairwise comparison matrices», *Mathematics*, 8(6), 926.
- Aguarón, J., Escobar, M. T., Moreno-Jiménez, J. M. y Turón, A. (2022): «Geometric compatibility indexes in a local AHP-Group decision making context: A framework for reducing incompatibility», *Mathematics*, 10(2), 278.
- Aguarón, J. y Moreno-Jiménez, J. M. (2003): «The geometric consistency index. Approximated thresholds», *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137-145.
- Escobar, M. T., Aguarón, J. y Moreno-Jiménez, J. M. (2015): Some extensions of the precise consistency consensus matrix. *Decision Support Systems* 74, 67-77.
- Escobar, M. T., Aguarón, J. y Moreno-Jiménez, J. M. (2016): «Selección multicriterio de una estrategia de movilidad en la ciudad de Zaragoza», en S. Murgui, J. M. Pavía, A. Casino y B. García-Cárceles (eds.), *Dato, Información y Conocimiento en Economía. Anales de Economía Aplicada XXX*, 900-910.
- Escobar, M. T., Aguarón, J., Moreno-Jiménez, J. M. y Turón, A. (2023): «A decision support system for improving the inconsistency in AHP», *International Journal of Decision Support System Technology*, 15(2), 1-16.
- Garuti, C. y Salomon, V. (2012): «Compatibility indices between priority vectors», *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 4, 152.
- Moreno-Jiménez, J. M. (2006): «E-cognocracia: Nueva sociedad, nueva democracia. *Applied Economics Studies* 24(1-2), 559-581.
- Moreno-Jiménez, J. M., Pérez Espés, C. y Velázquez, M. (2014): «E-Cognocracy and the design of public policies», *Government Information Quarterly*, 31, 185-194.
- Moreno-Jiménez, J. M. y Polasek, W. (2003): «E-Democracy and knowledge. A multicriteria framework for the new democratic era», *Journal Multi-criteria Decision Analysis*, 12, 163-176.
- Moreno-Jiménez, J. M. y Vargas, L. G. (2018): «Cognitive multicriteria decision making and the legacy of the Analytic Hierarchy Process», *Applied Economics Studies*, 36(1), 67-79.
- Saaty, T. L. (1980): *Multicriteria decision making: The Analytic Hierarchy Process*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1996): *The Analytic Network Process*. Pittsburg: RSW Publications.
- Turón, A., Aguarón, J., Escobar, M. T. y Moreno-Jiménez, J. M. (2019): «A decision support system and some visualisation tools for AHP-GDM», *International Journal Decision Support System Technology*, 11(1), 1-19.

Vargas, L. G., Moreno-Loscertales, C. y Moreno-Jiménez, J. M. (2023): «Conflict resolution in the era of cognitive multicriteria decision making: an AHP-retributive approach», *International Transactions in Operational Research*, 30(3), 1453-1478.



# Una aproximación multicriterio para la apertura/cierre del tráfico aéreo español en la prevención de la expansión de pandemias

ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN  
*Universidad Politécnica de Madrid*

GABRIEL A. PEÑA DELFÍN  
*Universidad Politécnica de Madrid*

ALFONSO MATEOS CABALLERO  
*Universidad Politécnica de Madrid*

JOSEFA Z. HERNÁNDEZ DIEGO  
*Universidad Politécnica de Madrid*

CARLOS J. PÉREZ SÁNCHEZ  
*Universidad de Extremadura*

## INTRODUCCIÓN

El transporte aéreo permite recorrer grandes distancias y conectar regiones y países en cuestión de horas. Esta conectividad puede conducir a la rápida propagación de enfermedades infecciosas (Hufnagel *et al.*, 2004; Tatem *et al.*, 2006; Bajardi *et al.*, 2011).

Los principales aeropuertos internacionales son centros neurálgicos del transporte aéreo, por los que pasan miles de viajeros cada

día, y que pueden convertirse en focos de introducción y propagación de enfermedades infecciosas. Un brote en un aeropuerto puede propagarse rápidamente a otros lugares a medida que los viajeros se conectan a diversos destinos. Los viajes en avión, además, permiten que estas personas contagien la enfermedad a otras sin saberlo, lo que dificulta la detección y contención de los brotes.

Aunque los aeropuertos suelen aplicar medidas de control sanitario, como controles de temperatura y cuestionarios, pueden no ser eficaces para identificar a las personas infectadas, sobre todo si son asintomáticas o presintomáticas. Muchas enfermedades infecciosas tienen periodos de incubación relativamente largos, durante los cuales es posible que las personas aún no presenten síntomas o no tengan fiebre. Esta proximidad (en aeropuertos y aviones) puede aumentar el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas, especialmente virus respiratorios como el de la gripe y el COVID-19.

El potencial de transmisión del síndrome respiratorio agudo severo (SARS) en aviones comerciales se ha estudiado en Olsen *et al.*, 2005, subrayándose la importancia de aplicar medidas para identificar y aislar a las personas potencialmente infecciosas durante los viajes aéreos, así como de mantener buenas prácticas de higiene respiratoria para reducir el riesgo de transmisión de enfermedades en los vuelos.

Hay que tener en cuenta que el transporte aéreo en sí no es el único factor de propagación de una pandemia. Otros factores, como la densidad de población, las infraestructuras sanitarias, las medidas de salud pública y los comportamientos individuales, también desempeñan un papel importante. Sin embargo, el transporte aéreo puede actuar como acelerador, facilitando la rápida propagación de enfermedades infecciosas en todo el mundo.

Es esencial desarrollar herramientas analíticas y de las tecnología de la información y la comunicación (TICs) para gestionar la propagación de pandemias a través del tráfico aéreo de pasajeros. Esto implica establecer sistemas de alerta temprana que puedan detectar la aparición de pandemias lo antes posible y aplicar procedimientos de respuesta inmediata para prevenir o, como mínimo, controlar la propagación de pandemias.

Las *redes dinámicas* (Chen *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2021) y el *análisis de redes* (Watts y Strogatz, 1998; So *et al.* 2020; de Souza *et al.*, 2021) son dos de las metodologías más utilizadas para detectar señales de alerta temprana basadas en casos diarios confirmados de COVID-19 y en información sobre el tráfico aéreo. En Fragua *et al.* (2023) se realiza un análisis comparativo en un contexto europeo

utilizando datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y *Flightradar24* entre el 15 de febrero y el 1 de mayo de 2020. El estudio concluye que varias combinaciones de métodos basados en el análisis de redes dan buenos resultados, pudiendo predecir la evolución de la pandemia con unos 20 días de antelación basándose en el tráfico aéreo de pasajeros.

Por otro lado, los gobiernos pueden aplicar restricciones al tráfico aéreo de pasajeros y a los cierres fronterizos para mitigar la propagación de la enfermedad. En Chinazzi *et al.* (2020) se investiga el impacto de las restricciones a los viajes en la propagación del COVID-19. El estudio se centra en las primeras fases de la pandemia y examina cómo influyeron las restricciones de viaje en la transmisión del virus. Sugiere que las restricciones a los viajes aplicadas durante las primeras fases de la pandemia de COVID-19 desempeñaron un papel limitado pero importante a la hora de retrasar la propagación del virus dentro y desde China. En Wells *et al.* (2020) se examina la influencia de los viajes internacionales y las medidas de control fronterizo en la propagación del nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) responsable de COVID-19.

Un cierre completo del tráfico aéreo podría ralentizar la propagación, pero las repercusiones globales de tal medida serían enormes, tanto económica como socialmente. A lo largo de la pandemia de COVID-19, algunos países cerraron temporalmente su tráfico aéreo con otros dependiendo del estado de la pandemia en esos países. Sin embargo, el nivel de incidencia de la pandemia no fue homogéneo en todos los países, y regiones con un nivel bajo pudieron verse afectadas negativamente, por lo que parece necesario tomar decisiones inteligentes a un nivel más fino/detallado, concretamente en lo que respecta a las conexiones aéreas entre aeropuertos.

Se trata de integrar en modelos formales el riesgo epidemiológico de importación de la pandemia y los impactos económicos y sociales asociados a las decisiones tomadas en materia de tráfico aéreo, lo que constituye un problema de optimización donde se deben tener en cuenta de forma simultánea distintos objetivos que son conflictivos entre sí (Jiménez-Martín *et al.*, 2023).

En este trabajo se aborda este problema de optimización, en el que pueden abrirse o cerrarse las conexiones internacionales con los aeropuertos de destino de un determinado país durante un cierto periodo de tiempo teniendo en cuenta los impactos epidemiológicos, económicos y político-sociales asociados.

Para ello, se han considerado siete objetivos. Cinco de ellos tienen una naturaleza económica. Los dos primeros se centran en

minimizar el porcentaje de ingresos perdidos en las zonas de influencia de los aeropuertos de destino (pérdidas comerciales y turísticas) y las pérdidas aeroportuarias (tasas) debidas al no aterrizaje de aeronaves.

A estos dos objetivos hay que sumar tres más en los que propone que las pérdidas ocasionadas por el cierre de tráfico aéreo en los aeropuertos y sus zonas de influencia y en las compañías aéreas sea lo más homogéneo/equitativo posible. Por ejemplo, el porcentaje de pasajeros perdidos por las distintas compañías aéreas debería ser similar.

También se consideran dos objetivos sociales: minimizar el porcentaje de pasajeros que pierden sus vuelos y la pérdida de conectividad en la red de tráfico aéreo.

El impacto epidemiológico no se considera un objetivo, sino una restricción, ya que se establece que la solución óptima debe alcanzar un porcentaje de reducción del riesgo de importación de pandemias (en los aeropuertos de destino). Este porcentaje de reducción del riesgo será establecido por la autoridad competente.

Además, algunas decisiones sociopolíticas también podrían restringir el espacio de soluciones. Por ejemplo, podría establecerse un nivel mínimo de tráfico con determinados países o capitales de la UE o del resto del mundo en el periodo analizado.

El peso de los objetivos considerados juega un papel fundamental en la resolución del problema, siendo asignados por las autoridades competentes. Existen muchos métodos para cuantificar las preferencias de un decisor, que difieren fundamentalmente en el número y tipo de cuestiones que se le plantean al decisor y la información que el mismo debe proporcionar.

Para resolver el problema de optimización resultante (no lineal binario) se propone el uso de una metaheurística de enjambre de partículas binario (BPSO) (Nguyen *et al.*, 2021), que identificará la mejor solución que tenga en cuenta las opiniones de los decisores (solución de compromiso).

Se ha desarrollado e implementado un sistema de ayuda a la decisión en la web (sistema RRPS-PAT) que permite a los decisores parametrizar el problema a resolver (periodo de tiempo, país de análisis, porcentaje de reducción del riesgo objetivo, etc.), cuantificar sus preferencias a partir de varios métodos alternativos, resolver el problema de optimización resultante utilizando la metaheurística BPSO y visualizar/exportar las soluciones.

En la sección 2 se describe en mayor detalle el problema considerado y la modelización del mismo. En la sección 3 se describe la

metodología utilizada para su resolución, incluida la cuantificación de las preferencias los decisores y la metaheurística BPSO. En la sección 4 se ilustra la metodología con un ejemplo sobre el tráfico aéreo español durante el periodo comprendido entre el 24 de septiembre y octubre de 2020, y se describe el sistema RRPS-PAT. Por último, en la sección 6 se presentan algunas conclusiones.

## 1. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA

Consideremos los vuelos internacionales operados por distintas compañías aéreas con destino algún aeropuerto del país analizado (por ejemplo, España) en el periodo de tiempo bajo consideración (por ejemplo, dos semanas), cuyos pasajeros pueden viajar por distintos motivos, principalmente por negocios y turismo.

