



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-154

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Agregación de indicadores de sostenibilidad en la gestión forestal. Propuesta metodológica y posibles aplicaciones

DÍAZ BALTEIRO, L.¹, EZQUERRO, M.¹, ROMERO, C.¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

Desde que el concepto de sostenibilidad se comenzó a popularizar en la Cumbre de Río se ha considerado casi unánimemente que esta idea puede articularse mediante un conjunto de criterios y/o indicadores. Esta orientación ha conducido a un enorme desarrollo a nivel mundial en cuanto a la definición de indicadores de gestión forestal sostenible a distintos niveles espaciales, pero con preponderancia a nivel agregado (país o conjunto de países). Sin embargo, este esfuerzo por definir y medir un conjunto de indicadores heterogéneo no se ha trasladado a una fase de gran utilidad para la gestión forestal: agregar correctamente este conjunto de criterios e indicadores en un índice sintético que permita establecer, con exactitud, si un sistema forestal es más sostenible que otro. En este trabajo se presenta una metodología, basada fundamentalmente en técnicas de optimización multicriterio (i.e., programación por metas), que permite resolver adecuadamente este proceso de agregación, integrando asimismo las preferencias de los stakeholders. En una segunda parte del trabajo se muestran diversas aplicaciones de esta metodología a problemas concretos de gestión forestal a diversos sistemas forestales. Los resultados muestran como es posible establecer diversos rankings de sostenibilidad en función del problema que se pretende abordar.

Palabras clave

Criterios e indicadores, programación por metas, decisión en grupo, manejo forestal.

1. Introducción

Desde sus inicios, cuando servía básicamente a un objetivo productivo, la gestión forestal incluía una componente de sostenibilidad, habitualmente englobada en el cumplimiento de la condición de asegurar una producción sostenida (e.g., RECKNAGEL & BENTLEY, 1919), en la búsqueda del ideal de bosque normal. Así, conviene recordar que la idea de sostenibilidad ha sido acuñada por un forestal (CARLOWITZ, 1713, en PRETZSCH, 2014). En esa línea, algunos autores hablan de que la sostenibilidad ha sido una idea básica de la gestión forestal desde hace 250 años (SCHRAML & DETTEN, 2010).

Sin embargo, y como es bien conocido, en los últimos años ya no se concibe la gestión forestal sin que se aseguren ciertos umbrales de sostenibilidad, no solo asociada a la componente productiva de los sistemas forestales (BETTINGER et al., 2009). En concreto, esta idea se ha ido articulando gradualmente desde la Conferencia de Río celebrada en el año 1992. Así, aunque hoy en día existen diversas definiciones de lo que representa una gestión forestal sostenida, casi todas ellas afirman que se puede definir como el proceso de gestionar los sistemas forestales de tal forma que éstos sean económicamente viables, ambientalmente benignos, y socialmente beneficiosos. Además, también tendría que asegurar las necesidades presentes y futuras (HIGMAN et al., 2005). Por último, se puede decir que existe un consenso general en asociar el concepto de sostenibilidad a la elaboración de una lista multidisciplinaria de criterios e indicadores (RAISON et al., 2001).

Así, la determinación de la sostenibilidad a través de un procedimiento que incluye un conjunto de criterios y/o indicadores ha sido objeto de investigación en numerosas disciplinas. En concreto, en

el caso de la gestión forestal se ha analizado la sostenibilidad utilizando un conjunto de indicadores a diferentes niveles (desde uno local, a otros regionales o nacionales), como se puede apreciar en diversos estudios (HIGMAN et al., 2005; WOLFSLEHNER & VACIK, 2008; GRAINGER, 2012). Sin embargo, y salvo algunas excepciones (GIMÉNEZ et al., 2013; DIAZ-BALTEIRO et al., 2016a), la mayoría de estos trabajos no se han planteado si el manejo practicado era o no sostenible.

Dado que la idea de sostenibilidad anteriormente definida incorpora una estructura multidimensional, numerosos trabajos han optado por caracterizar este concepto utilizando técnicas de decisión multicriterio. Esta aproximación teórica ha sido profusamente aplicada en un gran número de sectores, tal y como se puede apreciar en una revisión reciente (DIAZ-BALTEIRO et al., 2017a). Así, ya desde hace años diversos casos de estudio relacionados con la gestión forestal han medido la sostenibilidad aplicando técnicas de decisión multicriterio (DIAZ-BALTEIRO & ROMERO, 2008). Dentro de estas metodologías, la programación por metas ha sido una de las más utilizadas en aplicaciones de carácter forestal (DIAZ-BALTEIRO & ROMERO, 2004; GIMÉNEZ et al., 2013; ALDEA et al., 2014; DIAZ-BALTEIRO et al., 2013). Sin embargo, en otros sectores las dos técnicas multicriterio más utilizadas para abordar problemas relacionados con la sostenibilidad han sido el método de las jerarquías analíticas (AHP, *Analytic Hierarchic Process*) y la media ponderada (DIAZ-BALTEIRO et al., 2017a).