Las decisiones que se van a tomar sobre la posible cancelación de parte del tráfico aéreo hacia el país analizado se van a tomar sobre las distintas conexiones en cada uno de los días del periodo considerado. Por ejemplo, si se decide cancelar la conexión entre Madrid y París un día en concreto, se cancelarán todos vuelos de París a Madrid que operen dicho día.

Para identificar la solución óptima se tomarán como referencia simultáneamente siete objetivos económicos y sociales conflictivos entre sí.

En primer lugar, se describen los cinco objetivos económicos considerados, que afectan a las compañías aéreas, los aeropuertos y zonas de influencia en las que están situados los mismos:

- Minimizar el porcentaje de ingresos perdidos en la zona de influencia de los aeropuertos de destino ( $Z_1$ ). Se tiene en cuenta la duración media de la estancia y el gasto medio diario de los visitantes por país de origen en función del motivo del viaje (principalmente turismo y negocios).
- Hacer lo más homogénea posible la pérdida de ingresos entre las zonas de influencia de los aeropuertos de destino ( $Z_2$ ). Para ello, se calcula el porcentaje de pérdidas de ingresos en cada una de las zonas de influencia durante el periodo considerado y se calcula su desviación típica, que se deberá minimizar.
- Hacer lo más homogéneas posibles las pérdidas de pasajeros entre las compañías aéreas ( $Z_3$ ). El objetivo es que el porcentaje de pérdidas de pasajeros de las compañías aéreas

sea lo más similar posible, minimizándose la desviación típica de dichos porcentajes.

- Minimizar las pérdidas del aeropuerto de destino debidas a las tasas aeroportuarias que se pierden por la cancelación de vuelos ( $Z_4$ ). Los aeropuertos imponen tasas a las compañías por los aviones que aterrizan en ellos, que debe pagar la compañía aérea que opera el vuelo, y que suelen depender del peso del avión, aunque algunos aeropuertos cobran recargos en función del ruido generado por el avión y de la hora de aterrizaje.
- Hacer lo más homogéneo posible el porcentaje de pérdidas de los aeropuertos ( $Z_5$ ).

A continuación, se describen los dos impactos sociales considerados, teniendo en cuenta la cancelación de vuelos de pasajeros, la pérdida de conectividad aeroportuaria y el impacto en los sentimientos de la población por las decisiones adoptadas:

- Minimizar el porcentaje de pasajeros que pierden sus vuelos por la cancelación de los mismos ( $Z_6$ ).
- Minimizar la pérdida de conectividad de la red de transporte aéreo ( $Z_7$ ). Se tienen en cuenta los datos de conectividad del informe del Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI) Europa que utiliza el método NetScan (ACI Europa, 2023).

En cuanto a las restricciones del problema, la primera de ellas hace referencia al porcentaje de *riesgo de importación pandémica* durante el periodo de tiempo considerado que se desea reducir mediante la cancelación de tráfico aéreo.

El riesgo de importación pandémica en un aeropuerto se obtiene teniendo en cuenta los vuelos internacionales que llegan a dicho aeropuerto desde distintos puntos del planeta en el periodo considerado. Para cada uno de ellos se tendrá a su vez en cuenta la situación epidemiológica de la zona de influencia del aeropuerto origen, el riesgo de contagio en dicho aeropuerto y el riesgo de infección durante el vuelo, que dependerá de la duración del vuelo y de la separación entre pasajeros (en función de la tasa de ocupación de los vuelos).

Para la cuantificación del riesgo de transmisión de virus en aeropuertos se ha propuesto el uso de técnicas de aprendizaje profundo (*deep learning*) y visión por computador (Rodríguez-Escabias, 2023), en concreto de la red YOLO V3. También existen técnicas novedosas para calcular las distancias interpersonales y los contactos cercanos. Además, se ha analizado el cálculo de la probabilidad de que los pasajeros que llegan a un aeropuerto estén infectados a partir de la

información de movilidad de la población obtenida de la geolocalización de terminales móviles en un contexto español con información del *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana* (Carbonell, 2022).

Por otro lado, el estado epidemiológico al final de un vuelo depende del estado epidemiológico al inicio del mismo, de su duración y de las medidas de seguridad adoptadas a bordo, que se calculan mediante el método *susceptible-infeccioso-recuperado* (SIR) (Kermack y McKendrick, 1927). El método SIR propone un sistema de ecuaciones en diferencias que describe la dinámica de transmisión de los virus. Se puede utilizar para analizar la evolución de la infección en vuelo en la aeronave y depende de una serie de parámetros que deben fijarse para el virus considerado (tasa de infección o transmisión de la enfermedad y tasa de recuperación) y el contexto en el que se aplica, es decir, una aeronave en este caso (García *et al.*, 2021).

Por último, determinadas decisiones sociopolíticas podrían también restringir el espacio de resolución de problemas considerado. Por ejemplo, podría establecerse un nivel mínimo de tráfico con determinados países o capitales de la Unión Europea o del resto del mundo en el periodo analizado.

La modelización matemática de los anteriores objetivos y restricciones está disponible en Peña *et al.*, 2024.

## 2. METODOLOGÍA

En la metodología de resolución utilizada el problema de optimización multiobjetivo del que se parte se transforma, en primer lugar, en un problema uniobjetivo mediante la suma ponderada de los distintos objetivos. Todos ellos están expresados en proporciones, por lo que no se requiere un proceso de normalización para su agregación. A continuación, hay que ponderarlos, es decir, asociarles pesos que representen equilibrios entre ellos.

Para este proceso de ponderación se le solicita al decisor que ordene los objetivos de más a menos importante, es decir, un ranking u ordenación de los objetivos. Esta información se transforma en pesos mediante la aplicación del método *sum recíproca* (SR) (Danielson y Ekenberg, 2014), que se ha demostrado que es un método de gran calidad para este contexto (Chergui y Jiménez-Martín, 2024).

Una vez que tenemos el problema uniobjetivo, se aplica una metaheurística para alcanzar la solución, en concreto, binary particle

swarm optimization (BPSO, Nguyen *et al.*, 2021), una extensión del algoritmo tradicional de optimización por enjambre de partículas PSO a problemas binarios. PSO es una metaheurística basada en poblaciones inspirada en el comportamiento social de las bandadas de pájaros y los bancos de peces.

La idea básica del BPSO es la siguiente. La primera población de partículas se genera aleatoriamente y cada partícula tiene una velocidad y una posición en el espacio de solución. La velocidad determina la dirección y la magnitud del movimiento de la partícula. La velocidad y la posición de cada partícula se actualizan en función de su posición anterior más conocida y de la mejor posición conocida de cualquier partícula de toda la población.

Las fórmulas de actualización incorporan la inercia, factores cognitivos personales y factores sociales para guiar a las partículas hacia mejores soluciones.

Dado que BPSO trabaja con soluciones binarias, existen mecanismos adicionales para gestionar la representación binaria. Por ejemplo, puede utilizarse un umbral para convertir las posiciones de valor real en valores binarios.

El algoritmo actualiza iterativamente las posiciones de las partículas hasta que se cumple un criterio de terminación. La mejor solución encontrada durante el proceso de optimización, normalmente la mejor posición global, se considera la solución final optimizada del problema.

### 3. EJEMPLO ILUSTRATIVO

En esta sección se ilustra la metodología propuesta con la pandemia COVID-19 en un contexto español, implicando a los 38 aeropuertos españoles con tráfico aéreo internacional durante un periodo de dos semanas, del 24 de septiembre de 2020 al 7 de octubre de 2020.

Esto supone 5.000 conexiones con 9.678 vuelos desde 237 aeropuertos internacionales a aeropuertos españoles. Los aeropuertos con mayor número de conexiones son los aeropuertos Adolfo Suárez Madrid-Barajas (820), Josep Tarradellas-El Prat Barcelona (767), Palma de Mallorca (641) y Málaga-Costa del Sol (610).

Para el análisis, se utilizó una base de datos orientada a grafos (*Neo4J*) con información sobre vuelos, datos de ocupación de aeronaves, información sobre la incidencia global de la pandemia y datos de conectividad, véase la [figura 16.1](#).

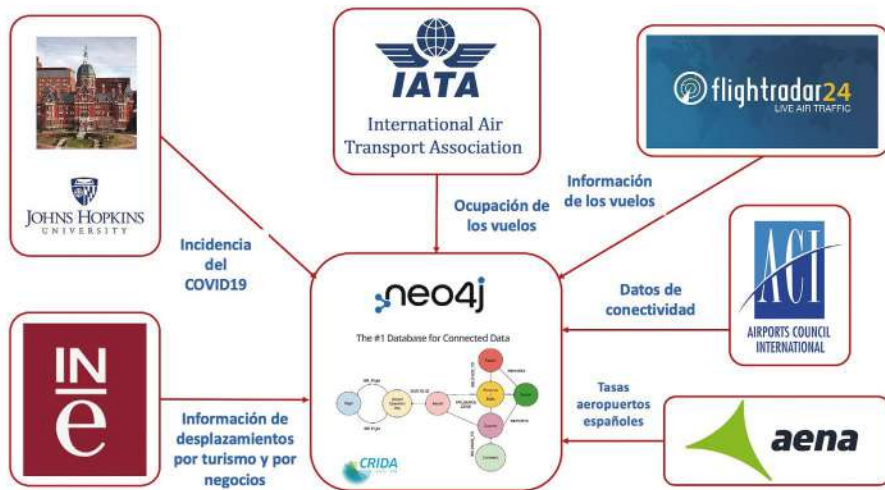


Figura 16.1. Información utilizada en el ejemplo ilustrativo

Los datos de incidencia de COVID19 en las fechas consideradas y para las regiones en las que están localizados los aeropuertos origen se obtuvieron de los datos publicados por la *Universidad Johns Hopkins*, la información de los vuelos de la empresa sueca *Flightradar24*, la ocupación de los mismos de la *Asociación Internacional de Tráfico Aéreo (IATA)* y los datos de conectividad del tráfico aéreo de la *ACI (Airports Council International)*.

A esta base de datos se incorporó información sobre las tasas aeroportuarias españolas disponibles en [www.aena.es/es/aerolineas/tarifas.html](http://www.aena.es/es/aerolineas/tarifas.html), que dependen principalmente del peso de las aeronaves. No obstante, algunos aeropuertos (Alicante-Elche, Barcelona-El Prat, Bilbao, Gran Canaria, Ibiza, Adolfo Suárez-Madrid Barajas, Málaga-Costa del Sol, Palma de Mallorca, Sevilla, Tenerife Norte, Tenerife Sur o Valencia) cobran más en función del nivel de ruido del avión y de la hora de aterrizaje.

Además, se incorporó información del *Instituto Nacional de Estadística (INE)* sobre el gasto medio de un pasajero que llega a España en función de su país de origen y del motivo (negocios y ocio/vacaciones/otros) de su visita a España, así como su duración.

En este ejemplo ilustrativo, se consideran 15 escenarios. En primer lugar, se consideran tres niveles diferentes para el porcentaje de reducción del riesgo de importación de COVID-19 en los aeropuertos españoles: 25%, 50% y 75%. El número de conexiones cerradas (y vuelos cancelados) será obviamente mayor en los

escenarios que requieren una mayor reducción del riesgo de importación de pandemias.

Por otro lado, la importancia relativa de los objetivos puede dar lugar a diferentes escenarios. Al haberse considerado información ordinal (una ordenación de los objetivos desde el más importante al menos importante) para representar las preferencias de los decisores, se tienen en cuenta dos situaciones diferentes, en las que los impactos económicos son más importantes que los sociales, y viceversa.

Además, en relación con los impactos sociales, se considera que el porcentaje de pasajeros que pierden sus vuelos ( $Z_6$ ) es más importante que la pérdida de conectividad ( $Z_7$ ) en todos los escenarios. Por otro lado, también se considera que el impacto económico en las zonas de influencia de los aeropuertos de destino es más importante que el impacto en los aeropuertos, que a su vez es más importante que el impacto en las compañías aéreas.