Sin embargo, a la hora de abordar problemas forestales relacionados con la sostenibilidad, han aparecido algunas aproximaciones incompletas, ya que han definido la sostenibilidad de un modo parcial (DIAZ-BALTEIRO et al., 2016a). Por otro lado, en el ámbito forestal ha sido muy corriente definir un elevado número de criterios e indicadores pero este esfuerzo no ha sido focalizado a responder una pregunta intrínseca al problema: ¿cómo agregamos este conjunto de criterios e indicadores en un índice sintético de sostenibilidad?

2. Objetivos

Con esta comunicación se pretende, como objetivo principal, mostrar las bases de ciertos modelos que utilizan técnicas de decisión multicriterio para agregar distintos criterios y/o indicadores con el fin de concluir que un sistema forestal es más sostenible que otro, con independencia del nivel de agregación propuesto, ya sea a nivel monte o a nivel nacional, por poner dos ejemplos extremos. Para ello, se recurrirá a métodos como la programación por metas. Una vez expuestas las variantes de esta técnica para el caso general que nos ocupa, un segundo objetivo de este trabajo sería presentar algunos resultados aplicando la metodología a un conjunto de plantaciones forestales en Galicia.

3. Metodología

En síntesis, y de manera muy esquemática, la metodología a emplear se puede resumir mediante el siguiente esquema (Figura 1). En primer lugar, partimos de un escenario general en el que existen n sistemas forestales ($S_1...S_n$) que van a ser evaluados de acuerdo con m indicadores de sostenibilidad. Así, R_{ij} mide el resultado alcanzado por el sistema i -ésimo cuando es evaluado de acuerdo con el indicador de sostenibilidad j -ésimo. De esta manera, generamos $n \times m$ elementos de información. Como resulta fácil de suponer, los indicadores de sostenibilidad vienen medidos en muchas ocasiones en distintas unidades (e.g., euros, metros cúbicos de madera, toneladas de CO₂ capturado, etc.), siendo además sus valores absolutos muy diferentes. Por estas razones, un primer paso en el desarrollo de la metodología consistirá en normalizar adecuadamente los resultados obtenidos, consiguiendo de esta forma una información homogénea dimensionalmente y, por tanto, susceptible de agregarla por medio de diferentes operadores matemáticos.

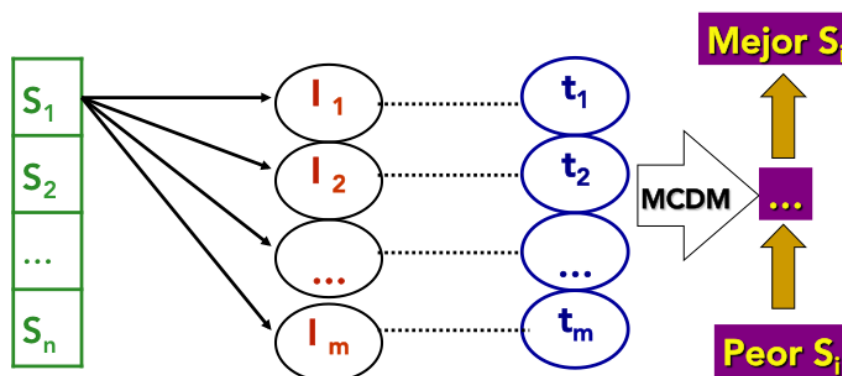


Figura1. Esquema de la metodología empleada

Una vez que dispongamos del valor normalizado alcanzado por cada sistema forestal para cada indicador de sostenibilidad se pueden aplicar para su correcta agregación diversas metodologías multicriterio (DIAZ-BALTEIRO et al., 2017a), representadas en la figura con el acrónimo MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*). El enfoque MCDM que se va a desarrollar aquí entronca con la lógica simoniana “satisfaciente”. En este contexto, a cada indicador de sostenibilidad se le asocia un nivel de aspiración (“target”) que no se sabe si es óptimo, pero que se considera suficientemente bueno; i.e., “satisfaciente” dentro del marco teórico de la racionalidad acotada propuesto por Herbert Simon (SIMON, 1956). Estos niveles de aspiración satisfacientes se pueden fijar exógenamente a través de juicios de expertos, según orientaciones recabadas en distintas fuentes bibliográficas, estadísticas, etc.