Los 12 escenarios se muestran en la [tabla 16.1](#). De manera adicional, se consideran los *escenarios 1a, 5a y 9a*, que son iguales a los *escenarios 1, 5 y 9*, respectivamente, pero tienen en cuenta una decisión política sobre el tráfico aéreo como una restricción. Esta decisión se refiere a la apertura de cada una de las conexiones con la capital de los países de la UE al menos un día del periodo analizado.

Tabla 16.1. Escenarios identificados con la correspondiente reducción del riesgo de importación e importancia relativa de los objetivos

	% reducción del riesgo de importación de pandemia	Objetivos económicos	Objetivos sociales	Global
Escenario 1	25%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 2	25%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 3	25%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico
Escenario 4	25%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico
Escenario 5	50%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 6	50%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 7	50%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico
Escenario 8	50%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico
Escenario 9	75%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 10	75%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Económico > Social
Escenario 11	75%	$\{Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > Z_5\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico
Escenario 12	75%	$\{Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_5 > Z_3\}$	$\{Z_6 > Z_7\}$	Social > Económico

Los valores de las funciones objetivo de las soluciones óptimas para los distintos escenarios se muestran en la [tabla 16.2](#).

En primer lugar, se observa que los valores de la solución óptima para los siete objetivos correspondientes a los cuatro primeros escenarios son inferiores a los de los cuatro escenarios siguientes y, a su vez, son inferiores a los de los cuatro últimos escenarios. Esto es lógico, ya que una mayor reducción del riesgo de importación de pandemias implica un mayor número de conexiones cerradas y, en consecuencia, mayores repercusiones económicas y sociales.

Llama la atención que el porcentaje de pérdida respecto al objetivo  $Z_7$  (porcentaje de ingresos perdidos en la zona de influencia de los aeropuertos de destino) es muy cercano al 25%, 50% y 75%, si el riesgo de pandemia se reduce en un 25%, 50% y 75%, respectivamente.

Tabla 16.2. Valores óptimos de las funciones objetivo para los distintos escenarios

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$
Escenario 1	24.43%	0.139	0.271	24.94%	0.276	24.18%	23.76%
Escenario 1a	24.51%	0.140	0.275	25.10%	0.280	24.56%	23.34%
Escenario 2	24.50%	0.139	0.272	24.91%	0.265	24.31%	23.70%
Escenario 3	24.91%	0.191	0.281	24.53%	0.288	24.77%	23.88%
Escenario 4	24.93%	0.180	0.298	24.19%	0.265	24.22%	23.68%
Escenario 5	49.33%	0.207	0.318	44.26%	0.326	44.31%	41.00%
Escenario 5a	49.98%	0.229	0.337	45.29%	0.342	45.61%	42.95%
Escenario 6	49.29%	0.206	0.317	43.16%	0.306	43.42%	37.20%
Escenario 7	49.74%	0.220	0.316	43.66%	0.326	44.08%	36.42%
Escenario 8	49.90%	0.221	0.324	43.85%	0.287	44.09%	37.49%
Escenario 9	74.61%	0.277	0.348	71.80%	0.373	70.78%	67.78%
Escenario 9a	74.97%	0.347	0.397	74.63%	0.429	74.49%	69.02%
Escenario 10	74.30%	0.278	0.348	71.30%	0.334	70.43%	66.77%
Escenario 11	74.94%	0.269	0.354	71.26%	0.373	70.52%	64.86%
Escenario 12	74.79%	0.268	0.345	72.19%	0.280	71.02%	67.09%

Un fenómeno similar se observa para los objetivos  $Z_4$  (porcentaje de pérdidas aeroportuarias), con reducciones porcentuales del (24,19; 25,19) %, (43,16; 44,27) % y (71,80; 72,19) % cuando el riesgo de importación de la pandemia se reduce en un 25%, 50% y 75%, respectivamente.

Para el objetivo  $Z_6$  (porcentaje de pasajeros cuyo vuelo se cancela), la reducción porcentual es de aproximadamente 24%, 44% y 70%, mientras que asciende a aproximadamente 23% (36,42; 41,00) % y (64,86; 67,78) %, respectivamente, para  $Z_2$  (porcentaje de pérdida de conectividad).

La diferencia para un porcentaje dado de reducción del riesgo en los escenarios especificados para los objetivos  $Z_1$ ,  $Z_4$  y  $Z_6$  es inferior al 1%. Esto implica que la toma de decisiones es más o menos

irrelevante con respecto a estos objetivos. Lo mismo ocurre con el objetivo  $Z_7$  para un porcentaje de reducción del riesgo del 25%. Sin embargo, si la reducción del riesgo se fija en el 50% y el 75% para  $Z_7$  en los *escenarios 5 y 7*, las diferencias alcanzan un máximo del 4,58% y el 2,94%, respectivamente. Esto podría explicarse por el hecho de que los impactos económicos son más importantes que los impactos sociales en el *escenario 5*, mientras que los impactos sociales se consideran más importantes en el *escenario 7*, donde la reducción para el objetivo social  $Z_7$  es menor (es decir, tiene un mejor valor).

¿Qué ocurre con los otros tres objetivos? Recuérdese que establecen que las pérdidas deben distribuirse por igual entre las zonas de captación ( $Z_2$ ), las aerolíneas ( $Z_3$ ) y los aeropuertos ( $Z_5$ ).

En primer lugar, la dispersión aumenta cuando el porcentaje de reducción del riesgo importado es mayor en los tres casos. Sin embargo, la homogeneidad es mayor (la dispersión es menor) para las zonas de influencia ( $Z_2$ ) que para las compañías aéreas ( $Z_3$ ), que, a su vez, son ligeramente más homogéneas que para los aeropuertos ( $Z_5$ ).

Finalmente, en cuanto al *escenario 1a*, en el que se incorpora una restricción adicional relativa a las conexiones con las capitales de la UE, los resultados son muy similares a los del *escenario 1*. Esto podría explicarse por el hecho de que las conexiones con las capitales de la UE son muy similares a las del *escenario 1a*, cumpliendo la restricción sobre las conexiones con las capitales de la UE, ya que el porcentaje de reducción del riesgo de importación pandémica es del 25%.

La diferencia entre los *escenarios 5 y 5a* y los *escenarios 9 y 9a* radica en que el porcentaje de reducción del riesgo de importación pandémica es ahora del 50% y del 75%, respectivamente. Como consecuencia, se cancela un mayor número de vuelos, lo que lleva a soluciones más diferentes que cuando solo se considera un 25%.

La [tabla 16.3](#) muestra el porcentaje mínimo y máximo de reducción de los ingresos en las zonas de influencia, las pérdidas de pasajeros aéreos y de ingresos en los aeropuertos de destino, respectivamente. Cuanto mayor es la reducción porcentual del riesgo de importación pandémica, mayor es el rango de reducciones porcentuales en los tres casos. Además, los intervalos son más estrechos en el caso de las zonas de influencia que en el de las líneas aéreas y los aeropuertos, como era de esperar en función de la dispersión ( $Z_2$ ,  $Z_3$  y  $Z_5$ ).

Los intervalos para los *escenarios 1a*, *5a* y *9a* son siempre más amplios que para los escenarios en los que no hay restricciones en la conexión con las capitales de la UE. Además, la variabilidad aumenta a medida que se reduce el riesgo de importación pandémica,

es decir, la diferencia entre los intervalos de los escenarios 9 y 9a es mayor que entre los escenarios 5 y 5a, que a su vez es mayor que entre los escenarios 7 y 7a.

Se ha diseñado y desarrollado un sistema web de ayuda a la decisión (*sistema RRPS-PAT, Risk Reduction in Pandemic Spread based on the Management of Passenger Air Traffic*), en el que se ha integrado la base de datos Neo4J con toda la información asociada al problema, que permite parametrizar y resolver el problema de optimización planteado y visualizar los resultados.

Tabla 16.3. Porcentaje mínimo y máximo de reducción de los ingresos en las regiones de influencia, de las pérdidas de pasajeros aéreos y de ingresos en los aeropuertos

	Región de influencia	Aerolíneas	Aeropuertos
Escenario 1	(5.01, 47.81) %	(4.41, 48.02) %	(8.01, 68.11) %
Escenario 1a	(4.85, 48.02) %	(4.30, 48.11) %	(7.95, 68.14) %
Escenario 2	(5.07, 47.90) %	(5.41, 66.04) %	(5.01, 50.17) %
Escenario 3	(5.16, 48.20) %	(4.37, 48.90) %	(7.90, 68.14) %
Escenario 4	(4.96, 47.74) %	(6.68, 67.90) %	(4.62, 49.42) %
Escenario 5	(10.83, 64.26) %	(10.67, 67.08) %	(9.33, 79.29) %
Escenario 5a	(7.96, 66.11) %	(6.20, 70.81) %	(5.92, 81.48) %
Escenario 6	(10.92, 64.41) %	(9.26, 79.02) %	(10.51, 66.95) %
Escenario 7	(10.41, 65.21) %	(10.71, 67.01) %	(9.44, 80.30) %
Escenario 8	(10.60, 64.01) %	(9.29, 79.17) %	(10.83, 68.41) %
Escenario 9	(13.37, 70.77) %	(12.41, 72.75) %	(13.89, 85.01) %
Escenario 9a	(8.31, 76.69) %	(7.53, 79.93) %	(7.60, 90.12) %
Escenario 10	(13.22, 70.54) %	(12.76, 85.61) %	(11.79, 72.10) %
Escenario 11	(12.98, 70.36) %	(12.83, 73.14) %	(12.42, 84.95) %
Escenario 12	(13.43, 71.02) %	(13.03, 84.71) %	(12.31, 73.44) %

Si se desea analizar un determinado escenario, el usuario puede usar el cuadro de diálogo mostrado en la [figura 16.2](#) para parametrizarlo, incluyendo las fechas, el porcentaje requerido de reducción del riesgo de importación pandémica en los aeropuertos de destino (mediante una barra de desplazamiento horizontal), las restricciones sociopolíticas del tráfico aéreo, las preferencias del usuario sobre los objetivos a evaluar y los parámetros asociados a la metaheurística BPSO.

En cuanto a las preferencias del usuario sobre los objetivos evaluados, debe arrastrar y soltar los objetivos económicos y sociales enumerados a la izquierda en las casillas de la derecha para elaborar una clasificación por orden decreciente de importancia.

La [figura 16.3](#) muestra las salidas del sistema RRPS-PAT para el *escenario 7*, incluyendo tanto los valores óptimos de la función

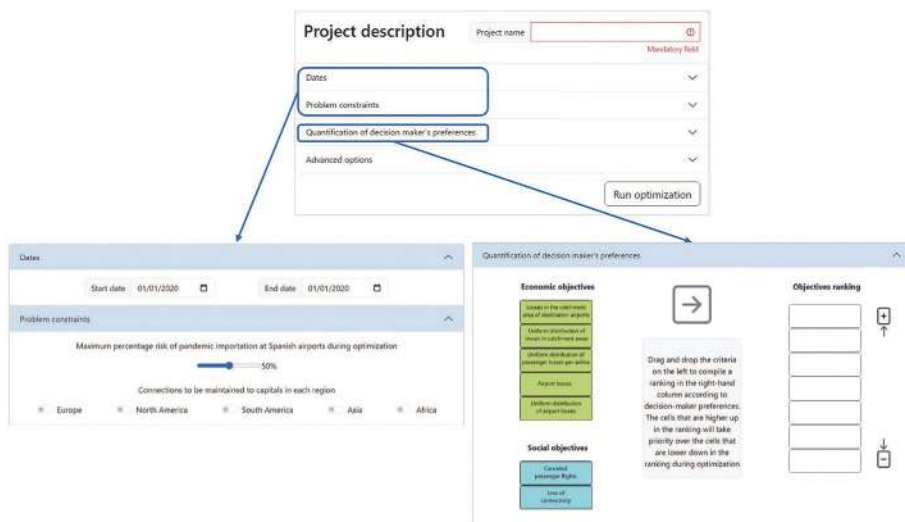


Figura 16.2. Definiendo un escenario en el sistema RRPS-PAT

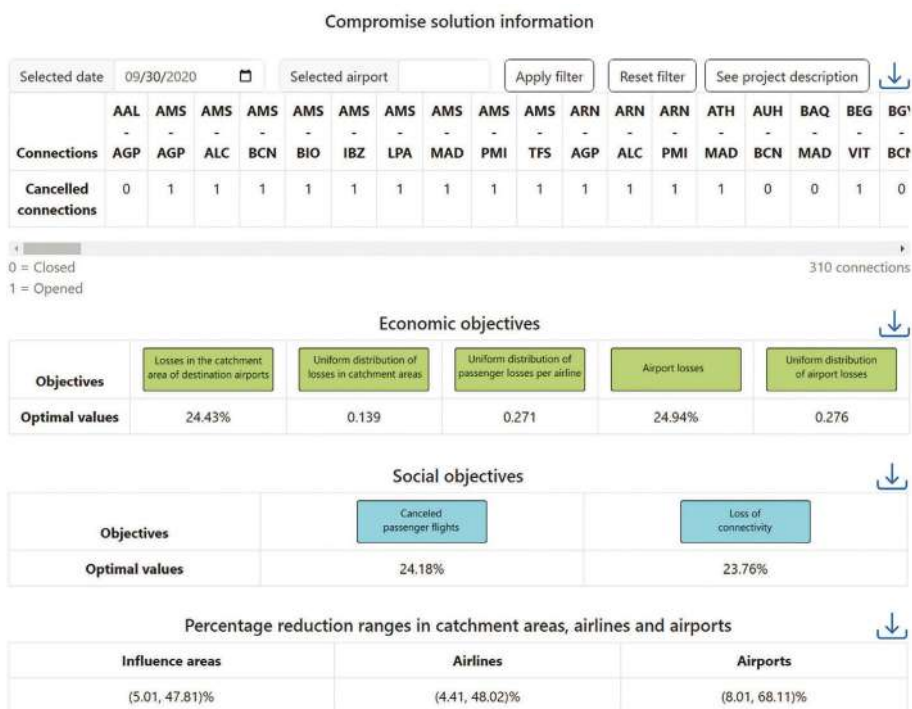


Figura 16.3. Solución de compromiso para el escenario 1

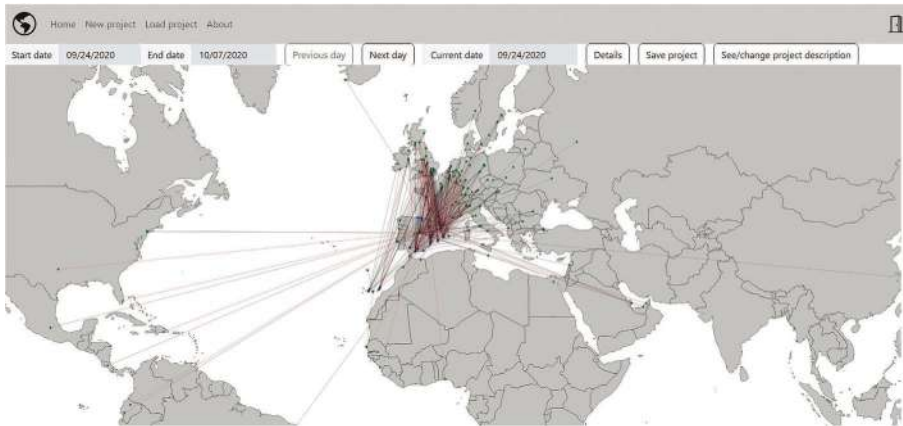


Figura 16.4. Visualización del estado de las conexiones en la solución de compromiso

objetivo para la solución de compromiso como los correspondientes porcentajes de reducción de las áreas de influencia, aerolíneas y aeropuertos, junto con una lista de vuelos especificando su estado, es decir, señalando si han sido cancelados.

Como se muestra en la [figura 16.4](#), la solución de compromiso se puede visualizar en un mapa, donde los nodos azules representan aeropuertos de destino y los verdes aeropuertos de salida. Si la conexión correspondiente entre aeropuertos está en rojo, entonces la conexión está cerrada, mientras que las conexiones en negro permanecen abiertas. Si el usuario pulsa con el ratón en una conexión, aparecerá información sobre los aeropuertos que conecta y el número de pasajeros que viajan en la fecha especificada.

## CONCLUSIONES

Este trabajo aborda un problema de optimización complejo cuyo objetivo es determinar las conexiones internacionales que deben cerrarse para garantizar que el riesgo de importación de pandemias a través del tráfico aéreo de pasajeros en un país se reduzca en un porcentaje especificado durante un periodo de tiempo concreto. Se ha implementado un sistema de ayuda a la decisión (SAD) basado en la web que permite al decisor parametrizar el problema, cuantificar sus preferencias, resolver el problema de optimización y visualizar/exportar la solución de compromiso alcanzada.

El potencial del SAD se ha ilustrado con varios escenarios (con diferentes porcentajes de reducción del riesgo de importación pandémica y preferencias del decisor) centrados en aeropuertos españoles para un periodo de tiempo de dos semanas. El SAD ayuda a los decisores a tomar decisiones inteligentes a nivel de conexión aérea teniendo en cuenta múltiples impactos económicos y sociales.

Como línea futura de trabajo, se pretende sumar a los impactos sociales el impacto que tiene en el sentimiento general de la población las decisiones tomadas sobre el tráfico aéreo, para lo cual se integrará en el sistema RRPS-PAT una herramienta análisis de sentimientos en base al análisis de tweets/mensajes de X que se ha desarrollado en colaboración con la Universidad de Zaragoza (Aguarón *et al.* 2024).

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es parte de los proyectos de I+D+i PID2021-122209OB-C31 y PID2021-122209OB-C32, financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y el proyecto PID2024-155179NB-C22 financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (España).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Europe (2023). *Airport Industry Connectivity Report 2023*. Disponible en <https://www.aci-europe.org/airconnectivity.html/>.
- Aguarón, J., Altuzarra, A., Aznar, R., Escobar, M. T., Jiménez-Martín, A., Mateos, A., Moreno-Díaz, A., Moreno-Jiménez, J. M., Moreno-Loscertales, C., Muerza, V., Navarro, J., Sarango, A., Turón, A. y Vargas, L. (2024): «Mood and emotion assessment for risk reduction of pandemic spread through passenger air transport. A DSS applied to the COVID-19 in the case of Spain», *International Transactions in Operational Research* (en prensa).
- Bajardi, P., Poletto, C., Ramasco, J. J., Tizzoni, M., Colizza, V. y Vespignani, A. (2011): «Human mobility networks, travel restrictions, and the global spread of 2009 H1N1 pandemic» *PLoS One*, 6, e16591.
- Carbonell, J. (2022): *Análisis de la relación de la propagación del COVID-19 con la movilidad de origen y destino aeropuertos* [trabajo fin de máster]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

- Chen, Y., Yang, K., Xie, J., Xie, K., Liu, Z., Liu, R. y Chen, P. (2020): «Detecting the outbreak of influenza based on the shortest path of dynamic city network», *PeerJ*, 8, e9432.
- Chergui, Z., y Jiménez-Martín, A. (2024): «On ordinal information-based weighting methods and comparison analyses», *Information*, 15, 527.
- Chinazzi, M., Davis, J. T., Ajelli, M., Gioannini, C., Litvinova, M., Merler, S. y Vespignani, A. (2020): «The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak», *Science*, 368, 395-400.
- Danielson, M. y Ekenberg, L. (2014): «Rank ordering methods for multi-criteria decisions. En P. Zaraté., G.E. Kersten y J.E. Hernández (eds.)», *Group decision and negotiation. A process-oriented view*. Berlín: Springer International.
- De Souza, D. B., da Cunha, J. T. S., dos Santos, E. F., Correia, J. B., da Silva, H. P., de Lima Filho, J. L., Albuquerque, J. y Santos, F. A. N. (2021): «Using discrete Ricci curvatures to infer COVID-19 epidemic network fragility and systemic risk», *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiments*, 5, 053501.
- Dong, M., Zhang, X., Yang, K., Liu, R. y Chen, P. (2021): «Forecasting the COVID-19 transmission in Italy based on the minimum spanning tree of dynamic region network» *PeerJ*, 9, e11603.
- Fragua, A., Jiménez-Martín, A. y Mateos, A. (2023): «Complex network analysis techniques for the early detection of the outbreak of pandemics transmitted through air traffic», *Scientific Reports*, 13, 18174.
- García, J., Poveda, J., Villasante, O., Sánchez, P., Mateos, A. y Vicente, E. (2021): «On-line platform for the short-term prediction of risk of expansion of epidemics: proof-of-concept based on COVID-19 evolution», 14th *USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, ATM 2021.
- Hufnagel, L., Brockmann, D. y Geisel, T. (2004): Forecast and control of epidemics in a globalized world. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, 15124-15129.
- Jiménez-Martín, A., Mateos, A., Peña, G. A. y Moreno, A. (2023): «A multi-objective approach to deal with international air traffic opening/closing in Spain in an early stage pandemic situation», *Proceedings of the 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, 1062-1067.
- Kermack, W. O. y McKendrick, A. G. (1927): «A contribution to the mathematical theory of epidemics», *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 115, 700-721.
- Nguyen, B. H., Xue, B., Andreae, P. y Zhang, M. (2021): «A new binary particle swarm optimization approach: momentum and dynamic balance between exploration and exploitation», *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51, 589-603.

- Olsen, S. J., Chang, H. L., Cheung, T. Y., Tang, A. F., Fisk, T. L., Ooi, S. y Mounts, A. W. (2005): «Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft», *New England Journal of Medicine*, 349, 2416-2422.
- Peña, G. A., Mateos, A., Jiménez-Martín, A. y Sanchis, R. G. (2024): «A decision support system for risk reduction in pandemic spread based on the management of passenger air traffic», *International Transactions in Operational Research* (en prensa).
- Rodríguez-Escabias, D. (2023): *Aplicación de técnicas de visión por computador para medir el riesgo de contagio por virus en aeropuertos* [trabajo fin de máster]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- So, M. K. P., Chu, A. M. Y., Tiwari, A. y Chan, J. N. L. (2020): «On topological properties of COVID-19: predicting and controlling pandemic risk with network statistics», *Scientific Reports*, 11, 5112.
- Tatem, A., Rogers, D. y Hay, S. (2006): «Global transport networks and infectious disease spread», *Advances in Parasitology*, 62, 293-343.
- Watts, D. J. y Strogatz, S. H. (1998): «Collective dynamics of "small-world" networks», *Nature*, 393, 440-442.
- Wells, C. R., Sah, P., Moghadas, S. M., Pandey, A., Shoukat, A., Wang, Y. y Galvani, A. P. (2020): «Impact of international travel and border control measures on the global spread of the novel 2019 coronavirus outbreak», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 7504-7509.

# Reparto de costes en redes de capacidad. Un enfoque multicriterio

ANDRÉS CARO CHAPARRO

*Universidad Pablo de Olavide de Sevilla*

MIGUEL ÁNGEL HINOJOSA RAMOS

*Universidad Pablo de Olavide de Sevilla*

## INTRODUCCIÓN

El problema de construir una red de abastecimiento desde un surtidor o fuente hasta distintos puntos de demanda ha sido ampliamente estudiado en la literatura sobre investigación operativa. Asimismo, el problema de cómo repartir los costes de construcción de esta red entre los agentes implicados (demandantes del suministro) también ha recibido especial atención por parte de los estudiosos de la teoría de juegos, principalmente.