Una vez que a cada uno de los m indicadores de sostenibilidad se les ha asignado un target t_j “satisfaciente” se procede a formular un modelo de programación por metas extendida (*extended goal programming*) con variables binarias. Con este tipo de enfoque se minimizan las desviaciones no deseadas entre el logro de una meta y un nivel satisfactorio de realización fijado para la misma. De esta manera, y a través de variaciones en el valor de un parámetro de control que figura en la función de logro del modelo, se obtienen los siguientes resultados:

- a) Ranking de las n alternativas o sistemas forestales, dependiendo del tipo de problema, con la cuantificación del nivel de sostenibilidad, cuando esta es medida con la óptica de la búsqueda del mejor promedio. Esta solución suele denominarse la “más eficiente”, presentando el problema de que alguna alternativa con un “buen promedio” puede obtener un resultado muy malo para alguno de los indicadores, lo que puede imposibilitar su implementación desde una perspectiva de sostenibilidad.
- b) Ranking de las n alternativas o sistemas forestales, dependiendo del tipo de problema, con la cuantificación del nivel de sostenibilidad, cuando esta es medida con la óptica de la búsqueda de la solución más equilibrada, o dicho con otras palabras, que muestra un mayor “balanceo” en el resultado alcanzado por los m indicadores. Esta solución de “máximo equilibrio” es atractiva, pero presenta el problema de que el “promedio” alcanzado puede ser muy pobre, lo que haría poco aconsejable su implementación.
- c) Rankings en el mismo sentido, pero que representan compromisos entre el ranking con mejor promedio y el ranking más equilibrado. Con este tipo de análisis se puede establecer las tasas de intercambio (*trade-offs*) entre una mejora en el promedio a cambio de un empeoramiento en el equilibrio, y viceversa.

La formulación matemática que subyace a esta metodología general se recoge en el Apéndice 1. Por otro lado, es preciso tener en cuenta que se pueden integrar fácilmente ciertas variaciones para distintos problemas de gestión forestal. Aunque en la Figura 1 no se ha incorporado este hecho, una extensión natural consistiría en introducir en el modelo las preferencias de los stakeholders por los diferentes indicadores, el valor del target para cada indicador o, incluso, el modelo de programación por metas elegido. Es decir, que si se interactúa con los centros decisores, se pueden introducir sus preferencias en el modelo, aunque habría que agregar correctamente dichas preferencias (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2009).

Como caso de estudio se ha elegido un conjunto de 48 plantaciones localizadas en Galicia y cuya especie principal es del género *Eucalyptus* (fundamentalmente, *Eucalyptus globulus* Labill). La superficie total de estas plantaciones supera las 8000 ha y la propiedad y/o la gestión que se realiza es variada: desde grandes empresas como ENCE, a montes vecinales en mano común e incluso 8 montes gestionados por la Administración pública. Para evaluar la sostenibilidad de dichas plantaciones se han definido 9 indicadores: 3 de tipo económico, 3 de tipo social y 3 de tipo ambiental (Tabla 1). Obviamente, algunos de estos indicadores son del tipo “cuanto más, mejor”, mientras que los restantes son del tipo “cuanto menos, mejor”. Ambas tipologías se han identificado en esta tabla con los signos “+” y “-”, respectivamente. Llegados a este punto es necesario realizar dos observaciones. La primera es que se han obtenido todos los valores de todos los indicadores en cada plantación; es decir, no se ha imputado ningún valor de cualquier indicador en ninguna plantación. La segunda es que, previamente a la obtención de esta lista final de indicadores, se ha comprobado la independencia de los mismos, asegurando que ninguno de ellos sea redundante.

Por otro lado, se ha realizado una encuesta a un amplio conjunto de stakeholders vinculados con estas plantaciones industriales con el fin de solicitar, entre otras cosas, su opinión sobre los pesos que deberían ser otorgados a cada indicador o el target asociado a cada uno de ellos. Dichos valores se muestran a continuación (Tabla 1), donde la columna “peso” ya contiene, para cada indicador, el producto del promedio de los pesos que los stakeholders han otorgado a cada criterio e indicador asociado. En DÍAZ-BALTEIRO et al. (2016a) se muestran más detalles de esta encuesta y, en general, sobre este caso de estudio.