Sin embargo, aunque posiblemente tenga una mayor aplicabilidad en el terreno económico, se ha estudiado menos el problema en el que un conjunto de agentes comparte una red para intercambiar información, transportar productos por carretera, vía férrea o canales fluviales, para establecer canales comerciales con una limitación en cuanto a recursos humanos o materiales, etc. Esta red debe garantizar que la conexión entre cada par de agentes tiene, como mínimo, la capacidad (ancho de banda, calado del canal, capacidad de la carretera o vía férrea, calibre de la tubería, etc.) que estos agentes necesitan. Este trabajo trata sobre este segundo problema.

Específicamente, aborda el problema de construir o diseñar la red, así como el correspondiente problema de reparto asociado para distribuir los costes de construcción, mantenimiento o uso de la red entre los agentes que la comparten.

## 1. PRELIMINARES

Abusaremos de la notación y nos referiremos, tanto al problema de la construcción o diseño de la red de capacidad, como al problema de costes asociado, por  $(N, T)$ , donde  $N$  es el conjunto de los  $n$  agentes implicados y  $T$  es una matriz simétrica cuadrada de dimensión  $n$  que especifica las capacidades requeridas entre cada par de agentes.

Una red se considerará *factible* si entre cada par de agentes hay un camino (directo o a través de otros agentes) en el que todas las conexiones pueden soportar, como poco, la capacidad que necesitan estos agentes. Una red factible se denomina una *red de capacidad*. Entre todas las redes de capacidad, los agentes están interesados en elegir una de coste mínimo. A este respecto, no hay pérdida de generalidad al suponer coste unitario, es decir, cada unidad de capacidad cuesta una unidad monetaria.

A la localización de cada agente se le llama *nodo* y a cada conexión directa entre dos agentes se le llama *eje*. Para encontrar una red de capacidad de mínimo coste, en el modelo que se trata en este trabajo, se supone: (i) entre cada par de nodos debe haber un camino con la capacidad requerida por estos, es decir, dicha capacidad no se puede obtener sumando las capacidades de caminos diferentes; (ii) un mismo eje puede ser usado conjuntamente por cualquier par de agentes que necesiten entre ellos una capacidad de, a lo sumo, la capacidad del eje, y (iii) entre cualquier par de agentes, el coste de un eje de una capacidad determinada es el mismo.

Una red que conecta un determinado conjunto de nodos y no tiene *ciclos* (caminos que, partiendo de un nodo determinado, vuelvan a dicho nodo) se denomina un *árbol*. Una red que consiste en un conjunto de árboles no conectados entre sí se denomina un bosque. Obsérvese que un conjunto de nodos aislados también se considera un caso particular de bosque. Es bien conocido y fácil de probar que una red de capacidad de coste mínimo consiste en un árbol de unión (conecta a todos los agentes implicados en la red) que sea maximal respecto a las capacidades. Este árbol se denotará  $Mcst$  por sus siglas en inglés (*Maximum Cost Spanning Tree*). La manera de encontrar un  $Mcst$  se asemeja, en cierta manera, a la de encontrar un árbol de

unión de mínimo coste (mcst [*Minimum Cost Spanning Tree*]) para construir una red de abastecimiento desde un surtidor o fuente, para lo cual se han desarrollado algoritmos eficientes como el de Kruskal (Kruskal, 1956) o el de Prim (Prim, 1957) (ver una revisión en Wu y Chao, 2004). Estos algoritmos, para obtener un mcst, pueden adaptarse para generar un Mcst simplemente aplicándolos desde el eje de mayor capacidad hacia abajo, en vez de desde el de menor capacidad hacia arriba. En el siguiente ejemplo se adapta el algoritmo de Kruskal.

**Ejemplo 1:** Se consideran cuatro agentes que requieren las capacidades especificadas en la matriz  $T$  en sus conexiones:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 5 & 5 & 3 \\ 5 & 0 & 1 & 5 \\ 5 & 1 & 0 & 6 \\ 3 & 5 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

Por ejemplo, la capacidad requerida en la conexión de los agentes 3 y 4 es  $T_{34} = T_{43} = 6$

Adaptando el algoritmo de Kruskal, en la primera etapa, los agentes 3 y 4 se conectan porque son los que requieren una mayor capacidad (6). En una segunda etapa, el agente 1 puede conectarse al agente 2 o al agente 3, o bien el agente 2 puede conectarse al agente 4 (todas estas conexiones requieren capacidad 5). Supongamos que el agente 1 se conecta con el agente 3 en esta etapa. En la tercera y última etapa el agente 2 puede conectarse o bien al agente 1 o bien al agente 4 (ambas conexiones requieren también capacidad 5). Supongamos que el agente 2 se conecta al agente 1 para obtener el Mcst de la figura 17.1, que tiene un coste de 16.

Los otros Mcst posibles que resultan cuando los empates se resuelven de una manera diferente son los representados en la figura 17.2.

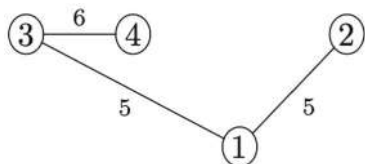


Figura 17.1. Mcst

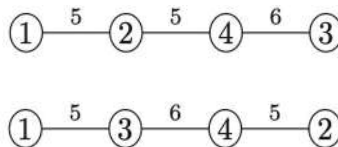


Figura 17.2. Otros Mcst posibles

Resuelto el problema de diseñar una red de capacidad de mínimo coste, surge a continuación el problema de repartir los costes de la red entre los usuarios. Este problema puede abordarse desde la perspectiva de la teoría de juegos.

Para el problema de reparto de los costes de un árbol de unión de mínimo coste (mcst) pueden encontrarse muchas contribuciones en la literatura utilizando la teoría de juegos, que arrancan de los artículos seminales de Bird (Bird, 1976) y Granot y Huberman (Granot y Huberman, 1984). Pueden verse, por ejemplo, en Bogomolnaia y Moulin, 2010, Trudeau y Vidal-Puga, 2017, Norde, 2019 o Bergantiños y Vidal-Puga, 2015. Algunas de las más relevantes utilizan teoría de juegos cooperativos.

Hay, sin embargo, menos literatura en la que se aplica la teoría de juegos al reparto de los costes de un Mcst entre los agentes que comparten la red. Entre las contribuciones al diseño de reglas de reparto de costes en una red de capacidad (reparto del coste de un Mcst), los artículos de Bogomolnaia y otros (Bogomolnaia *et al.*, 2010) y de Moulin (Moulin, 2013) son referencias relevantes en lo que respecta al uso de la teoría de juegos cooperativos y el trabajo de Hinojosa y Caro (Hinojosa y Caro, 2021) es un ejemplo de aplicación de la teoría de juegos no cooperativos.

En este trabajo se aborda el problema del reparto de costes en una red de capacidad desde el punto de vista multicriterio.

Por un lado, si dos agentes están conectados en la red mediante al menos un camino con todos sus ejes de una capacidad igual o superior a la que los agentes necesitan, se considera que estos agentes tienen ambos el beneficio de disfrutar de dicha conexión; este beneficio puede medirse por su capacidad requerida, es decir, si entre los agentes  $i$  y  $j$ , que requieren una capacidad de conexión de  $T_{ij}$ , hay, por lo menos, un camino con todos sus ejes con capacidad igual o superior a  $T_{ij}$ , entonces se considerará que ambos tienen un beneficio igual a  $T_{ij}$ ; en otro caso, el beneficio de ambos es cero; un agente tendrá, por tanto, un beneficio total igual a la suma de los beneficios que obtiene por estar conectado con aquellos agentes a los que le une un camino con todos los ejes con una capacidad igual o superior a la requerida.

Por otro lado, el coste de la red, repartido entre los agentes según la regla que se considere, es otro criterio a tener en cuenta también. Como ya se mencionó anteriormente, no hay pérdida de generalidad al suponer que el coste de un eje de capacidad  $T_{ij}$  es  $T_{ij}$ . Cómo se reparte este coste entre los agentes lo establece la regla de reparto que se utilice.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. En la siguiente sección, se considera un juego no cooperativo multietápico en el que, en cada etapa, los agentes deciden simultáneamente si proponer a algún otro agente construir la conexión que necesitan o bien esperar una mejor oportunidad en una etapa posterior. El juego está inspirado en el que se introduce en Bergantiños y Lorenzo, 2004 y es usado posteriormente en Fernández *et al.*, 2009. Como se menciona anteriormente, la capacidad requerida entre cada par de agentes puede considerarse como un beneficio para ambos si, y solo si, en el árbol que resulte al final, hay un camino entre ellos en el que todos sus ejes tienen, por lo menos, dicha capacidad requerida. Por otro lado, los agentes que deciden conectarse en cada etapa serán los que se hagan cargo del pago del coste de la conexión. Supondremos que reparten dicho coste a partes iguales entre los dos. El problema se analizará en un contexto en el que las preferencias de los agentes respecto a los criterios (es decir, beneficios y costes) son lexicográficas.

En la sección 3, se aborda el problema del reparto de los costes de una red de capacidad utilizando la teoría de juegos cooperativos. Se considera un juego de beneficios y un juego de costes. En el juego de beneficios, el valor de cada coalición es la suma de las capacidades de los ejes de un Mcst construido sobre dicha coalición, es decir, sin considerar los agentes de la red que no forman parte de la coalición ni los ejes que conectan agentes de la coalición con agentes que no forman parte de la coalición. En el juego de costes, el valor de cada coalición es el coste (mínimo) de construir una red de capacidad que asegure que los agentes de la coalición tienen conexión con todos los agentes de la red inicial mediante un camino en el que todos los ejes tienen, por lo menos, la capacidad que se necesita. Estos dos juegos han sido ya estudiados en la literatura. En este trabajo se analizan reglas de reparto que surgen de los conceptos de solución de la teoría de juegos y se relacionan con algunas reglas de reparto clásicas. El trabajo concluye con algunas reflexiones a modo de conclusiones.

## **2. UNA APROXIMACIÓN AL REPARTO DE COSTES EN REDES DE CAPACIDAD DESDE LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA DE JUEGOS NO COOPERATIVOS**

En paralelo al diseño de una red de capacidad hay un problema de reparto de costes que puede abordarse usando la teoría de juegos. En esta sección, se considera un juego estratégico multietápico en el que los jugadores son los  $n$  agentes implicados en la red. En la etapa

inicial, en la que se considera que todos los agentes están todavía desconectados, la estrategia de cualquier agente,  $i$ , consiste en proponer a otro agente,  $j$ , construir el eje  $(i,j)$ , con la capacidad que se requiere entre ellos,  $T_{ij}$ , pagando la mitad del coste de la conexión cada uno, o bien esperar a una oportunidad mejor en una etapa posterior (todos los agentes toman la decisión simultáneamente). El eje  $(i,j)$  se formará si ambos agentes,  $i$  y  $j$ , se hacen la propuesta mutuamente y quedará sin construir en esta etapa en otro caso. En las siguientes etapas, los agentes deciden, simultáneamente, proponer la conexión a algún agente con el que todavía no esté conectado o esperar a una etapa posterior. En estas etapas, que siguen a la etapa inicial, las propuestas de formación de ejes de los agentes pueden llevar a que se formen ciclos. Para evitarlo, hay que descartar algunos de los ejes que originarían esta situación. Este descarte lo puede hacer un árbitro, puede hacerse por sorteo o puede incluso acordarse entre los agentes. El juego termina cuando, en una determinada etapa, no haya propuestas de conexión de ningún agente o cuando todos los agentes estén ya conectados en un árbol de unión. Si cuando el juego termina resulta que no están conectados todos los agentes, entonces estos tendrán que pagar una penalización que es alta comparada con el coste total de una red de capacidad.