Tabla 1. Indicadores definidos en las distintas plantaciones

| Criterio | Indicador | Tipo | Peso | Target |
|-----------|---|------|-------|--------|
| Económico | I ₁ Valor actual neto | + | 0.208 | 61,3 |
| | I ₂ Superficie afectada por plagas (%) | - | 0.134 | 38,2 |
| | I ₃ Ocurrencia de incendio | - | 0.125 | 38,2 |
| Ambiental | I ₄ Erosion | - | 0.102 | 37,7 |
| | I ₅ Áreas Protegidas | + | 0.076 | 31,3 |
| | I ₆ Superficie protegida/ Superficie total | + | 0.095 | 31,8 |
| Social | I ₇ Elementos recreativos y culturales | + | 0.098 | 33,1 |
| | I ₈ Número de especies con una superficie mayor que un 1% de la superficie total | + | 0.093 | 36,3 |
| | I ₉ Densidad de vías | + | 0.068 | 36,8 |

4. Resultados

A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos (Tabla 2) para las soluciones a) y b) explicadas en el apartado anterior (Escenario 1) y para las 48 plantaciones (denotadas por la letra “x”

y el número correspondiente en la Tabla 2). Para estos resultados se ha otorgado a cada criterio y a cada indicador el mismo peso. Es decir, se asume que todos ellos presentan una importancia similar si analizamos la sostenibilidad de estos sistemas forestales. Además, en este caso para cada indicador se ha definido el mismo nivel de aspiración y éste alcanza un 70% del punto ideal (valor óptimo que alcanza el indicador en el conjunto de plantaciones). Por otro lado, en esta misma tabla, también se adjuntan los resultados del ranking de las 48 plantaciones incluyendo las preferencias de los stakeholders en cuanto a los pesos y los targets (Escenario 2). Por último, se aprecia cómo los rankings cambian notablemente entre escenarios y entre las soluciones más eficientes frente a las más equilibradas, sobre todo en el Escenario 2. Las zonas sombreadas de la tabla se corresponden a conjuntos de indiferencia, es decir, esas plantaciones han obtenido el mismo ranking.

Tabla 2. Rankings obtenidos según los dos Escenarios previamente definidos

| Ranking | Escenario 1 | | Escenario 2 | | Ranking | Escenario 1 | | Escenario 2 | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | $\lambda=1$ | $\lambda=0$ | $\lambda=1$ | $\lambda=0$ | | $\lambda=1$ | $\lambda=0$ | $\lambda=1$ | $\lambda=0$ |
| 1 | x4 | x4 | x42 | x26 | 25 | x28 | x9 | x12 | x18 |
| 2 | x22 | x8 | x25 | x9 | 26 | x20 | x7 | x10 | x29 |
| 3 | x42 | x27 | x4 | x38 | 27 | x26 | x10 | x6 | x30 |
| 4 | x25 | x28 | x15 | x7 | 28 | x3 | x17 | x35 | x42 |
| 5 | x8 | x1 | x7 | x8 | 29 | x37 | x24 | x16 | x22 |
| 6 | x15 | x19 | x34 | x12 | 30 | x10 | x26 | x11 | x11 |
| 7 | x17 | x34 | x22 | x31 | 31 | x13 | x29 | x1 | x35 |
| 8 | x34 | x22 | x39 | x25 | 32 | x23 | x31 | x43 | x27 |
| 9 | x7 | x6 | x19 | x24 | 33 | x44 | x18 | x5 | x13 |
| 10 | x29 | x14 | x17 | x40 | 34 | x12 | x32 | x2 | x34 |
| 11 | x32 | x11 | x29 | x46 | 35 | x14 | x23 | x13 | x32 |
| 12 | x11 | x5 | x24 | x33 | 36 | x40 | x35 | x36 | x39 |
| 13 | x6 | x30 | x8 | x10 | 37 | x33 | x20 | x47 | x1 |
| 14 | x2 | x25 | x32 | x21 | 38 | x43 | x42 | x21 | x23 |
| 15 | x19 | x33 | x26 | x41 | 39 | x38 | x39 | x33 | x36 |
| 16 | x9 | x48 | x9 | x28 | 40 | x47 | x45 | x14 | x48 |
| 17 | x5 | x41 | x27 | x43 | 41 | x46 | x46 | x45 | x17 |
| 18 | x18 | x16 | x18 | x44 | 42 | x30 | x36 | x23 | x37 |
| 19 | x39 | x21 | x44 | x15 | 43 | x36 | x38 | x46 | x2 |
| 20 | x1 | x15 | x3 | x19 | 44 | x31 | x40 | x40 | x14 |
| 21 | x27 | x3 | x37 | x16 | 45 | x45 | x37 | x31 | x5 |
| 22 | x24 | x12 | x38 | x3 | 46 | x21 | x47 | x30 | x6 |
| 23 | x16 | x13 | x28 | x20 | 47 | x41 | x43 | x41 | x45 |
| 24 | x35 | x2 | x20 | x4 | 48 | x48 | x44 | x48 | x47 |

$\lambda=1$: solución más eficiente que se obtiene con este valor del parámetro λ en la eq. [2]

$\lambda=0$: solución más equilibradas que se obtiene con este valor del parámetro λ en la eq. [2]

Las celdas sombreadas se corresponden a alternativas (xi) con el mismo nivel de sostenibilidad para una solución determinada

5. Discusión

La metodología mostrada en este trabajo ha mostrado la importancia de no ceñirse, a la hora de abordar un problema complejo como es el de evaluar la sostenibilidad en distintos sistemas forestales, únicamente al ímprobo esfuerzo de definir, seleccionar y medir dichos indicadores en cada

caso de estudio. En efecto, los resultados mostrados en la tabla anterior muestran cómo al modificar pesos preferenciales, niveles de aspiración o incluso el enfoque teórico empleado para agregar los distintos criterios e indicadores de sostenibilidad en un ranking, los resultados pueden variar notablemente. Todo ello implica la necesidad de una interacción con los centros decisores o stakeholders a la hora de conocer sus preferencias sobre los distintos criterios e indicadores para conseguir perfilar un modelo que integre correctamente todos estos aspectos. Una vez logrado este objetivo, se podría explotar los resultados derivados de este tipo de análisis de distintas formas. Así, en primer lugar, se establecería un ranking de las plantaciones en función de su sostenibilidad, para a partir de esta información proponer medidas relativas en las plantaciones menos sostenibles con el fin de mejorar en el futuro la sostenibilidad de las mismas.

Aunque han sido numerosas, y crecientes en los últimos años, las aproximaciones teóricas que desde el punto de vista de la teoría de la decisión multicriterio han abordado el problema de la sostenibilidad (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2017a), en el ámbito forestal una de las herramientas más utilizada ha sido la programación por metas. En esta línea, conviene resaltar que la elección de la variante a utilizar de esta técnica (e.g., programación por metas ponderada, lexicográfica, extendida, etc.) no se debe realizar de un modo mecánico, ya que adoptar cada una de estas técnicas implica asumir un conjunto de hipótesis que pueden chocar con las preferencias de los centros decisores (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2013). Por otro lado, en este trabajo no se ha profundizado en otras formas de agregar las preferencias de los stakeholders. En efecto, se ha supuesto que los pesos asociados a cada criterio y/o indicador se obtenían con la media geométrica de los valores que ha otorgado cada uno de los stakeholders (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2016a). Sin embargo, se podrían utilizar otros procedimientos más sofisticados para realizar esta agregación. Aunque la teoría en cuanto a las metodologías de decisión en grupo que se pueden aplicar en este tipo de casos es muy extensa (MARTINS Y BORGES, 2007), se podrían haber agregado estas preferencias individuales a través de matrices de comparación por pares. A partir de dichas matrices que cuantifican las preferencias individuales se obtiene la matriz de consenso que cuantifica las preferencias colectivas (GONZÁLEZ-PACHÓN & ROMERO, 2001; DÍAZ-BALTEIRO et al., 2009). En síntesis, esta idea de hibridar metodologías con herramientas de decisión multicriterio y de decisión en grupo se puede considerar una línea de investigación prometedora, que ya se está empleando abundantemente tanto en el ámbito forestal (UHDE et al., 2015; EZQUERRO et al., 2016) como en el de la sostenibilidad (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2017a).