Si cuando el juego termina, entre los agentes  $i$  y  $j$  se ha formado un camino en el que todos sus ejes tienen una capacidad igual o superior a  $T_{ij}$ , que es la capacidad que necesitan estos dos agentes, entonces se considera que ambos agentes tienen un beneficio igual a  $T_{ij}$ , el beneficio es cero en caso contrario, es decir, si denotamos por  $b_{ij}$  dicho beneficio,  $b_{ij} = T_{ij}$ , si el camino descrito arriba se ha formado y  $b_{ij} = 0$ , en otro caso.

Cuando el juego termina, el beneficio agregado que consigue un agente,  $i$ , que se denota por  $b_{ij}$ , es la suma de todos los beneficios, , que obtiene en su posible conexión con todos los demás agentes,  $j \neq i$ .

Por otro lado, en lo que se refiere a los costes, si se forma el árbol de unión al finalizar el juego, cada agente pagará la mitad del coste de sus ejes adyacentes en el árbol. Dicho coste se denota, para cada agente,  $i$ , por  $c_i$ . Si no se forma el árbol de unión de todos los jugadores, todos los agentes deben pagar la mencionada penalización.

**Ejemplo 1 (continuación):** *Por ejemplo, consideremos que, después de las dos etapas previas, en las que ya se han formado los ejes  $(1,2)$  y  $(1,3)$ , las estrategias que siguen los jugadores son que los agentes 1 y 2 deciden esperar y no hacer ninguna propuesta de*

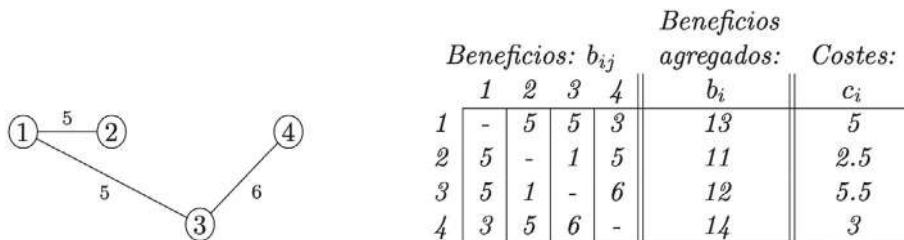


Figura 17.3. Red de capacidad

conexión en esta etapa 3 y los agentes 3 y 4 se proponen conectarse mutuamente. Esta estrategia conduce a que se forma el árbol de la figura 17.3, que constituye una red de capacidad (un Mcst) para los 4 agentes, es decir, estas decisiones aseguran que cada agente tiene una conexión con los otros con la capacidad requerida para cada par de agentes. Por tanto, cada par de agentes disfruta del beneficio de la conexión, es decir,  $b_{ij} = T_{ij} \forall i, j$ . En la figura se muestran estos beneficios, los beneficios agregados de cada agente y los costes que cada agente debe asumir.

Sin embargo, si en las dos etapas previas la decisión ha sido formar los ejes (1,2) y (2,3), entonces, ninguna de las posibles decisiones que los jugadores tomen ahora, en la etapa 3, puede llevar a formar una red de capacidad, incluso aunque el agente 4 se conectara al agente 3 a través del eje de máxima capacidad. El árbol de unión que resultaría y los beneficios y costes correspondientes se representan en la figura 17.4.

En el análisis siguiente, supondremos que los agentes tienen preferencias lexicográficas en cuanto a los pagos del juego multi-tápico descrito, es decir, están principalmente interesados en obtener el beneficio de disfrutar de una red en la que sus conexiones tengan la capacidad requerida y entre las estrategias que empatan respecto a este primer objetivo, elegirán aquella que les supongan menor coste.

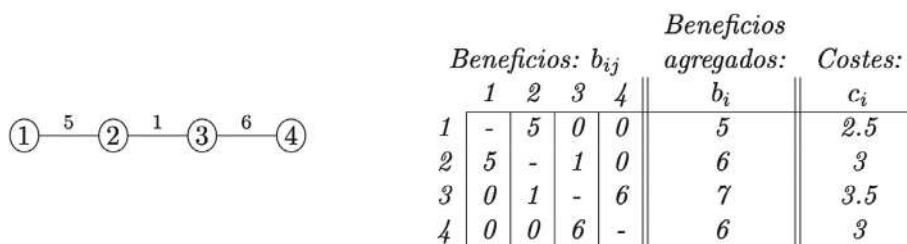


Figura 17.4. Red (no es una red de capacidad)

Nótese que las decisiones que tomen los agentes en el juego pueden llevar a que no se forme un árbol de unión. Incluso en el caso de que se forme, el árbol puede no ser factible, es decir, no constituya una red de capacidad, como se muestra en el segundo caso del ejemplo anterior.

A continuación, se identifica una clase de estrategias de los jugadores que siempre generan una red de capacidad y recíprocamente, dado un Mcst, hay al menos unas estrategias de los jugadores en dicha clase que lo genera. Estas estrategias se denominan *Estrategias de Oportunidad con Ranking para Desempates* (Estrategias ORD) (Hinojosa y Caro, 2021). Se mostrarán sus propiedades en relación con los pagos (beneficios y costes) del juego multietápico descrito anteriormente.

## 2.1. Estrategias ORD

Estas estrategias generan las conexiones de forma gradual, eligiendo en cada etapa uno de los ejes de mayor capacidad entre aquellos que unen dos árboles del bosque que se ha generado en la etapa anterior. Como varias conexiones pueden ser candidatas para formarse en una determinada etapa, se deshacen los empates con arreglo a un ranking de los  $\binom{n}{2}$  ejes posibles. Este *ranking* ordena los ejes con arreglo a criterios de conveniencia, facilidad, oportunidad, etc. Así si varios ejes empatan en una etapa (les toca formarse porque son los de mayor capacidad entre los que todavía no se han formado y unen dos árboles del bosque formado en la etapa anterior), se elegirá aquel que esté antes en el ranking.

Dado un ranking de los ejes, la estrategia ORD asociada genera un Mcst, y recíprocamente, dado un determinado Mcst, una estrategia ORD asociada a un determinado *ranking* lo genera. Sin embargo, dicho Mcst puede ser generado también por otras estrategias que no sean estrategias ORD. Si denominamos *Estrategias Mcst* al conjunto de estrategias que generan una red de capacidad, es decir, un Mcst, las estrategias ORD son un subconjunto propio suyo, como se representa en la [figura 17.5](#).

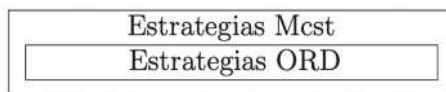


Figura 17.5. Estrategias Mcst y estrategias ORD

A continuación, se muestra la relación de las clases de estrategias anteriores y los equilibrios de Nash para el juego no cooperativo multietápico de los beneficios.

## 2.2. Estrategias ORD y equilibrios de Nash

Una estrategia conjunta de los agentes constituye un equilibrio de Nash para el juego de los beneficios si ningún agente puede obtener un beneficio mayor desviándose unilateralmente y en solitario de la estrategia de equilibrio.

Como siguiendo una estrategia Mcst se genera una red de capacidad, los agentes disfrutan todos de una conexión con el resto de los agentes que tiene la capacidad requerida. Entonces, el beneficio agregado de cada agente es máximo y, por tanto, las estrategias Mcst son equilibrios de Nash del juego de los beneficios. Como consecuencia, también lo son las estrategias ORD.

Una estrategia conjunta de los agentes constituye un equilibrio de Nash fuerte para el juego de los beneficios si ningún grupo de agentes consigue obtener un beneficio mayor para cada agente del grupo si se desvían (en grupo) unilateralmente de la estrategia de equilibrio.

Un razonamiento análogo al expuesto anteriormente muestra que todas las estrategias Mcst son equilibrios de Nash fuertes y, por lo tanto, las estrategias ORD también lo son, pero hay equilibrios de Nash fuertes que no generan una red de capacidad. Esto se representa en la [figura 17.6](#).

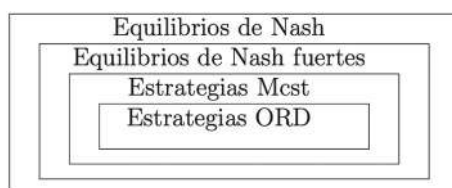


Figura 17.6. Contenciones

## 2.3. Lex-equilibrios de Nash

Como se ha mencionado anteriormente, el principal interés de los agentes en una red de capacidad es alcanzar las capacidades

requeridas con relación a los otros agentes y su beneficio se considera que es la suma de las capacidades alcanzadas.

Siguiendo una estrategia de equilibrio, ninguna desviación unilateral de un agente implica una mejora de su nivel de beneficio. Sin embargo, entre los equilibrios de Nash, una desviación unilateral de un agente o de un grupo de agentes puede implicar que el agente o grupo de agentes que se desvía obtenga el mismo beneficio, pero pueda conseguir un menor coste.

Una estrategia conjunta de los agentes constituye un equilibrio de Nash lexicográfico (lex-equilibrio de Nash) si ningún agente, desviándose unilateralmente y en solitario de la estrategia de equilibrio, puede obtener un beneficio mayor u, obteniendo el mismo beneficio, tiene que pagar menos. Se dirá que constituye un lex-equilibrio de Nash fuerte, si ningún grupo de agentes, desviándose en grupo de la estrategia de equilibrio, obtiene un beneficio mayor para todos los agentes del grupo o, teniendo todos el mismo beneficio, todos consiguen pagar menos.

Nótese que un lex-equilibrio de Nash fuerte es siempre un lex-equilibrio de Nash. Asimismo, un lex-equilibrio de Nash es un equilibrio de Nash para el juego de los beneficios, pero puede probarse que hay equilibrios de Nash, que pueden ser incluso estrategias Mcst, que no son lex-equilibrios de Nash. Sin embargo, las estrategias ORD son lex-equilibrios de Nash fuertes, como se prueba en Hinojosa y Caro, 2021. Las relaciones se muestran en la [figura 17.7](#).

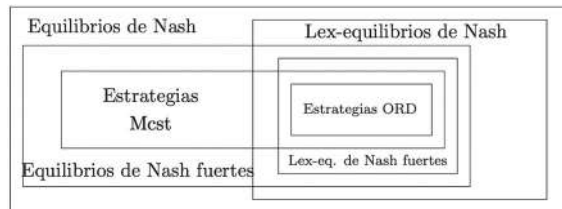


Figura 17.7. Relaciones entre los distintos conceptos

### 3. UNA APROXIMACIÓN AL REPARTO DE COSTES EN REDES DE CAPACIDAD DESDE LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA DE JUEGOS COOPERATIVOS

En el problema de reparto de los costes de un mcst en una red de abastecimiento desde un surtidor o fuente, una regla muy estudiada en la literatura es la regla de Bird (Bird, 1976). Según esta regla, cada

agente paga el coste del primer eje del único camino que le une con la fuente en el árbol de unión de mínimo coste. Esta regla se puede adaptar al caso de una red de capacidad, considerando como fuente a cada uno de los agentes, aplicando la regla clásica de Bird en cada caso y haciendo la media de las asignaciones obtenidas. El procedimiento se muestra aplicándolo al Ejemplo 1, en el que se pueden diseñar las tres posibles redes de capacidad. Las asignaciones de Bird en los distintos árboles y considerando a los distintos agentes como la fuente que se muestran en la [figura 17.8](#).