Por otro lado, la metodología que se ha mostrado en este trabajo se puede utilizar para abordar otros ejercicios de sostenibilidad en el ámbito de la gestión forestal. Por ejemplo, una aplicación inmediata sería no buscar la plantación más sostenible, sino la alternativa de manejo más sostenible para una determinada plantación. En GIMÉNEZ et al. (2013) se presenta un caso aplicado a una plantación de eucaliptos en Galicia donde también se emplea un modelo de programación por metas extendido y otorgando el mismo peso preferencial a cada uno de los seis indicadores propuestos para evaluar 18 distintas alternativas de manejo. En los casos mostrados hasta ahora se asumía una componente estática en el problema; es decir, las mediciones de los indicadores, pesos y alternativas propuestas se habían propuesto en un determinado momento. Sin embargo, podría ser de utilidad abordar la sostenibilidad desde un punto de vista dinámico. En efecto, si se toman horizontes de planificación habituales en la gestión forestal, un objetivo podría ser la alternativa de manejo más adecuada ante determinados escenarios a lo largo del tiempo. En DÍAZ-BALTEIRO et al. (2017b) se propone una metodología de agregación de distintos indicadores a lo largo de 100 años para elegir la mejor alternativa de manejo bajo seis escenarios de cambio climático en el monte “Pinar de Valsaín”. La metodología que se ha empleado en este caso es nuevamente la programación por metas, y también se han recabado las opiniones de distintos stakeholders utilizando la media aritmética de las preferencias individuales. Por último, otro ejercicio relacionado con la idea de sostenibilidad, y que puede ser de gran interés sería conocer las causas del nivel de sostenibilidad alcanzado por cada plantación. Para ello habría que buscar qué variables exógenas pueden explicar que una plantación sea más o menos sostenible sin tener que realizar todo el análisis que se ha explicado anteriormente. En DÍAZ-BALTEIRO et al. (2016a) se ha realizado este análisis, utilizando siete variables exógenas. Esta

misma idea se ha aplicado a un estudio sobre la industria de la madera en Europa (VOCES et al., 2012).

Desde el punto de vista metodológico, y como se ha comentado anteriormente, no sólo la programación por metas se ha utilizado como una metodología válida para abordar problemas de sostenibilidad en el ámbito forestal. Así en DIAZ-BALTEIRO et al. (2011) se ha empleado la programación compromiso para construir un ranking a nivel europeo de la industria del papel. Para ello se han definido 14 indicadores en 17 países. Finalmente, en DIAZ-BALTEIRO et al. (2016b) se proponen diversos modelos de programación por metas para ver qué plantación, de un conjunto de 30, manejada por una misma empresa (ENCE) es más sostenible, utilizando para ello 11 indicadores. Cabe resaltar uno de ellos donde se utiliza un razonamiento similar a otras técnicas multicriterio como TOPSIS (*Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions*): estamos buscando aquellas plantaciones lo más alejadas posibles de los peores valores para cada indicador (puntos anti-ideales).

6. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado cómo abordar el problema de determinar si un sistema forestal es más o menos sostenible que otro no se debe reducir únicamente a determinar los valores de un conjunto de criterios y/o indicadores, sino que es conveniente agregarlos adecuadamente. Para realizar esta agregación es necesario seguir algunos pasos anteriormente mostrados (normalizar los criterios e indicadores, comprobar que ninguno es redundante e interaccionar con los distintos stakeholders) para, a continuación, realizar el correspondiente proceso de agregación por medio de modelos decisionales multicriterio. Dentro del conjunto de estas metodologías multicriterio, la programación por metas se ha mostrado como una herramienta flexible, que puede proporcionar distintos rankings atendiendo a las propiedades de cada uno de los métodos. En el caso que nos ocupa se ha mostrado cómo, después de determinar los valores normalizados de cada indicador, los pesos preferenciales que se asignan a cada uno de ellos pueden modificar el resultado obtenido.

7. Agradecimientos

El trabajo de Carlos Romero y Luis Díaz Balteiro está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto AGL2015-68657-R). Los autores agradecen los comentarios realizados por un revisor, que sin duda ha contribuido a mejorar la calidad de este trabajo

8. Bibliografía

ALDEA, J.; MARTÍNEZ-PEÑA, F.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2014. Participatory goal programming in forest management: an application integrating several ecosystem services. *Forests*, 5, 3352–3371.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J.P.; GREBNER, D.; 2009. *Forest management and planning*. Academic Press, Burlington, Mass.

CARLOWITZ, C.V.; 1713. *Sylviculture Oeconomica oder haußwirthliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*, Johann Friedrich Braun 2. Leipzig.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2004. Sustainability of forest management plans: a discrete goal programming approach. *J. Environ. Manage.* 71, 351– 359.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *For. Ecol. Manage.* 255, 3222–3241.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2009. Forest management with multiple criteria and multiple stakeholders: an application to two public forests in Spain. *Scand. J. Forest Res.* 24, 87–93.

DIAZ-BALTEIRO, L.; VOCES, R.; ROMERO, C.; 2011. Making Sustainability Rankings Using Compromise Programming. An Application to European Paper Industry. *Silva Fenn.* 45, 761–773.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2013. Goal programming in forest management: customising models for the decision-maker's preferences. *Scand. J. Forest Res.* 28, 166–173.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ALFRANCA, O.; BERTOMEU, M.; EZQUERRO, M.; GIMÉNEZ, J.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2016a. Using quantitative techniques to evaluate and explain the sustainability of forest plantations. *Can. J. For. Res.* 46, 1157–1166.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ALFRANCA, O.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2016b. Ranking of industrial forest plantations in terms of sustainability: a multicriteria approach. *J. Environ. Manage.* 180, 123–132.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ALONSO, R.; MARTÍNEZ-JÁUREGUI, M.; PARDOS, M.; 2017a. Selecting the best forest management alternative by aggregating ecosystem services indicators over time: A case study in central Spain. *Ecol. Indic.* 72, 322–329.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2017b. Measuring system sustainability with multi-criteria methods: a critical review. *Eur. J. Oper. Res.* (in press). doi: 10.1016/j.ejor.2016.08.075.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2016. Operational research techniques used for addressing biodiversity objectives into forest management: An overview. *Forests* 7,229.

GIMÉNEZ, J.C.; BERTOMEU, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *For. Ecol. Manage.* 291, 367–376.

GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2001. Aggregation of partial ordinal rankings: an interval goal programming approach. *Comput. Oper. Res.* 28, 827–834.

GRAINGER, A.; 2012. Forest sustainability indicator systems as procedural policy tools in global environmental governance. *Global Environ. Chang.* 22, 147–160.

HIGMAN, S.; MAYERS, J.; BASS, S.; JUDD, N.; NUSSBAUM, R.; 2005. The sustainable forestry handbook. 2nd edition. Earthscan, London.

IGNIZIO, J. P.; ROMERO, C.; 2003. Goal programming. In: H. Bidgoli (Ed.), Encyclopedia of information systems 2, pp. 489-500. Academic Press. San Diego.

MARTINS, H.; BORGES, J.G.; 2007. Addressing collaborative planning methods and tools in forest management. *For. Ecol. Manage.* 248, 107-118.

PRETZSCH, J.; 2014. Paradigms of tropical forestry in rural development. In: Pretzsch, J.; Darr, D.; Ubrig, H.; Auch., E.(eds): Forests and rural development. pp. 7-49. Springer, Heidelberg.

RAISON, R.J.; BROWN, A.; FLINN, D.; 2001. Criteria and indicators for sustainable forest management. CABI Publishing. Wallingford.

RECKNAGEL, A.B.; BENTLEY, J.; 1919. Forest Management. Wiley & Sons. New York.

ROMERO, C. 2001. Extended lexicographic goal programming: a unifying approach. *Omega-Int. J. Manage. Sci.* 29, 63-71.

ROMERO, C.; 2004. A general structure of achievement function for a goal programming model. *Eur. J. Oper. Res.* 153, 675-686.

SCHRAML, U.; DETTEN, R.V.; 2010. Forestry or “the art of flying blind”. Sustainability in an era of global change. In Sustainable forest management in a changing world. A European perspective. Edited by P. Spathelf. pp. 217-238. Springer. Dordrecht.

SIMON, H.A.; 1956. Rational choice and the structure of the environment. *Psychol. Rev.* 63, 129-138.

UHDE, B.; HAHN, W.A.; GRIESS, V.; KNOKE, T.; 2015. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: A critical review. *Environ. Manag.* 56, 373-388.

VOCES, R.; DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2012. Characterization and explanation of the sustainability of the European wood manufacturing industries: a quantitative approach. *Expert Syst. Appl.* 39, 6618-6627.

WOLFSLEHNER, B.; VACIK, H.; 2008. Evaluating sustainable forest management strategies with the Analytic Network Process in a pressure-state-response framework. *J. Environ. Manage.* 88, 1-10.