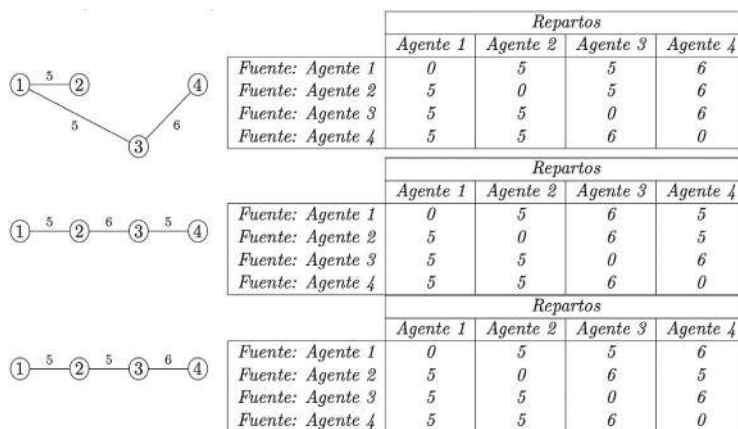


Figura 17.8. Regla de Bird según el árbol y la fuente elegida

**Ejemplo 1 (continuación):**

Haciendo la media uniforme en todos los Mcst y considerando todas las fuentes posibles, se obtiene el reparto que proporciona la regla de Bird en redes de capacidad que se muestra en la [Tabla 17.1](#).

Tabla 17.1. Regla de Bird

Agente 1	Agente 2	Agente 3	Agente 4
15/4	15/4	17/4	17/4

A continuación, se consideran dos juegos cooperativos asociados a un problema de red de capacidad. En el primero, un juego de costes, a cada grupo de agentes o coalición,  $S \subseteq N$ , se le asocia un

valor,  $c(S)$ , el valor de la función característica del juego. Este valor,  $c(S)$ , es el coste de una red de capacidad (de coste mínimo) para los agentes de  $S$ , es decir, es el coste de una red en la cada agente de la coalición  $S$  está conectado con cada uno de los demás agentes (los restantes de la coalición  $S$  y los de fuera de la coalición) a través de un camino con todos los ejes con una capacidad igual o mayor a la requerida; no importa, sin embargo, si cualquier par de agentes que no forman parte de la coalición  $S$  (no cooperan con  $S$ ) no están conectados con su capacidad requerida.

En el otro juego que se considera en este trabajo, la función característica asocia a cada coalición el coste de un Mcst sobre dicha coalición, interpretando que los agentes que no están en la coalición son como si no existieran. Pensando en términos de costes, dicho valor puede verse como una cota inferior del coste que soporta la coalición en una red de capacidad para todos los agentes. Sin embargo, como en una red de capacidad, que dos agentes estén conectados con su capacidad requerida puede considerarse como que ambos disfrutan de un beneficio valorado en dicha capacidad, consideraremos que este segundo juego es un juego de beneficios. Denotaremos por  $v$  a este juego que asocia a cada coalición el valor de la suma de los ejes de un Mcst sobre dicha coalición.

**Ejemplo 1 (continuación):** *El juego de costes,  $c$ , y el juego de beneficios,  $v$ , se muestran en la Tabla 17.2.*

Tabla 17.2. Juego de costes y juego de beneficios

$S$	{1}	{2}	{3}	{4}	{1,2}	{1,3}	{1,4}	{2,3}	{2,4}	{3,4}	{1,2,3}	{1,2,4}	{1,3,4}	{2,3,4}	$N$
$c(S)$	13	11	12	14	15	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
$v(S)$	0	0	0	0	5	5	3	1	5	6	10	10	11	11	16

Un reparto entre los agentes del coste de una red de capacidad se dice que es *estable*, si ningún jugador o grupo de jugadores (coalición) tiene incentivos para abandonar el gran grupo de los  $n$  agentes. En términos del juego de costes esto significa que, si la coalición diseña por su cuenta una red que garantiza que sus conexiones con los distintos agentes tienen la capacidad requerida, no va a costarle menos que lo que le corresponde pagar en un reparto estable. En términos del juego de beneficios, significa que no obtendrá un beneficio mayor que el que obtiene con un reparto estable.

El conjunto de repartos estables de un juego cooperativo se denomina *núcleo* del juego. La regla de Bird proporciona repartos que

están tanto en el núcleo del juego de costes como en el núcleo del juego de beneficios. Esto se muestra en la [tabla 17.3](#) para el ejemplo que se viene arrastrando en este trabajo.

**Ejemplo 1 (continuación):**

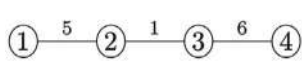
Tabla 17.3. La *Regla de Bird* proporciona repartos estables

S	{1}	{2}	{3}	{4}	{1,2}	{1,3}	{1,4}	{2,3}	{2,4}	{3,4}	{1,2,3}	{1,2,4}	{1,3,4}	{2,3,4}	N
$c(S)$	13	11	12	14	15	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
$B(S)$	15/4	15/4	17/4	17/4	15/2	8	8	8	8	17/2	47/4	47/4	49/4	49/4	16
$v(S)$	0	0	0	0	5	5	3	1	5	6	10	10	11	11	16

Otro reparto muy utilizado en teoría de juegos cooperativos es el valor de Shapley, que consiste, para cada jugador, en la media de los costes marginales (o beneficios marginales, según sea un juego de costes o de beneficios) que se originan cuando el jugador se incorpora a las diferentes coaliciones, si se consideran todas las posibles ordenaciones de los jugadores.

**Ejemplo 1 (continuación):** En la [Tabla 17.4](#) se muestra la construcción del Valor de Shapley en el juego de costes.

Tabla 17.4. Contribuciones marginales. Valor de Shapley



		Beneficios agregados:				Costes:	
Beneficios: $b_{ij}$		1	2	3	4	$b_i$	$c_i$
1	-	5	0	0	5	2.5	
2	5	-	1	0	6	3	
3	0	1	-	6	7	3.5	
4	0	0	6	-	6	3	

El valor de Shapley es también un reparto estable del juego de costes, es decir, pertenece al núcleo del juego, porque dicho juego es cóncavo (el coste marginal que supone la incorporación de un jugador a una coalición es menor cuanto más grande es el grupo al que se incorpora). Sin embargo, el valor de Shapley del juego de beneficios podría no estar en el núcleo del juego.

En este trabajo prestamos atención a los repartos que son estables para ambos juegos, el juego de costes y el juego de beneficios. Para ello, consideramos el descontento de cada coalición o

grupo,  $S$ , con un reparto,  $x$ . Este descontento, que vamos a denotar por  $e(x,S)$ , es una magnitud bidimensional. Su primera componente,  $e^c(x,S)$ , es la diferencia entre la cantidad asignada al grupo en el reparto  $x(x(S) = \sum_{i \in S} x_i)$  y el coste que la coalición puede garantizarse si no coopera con el resto de los jugadores (valor de la función característica en el juego de costes para la coalición  $S$ ,  $c(S)$ ); es decir  $e^c(x,S) = x(S) - c(S)$ . Su segunda componente,  $e^v(x,S)$ , es la diferencia entre el beneficio que la coalición se garantiza si no coopera con el resto de los jugadores (valor de la función característica en el juego de beneficios para la coalición  $S$ ,  $v(S)$ ) y la cantidad asignada al grupo en el reparto  $x$ ,  $x(S)$ , es decir,  $e^v(x,S) = v(S) - x(S)$ .

Un reparto es *bidimensionalmente estable* si ninguna coalición tiene descontento con el reparto, es decir, el vector de descontentos de todas las coaliciones no tiene ninguna de sus componentes positiva. Puede que haya muchos repartos bidimensionalmente estables, como se muestra en nuestro ejemplo.

**Ejemplo 1 (continuación):** *El conjunto de repartos estables para este problema de red de capacidad es el cierre convexo de los siguientes repartos:  $(5,0,5,6)$ ,  $(5,0,6,5)$ ,  $(0,5,5,6)$ ,  $(0,5,6,5)$ ,  $(5,5,6,0)$  y  $(5,5,0,6)$ . Obsérvese que el reparto de Bird es el punto medio de cuatro de los anteriores seis repartos, el primero, el cuarto, el quinto y el sexto.*

Siguiendo la idea de la definición clásica de núcleo minimal escalar, pueden buscarse entre los repartos bidimensionalmente estables, aquellos para los que la coalición más descontenta con el reparto no pueda estar mejor que lo que estaría con dicho reparto. Concretamente, si las componentes del vector  $\bar{p}(x) = (\bar{p}^c(x), \bar{p}^v(x))^t$  representan, respectivamente, el nivel de descontento de la coalición más descontenta (en cada caso) con el reparto  $x$ , buscaremos aquellos repartos bidimensionalmente estables,  $x$ , para los que no hay ningún reparto  $y$ , en el que este vector de máximos descontentos sea menor componente a componente. El conjunto de estos repartos lo denominamos *núcleo minimal generalizado* y puede obtenerse resolviendo un problema de programación lineal bicriterio.

**Ejemplo 1 (continuación):** *El conjunto de repartos bidimensionalmente estables, para este problema de red de capacidad, que conforman el núcleo minimal generalizado, es el cierre convexo de los repartos  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  y  $Q_4$ . El reparto de Bird es el punto medio de estos repartos, como se representa en la figura 17.9.*

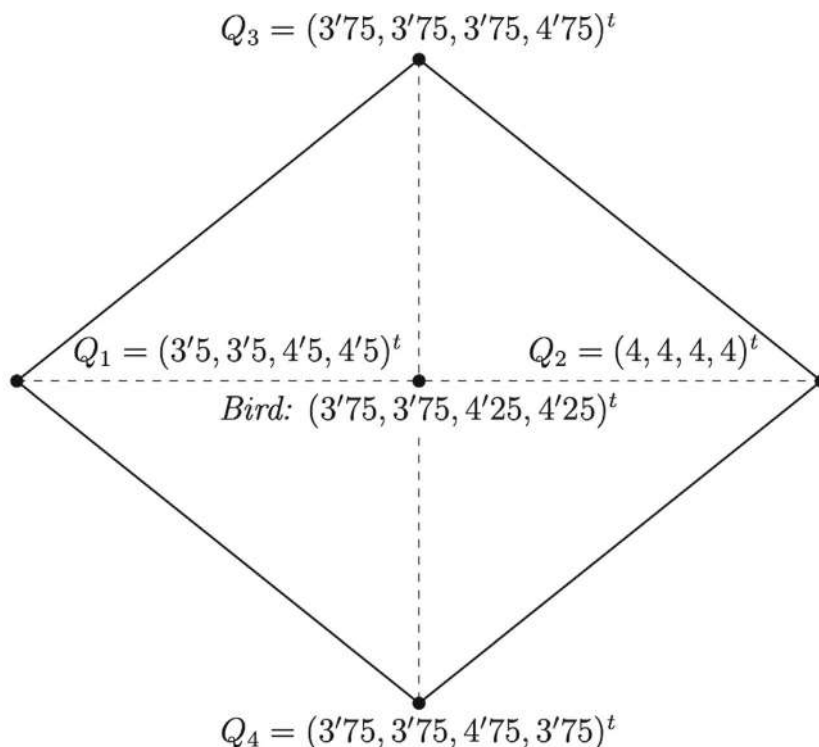


Figura 17.9. Núcleo minimal generalizado

Se incorpora ahora la idea de justicia social, siguiendo la misma idea de la definición clásica de nucleolo de los juegos cooperativos escalares, para llegar al *nucleolo generalizado*. Para ello se considera, para cada posible reparto  $x$ , la matriz  $E(x)$  con dos filas y  $2^n - 2$  columnas, en la que cada fila contiene los descontentos de todas las posibles coaliciones, ordenados de mayor a menor, respecto al juego de costes y al juego de beneficios, respectivamente. La columna  $k$  de dicha matriz de descontentos la denotaremos por  $E^k(x)$ . Un reparto  $x$  será «mejor» que otro reparto  $y$ , si para la primera columna en la que  $E(x)$  y  $E(y)$  difieren, se tiene que  $E^k(x) \leq E^k(y)$ . El reparto  $x$  estará en el nucleolo generalizado si no existe ningún reparto «mejor» que él.