Apéndice

Consideremos el siguiente escenario general. Tenemos $i=1,2\dots n$ sistemas forestales (plantaciones en nuestro caso, pero podrían ser otro tipo de montes o incluso diferentes alternativas de gestión para un mismo sistema forestal), para ser evaluados cada uno de ellos de acuerdo con $j=1,2,\dots m$ indicadores de sostenibilidad. En este contexto, el objeto del ejercicio es determinar el ranking u ordenación de los n sistemas en términos de sostenibilidad, así como asociar a cada uno de los sistemas una cifra que cuantifique su nivel de sostenibilidad. El primer paso para abordar este problema consiste en determinar $n \times m$ elementos R_{ij} , que miden el valor alcanzado por el sistema i -ésimo cuando es evaluado de acuerdo con el indicador j -ésimo. Como estos valores están usualmente medidos en unidades distintas y sus valores absolutos pueden diferir considerablemente, su

agregación directa no tiene sentido. Con objeto de evitar este tipo de problema, se recurre al siguiente sistema de normalización:

$$\bar{R}_{ij} = 1 - \frac{R_j^* - R_{ij}}{R_j^* - R_{*j}} = \frac{R_{ij} - R_{*j}}{R_j^* - R_{*j}} \quad \forall i, j \quad [1]$$

Donde \bar{R}_{ij} sería el valor normalizado alcanzado por la plantación i -ésima cuando es evaluado de acuerdo con el indicador j -ésimo; R_j^* es el valor óptimo o ideal para el indicador de sostenibilidad j -ésimo. Este valor óptimo representa el valor máximo si el indicador es del tipo “más mejor” o el valor mínimo si el indicador es del tipo “menos mejor”. De igual forma, R_{*j} es el peor valor o valor anti-ideal para el indicador de sostenibilidad j -ésimo. Con este sistema de normalización los indicadores no tienen dimensión y, además, quedan todos ellos acotados entre 0 y 1. Llegados a este punto, se propone un enfoque “satisfaciente” para obtener un ranking de sostenibilidad entre todas las plantaciones seleccionadas.

Así, a cada uno de los m indicadores de sostenibilidad se le ha asignado un nivel de aspiración o “target” t_j “satisfaciente”. Una vez llegados a este punto se puede definir un modelo de programación por metas extendida con variables binarias (*extended goal programming*). Los detalles conceptuales y analíticos que subyacen a este enfoque pueden verse en: ROMERO (2001, 2004) e IGNIZIO & ROMERO (2003). La estructura matemática del modelo es la siguiente:

Función de logro:

$$\text{Min}(1 - \lambda)D + \lambda \sum_{j=1}^m (\alpha_j n_j)$$

sujeto a :

Metas y restricciones :

$$\sum_{i=1}^n \bar{R}_{ij} X_i + n_j - p_j = \bar{t}_j \quad j \in \{1, K, m\} \quad [2]$$

$$(\alpha_j n_j) - D \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1$$

$$X_i \in \{0, 1\} \quad \lambda \in [0, 1] \quad i \in \{1, K, n\}$$

$$\mathbf{n} \geq \mathbf{0} \quad \mathbf{p} \geq \mathbf{0}$$

donde, n_j y p_j son las variables de desviación que miden las discrepancias existentes entre el valor alcanzado por el indicador j -ésimo con respecto al nivel de aspiración normalizado \bar{t}_j . Debe de observarse que, debido al sistema de normalización seguido, sólo las variables de desviación negativas n_j son no-deseadas y, por tanto, deben de figurar en la función de logro. Por otra parte, α_j representa el peso preferencial que el centro decisor asigna al indicador j -ésimo. La variable D representa la máxima desviación entre un indicador y su nivel de aspiración. Por otra parte, X_i son variables binarias, que toman el valor 1 si el sistema i -ésimo es el elegido, y el valor 0 en caso contrario. Resolviendo el modelo [2] se obtiene el sistema más sostenible. Aplicando este

procedimiento de forma iterativa se obtiene la ordenación o ranking de los sistemas analizados en términos de sostenibilidad. Asimismo, el valor óptimo de la función de logro proporciona la medida cuantitativa de la sostenibilidad asociada a cada sistema.

Finalmente, λ debe de interpretarse como un parámetro de control. Así, si $\lambda =1$ el modelo [2] nos proporcionará la solución más eficiente (i.e., la mejor solución desde el punto de vista del promedio), mientras que para $\lambda =0$ se obtiene la solución más equilibrada (i.e., la mejor solución desde el punto de vista del balanceo). Valores del parámetro de control λ perteneciente al intervalo abierto $(0,1)$ permitirán obtener compromisos entre las dos soluciones anteriores, en caso de que existan. Puede decirse que el parámetro de control λ representa la relación marginal de transformación entre eficiencia (mejor promedio) y equidad (mejor balanceo).