El nucleolo generalizado puede obtenerse resolviendo problemas de programación lineal multicriterio siguiendo un procedimiento recursivo inspirado en el procedimiento para la obtención del nucleolo de un juego cooperativo escalar. Para tener más detalles sobre este procedimiento, ver Hinojosa *et al.*, (2005). Obsérvese que el primer paso de este procedimiento consiste en la obtención del núcleo minimal generalizado.

El procedimiento que se propone proporciona soluciones consensuadas que mejoran el resultado que individualmente podrían asegurarse los regantes con su dotación inicial de agua. Este hecho podría tener implicaciones significativas en las políticas de gestión del agua, ya que, en ausencia de externalidades negativas, las transferencias temporales de agua que se determinan con estas soluciones permiten mejorar la eficiencia económica asociada al uso del recurso.

**Ejemplo 1 (continuación):** *En nuestro problema de red de capacidad, el nucleolo generalizado consiste en todos los repartos del segmento que une  $(4,4,4,4)^t$  y  $(3'5,3'5,4'5,4'5)^t$ . Su punto medio es el reparto de Bird, como se muestra en la figura 17.10.*

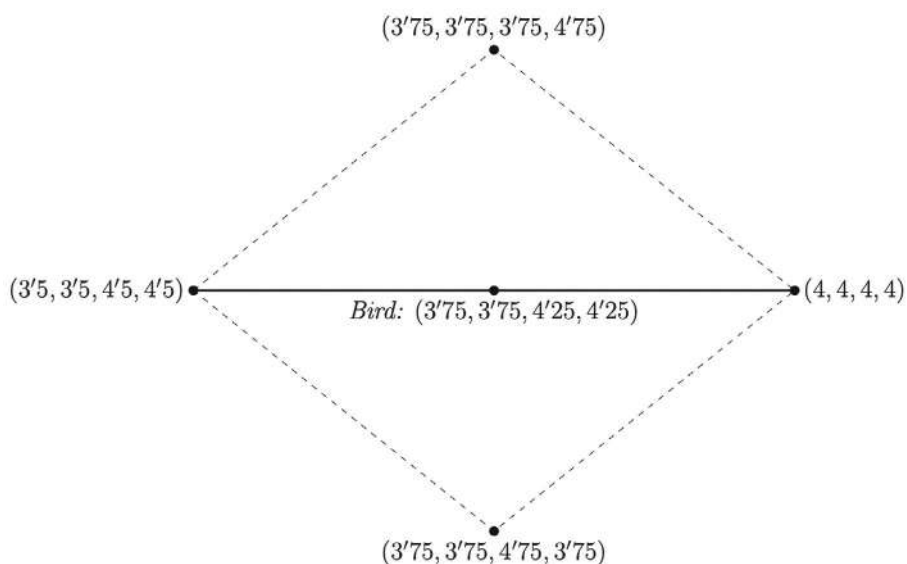


Figura 17.10. Nucleolo generalizado

## CONCLUSIONES

La teoría de juegos ha sido ampliamente aplicada al análisis de problemas combinatorios de reparto de costes. El primero y más estudiado de estos problemas ha sido el problema de repartir los costes de una red de abastecimiento desde una fuente (repartir el coste de un mcst). Sin embargo, los estudiosos de la teoría de juegos le han prestado menos atención al problema de reparto de costes en una red de capacidad, aunque este problema aparezca en muchas

situaciones reales. En este trabajo se aborda este último problema, primero explorando la estabilidad en la formación de un Mcst (aproximación desde la perspectiva de la teoría de juegos estratégicos o no cooperativos) y luego analizando los principios de racionalidad que hay detrás de los diferentes conceptos de solución de la teoría de juegos cooperativos en este marco del problema de reparto de costes en una red de capacidad.

En ambos casos, el problema se aborda desde un punto de visto multicriterio. Se tiene en cuenta que los agentes consiguen un beneficio agregado en sus conexiones, pero al mismo tiempo, siempre que un Mcst se consiga, estos agentes también consideran el coste de dicho árbol de unión.

Desde la perspectiva de los juegos estratégicos, se muestra como las estrategias ORD no solo proporcionan un Mcst, sino que dichas estrategias son estables, no solo si se considera el criterio beneficio, sino también si se tiene en cuenta el criterio coste, cuando se asumen preferencias lexicográficas respecto a estos dos criterios. Por otro lado, estas estrategias ORD proporcionan una herramienta útil para resolver el problema del reparto de los costes.

Nótese que los distintos conceptos de equilibrio que se manejan en este trabajo se comparan en términos de las estrategias de los agentes. Podría ser interesante extender esta comparación a los pagos finales del juego (beneficios y costes de los agentes). En este sentido, merece la pena señalar que puede haber equilibrios de Nash del juego de los beneficios mediante los que se obtienen vectores de pagos dominados. Sin embargo, las estrategias ORD, al ser estrategias Mcst, proporcionan vectores de beneficios agregados no dominados, porque con una estrategia Mcst todos los agentes alcanzan la cota superior en sus niveles de beneficio.

Con relación a la teoría de juegos cooperativos, en Hinojosa *et al.*, 2005 se formalizan extensiones en la clase de los juegos cooperativos multiescenario de los conceptos de solución más usuales de la teoría de juegos cooperativos escalares relacionados con la idea de estabilidad. La extensión natural de la idea de núcleo minimal consiste en un conjunto de repartos para los que los correspondientes vectores de máximo descontento son no dominados. Estos vectores pueden obtenerse resolviendo un problema de programación lineal multicriterio. Una relación de dominancia lexicográfica juega el papel de lo que es el orden lexicográfico en el caso escalar. Con ella se define el nucleolo generalizado.

El juego de costes junto al juego de beneficios, que se introducen en este trabajo en relación al problema de red de capacidad,

constituyen ambos un juego cooperativo vectorial multiescenario. Es este trabajo se muestra que la generalización de la regla de Bird que se propone está en el «centro» de del núcleo minimal generalizado y del nucleolo generalizado.

### AGRADECIMIENTOS:

La investigación de los autores es parte del Proyecto PID2021-124981NB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE y por «ERDF Una manera de hacer Europa».

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Olsen, S. J., Chang, T. Y., Cheung, A. F., Tang, T. L., Fisk, S. y Mounts, H. L. (2005): «Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft», *New England Journal of Medicine*, 349, 2416-2422.
- Bergantiños, G. y Lorenzo, L. (2004): «A non-cooperative approach to the cost spanning tree problem», *Mathematical Methods of Operations Research*, 59, 393-403.
- Bergantiños, G. y Vidal-Puga, J. (2015): «Characterization of monotonic rules in minimum cost spanning tree problems», *International Journal of Game Theory*, 44(4), 835-868.
- Bird, C. G. (1976): «On cost allocation for a spanning tree: A game theoretic approach», *Networks*, 6, 335-350.
- Bogomolnaia, A. y Moulin, H. (2010): «Sharing the cost of a minimal-cost spanning tree: beyond the folk solution», *Games and Economic Behavior*, 69, 238-248.
- Bogomolnaia, A., Holzman, R. y Moulin, T. (2010): «Sharing the Cost of a Capacity Network», *Mathematics of Operations Research*, 35 (1), 173-192.
- Fernández, F. R., Hinojosa, M. A., Mármol, A. y J. Puerto (2009): «Opportune moment strategies for a (non-cooperative) cost spanning tree game», *Mathematical Methods of Operations Research*, 70 (3), 451-463.
- Granot, D. y Huberman, G. (1984): «On the core and nucleolus of minimum-cost spanning tree games», *Mathematical Programming*, 29, 323-347.
- Hinojosa, M. A., Mármol, A. M. y Thomas, L. (2005): «Core, least core and nucleolus for multiple scenario cooperative games», *European Journal of Operational Research*, 164(1), 225-238.
- Hinojosa, M. A. y Caro, A. (2021): «A non-cooperative game theory approach to cost sharing in networks», *Mathematical Methods of Operations Research*, 94(4), 1-33.

- Kruskal, J. (1956): «On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem», *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7, 48-50.
- Moulin, H. (2013): «Cost sharing in networks: Some open questions», *International Game Theory Review*, 15, 1-10.
- Norde, H. (2019): «The degree and cost adjusted folk solution for minimum cost spanning tree games», *Games and Economic Behavior*, 113, 734-742.
- Prim, R. C. (1957): «Shortest connection networks and some generalizations», *Bell Systems Technical Journal*, 36, 1389-1401.
- Trudeau, C. y Vidal-Puga, J. (2017): «On the set of extreme core allocations for minimal cost spanning tree problems», *Journal of Economic Theory*, 169, 425-462.
- Wu, B. W. y Chao, K. (2004). *Spanning trees and optimization problems*. CRC Press.,



## COORDINADORES

Amparo María Mármol Conde

Amelia Bilbao Terol

Antonio Jiménez Martín

## AUTORES

Alfredo Altuzarra Casas

Juan Aguarón Jóven

Pablo Aragonés Beltrán

Mar Arenas Parra

Marcos Asensio Hernández

Amelia Bilbao Terol

Francisco Javier Blancas Peral

María Del Mar Borrego Marín

Verónica Cañal Fernández

María De Los Ángeles Caraballo Pou

Andrés Caro Chaparro

Ignacio Contreras Rubio

Laura Delgado Antequera

Luis Díaz Balteiro

Alberto Dorado Suárez

María Teresa Escobar Urmeneta

María Del Carmen Escribano Ródenas

Vicent Estruch Guitart

Marta Ezquerro García

Gabriela M. Fernández Barberis

Carmen Galé Pola

Ana García Bernabeu

María Del Carmen García Centeno

José Luis García Lapresta

Bibiana Granda Chico

Aitor Hernández González

Mónica Hernández Huelin

Josefa Z. Hernández Diego

Adolfo Hilario Caballero

Miguel Ángel Hinojosa Ramos

Antonio Jiménez Martín

Pedro J. Jiménez Martín

David Jorge García

Javier León Caballero

Macarena Lozano-Oyola

Francisco Martos Barrachina

Amparo María Mármol Conde

Alfonso Mateos Caballero

Luisa Monroy Berjillos

José María Moreno Jiménez

Victoria Muerza Marín

Miguel Navarro Escobar

Jorge Navarro López

M. Teresa Ortuño Sánchez

Marta Pardos Mínguez

Juan Pascual Pastor Ferrando

Gabriel A. Peña Delfín

David Pérez Román

Carlos J. Pérez Sánchez

David Pla Santamaría

Raquel Quiroga García

Javier Reig Mullor

Nieves Remo Díez

Adán Rodríguez Martínez

Victoriana Rubiales Caballero

Francisco Salas Molina

Gregorio Tirado Domínguez

Alberto Turón Lanuza

Marisa Vercher Ferrándiz

Begoña Vitoriano Villanueva

Asunción Zapata Reina



## DECISION MULTICRITERIO: LA AVENTURA CONTINÚA. NUEVOS RETOS, NUEVAS SOLUCIONES

*Decisión multicriterio: la aventura continúa. Nuevos retos, nuevas soluciones* es una obra colectiva desarrollada por investigadores del Grupo Español de Decisión Multicriterio. Su objetivo es acercar al público general el potencial de estas metodologías para el análisis y resolución de problemas de decisión complejos.

El libro aborda temas de interés social en diversos ámbitos. En salud, trata la planificación de menús saludables y programas de intervención en actividad física. En sostenibilidad, analiza la gestión de residuos, reciclaje, reducción de emisiones, gestión forestal y del agua. En economía y sociedad, explora inversiones responsables, calidad de vida, desigualdad y pobreza. Asimismo, incluye estudios en transporte y *marketing*.

Redactado con un enfoque divulgativo, a través de un lenguaje claro y ejemplos prácticos, busca ser accesible para todos, destacando la relevancia de tomar decisiones informadas y sostenibles, tanto en el ámbito profesional como en el social y personal.

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i RED2022-134540-T financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/.