



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Generador matricial de programación lineal multi-objetivo para análisis aptitudinal de servicios de ecosistema

PÉREZ-RODRÍGUEZ, F.¹, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, C.², ROJO-ALBORECA, A.² y AZEVEDO, J.C.^{3,4}

¹ föra forest technologies srl..

² Unidade de Xestión Ambiental e Forestal Sostible (UXAFORES), Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Escola Politécnica Superior de Enxeñaría, Universidade de Santiago de Compostela. Campus Universitario s/n, 27002 Lugo. alberto.rojo@usc.es;

³ Instituto Politécnico de Bragança

⁴ CIMO, Centro de Investigação de Montanha (Bragança)

Resumen

La actual realidad multifuncional forestal hace que puedan entrar en juego diferentes actores, con distintas demandas al mismo tiempo y en un mismo lugar, como por ejemplo en el uso recreacional, la caza, la ganadería y el aprovechamiento maderero, entre otros. Esto puede conllevar la aparición de conflictos en el caso de que no se tomen buenas decisiones: programar cortas, restringir accesos temporalmente, etc., por lo que evaluar y prever estos posibles conflictos es el primer paso para poder minimizarlos. Se presenta en este trabajo un módulo para generación matricial de programación lineal multi-objetivo para análisis *trade-off* de diferentes servicios del ecosistema. La metodología se basa en la creación de mapas aptitudinales para cada uno de los servicios del ecosistema que se desean evaluar. Estos mapas aptitudinales son creados a partir de árboles decisionales y resueltos mediante la combinación de las metodologías AHP y MAUT. Una vez se generan las capas aptitudinales el generador matricial crea el programa lineal en base a reglas de conflicto y valor previamente establecidas por el usuario. La resolución de este problema es una capa aptitudinal de los servicios del ecosistema en conjunto, así como las posibles zonas de conflicto entre ellos.

Palabras clave

Optimización, análisis espacial, programación lineal.

1. Introducción

La gran cantidad de servicios de ecosistema que ofrecen los montes conlleva una realidad multifuncional que hace que puedan entrar en juego diferentes actores, con diferentes demandas, al mismo tiempo y en un mismo lugar (ORTIZ-URBINA et al. 2019), lo que ocurre con frecuencia en casos como el uso recreacional, la caza, la ganadería y el aprovechamiento maderero, entre otros. Esto puede generar sinergias y/o conflictos entre las partes interesadas y/o los agentes implicados en el monte, por lo que se hace necesario evaluar, prever y tener en cuenta las diferentes aptitudes o preferencias de todos, o de la mayoría, para poder tomar y aplicar decisiones en una región determinada (NIEMELÄ et al., 2005).

Cuando se habla de servicios de ecosistema y de su cuantificación/cualificación, resulta importante que los procesos para su evaluación sean abiertos, transparentes y democráticos (TURNHOUT et al., 2014). Es en este marco donde se deben analizar preferencias y/o opiniones, y se hace necesario la utilización de metodologías que transforman un valor subjetivo en un valor matemático. Para ello existen numerosas metodologías, como el *Analtic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1980). El AHP es, sin duda, el método de toma de decisiones más conocido y utilizado del mundo, y la razón se encuentra, probablemente, en su simplicidad y flexibilidad (DÍAZ-BALTEIRO & ROMERO, 2008). Esto se debe a su capacidad para descomponer un problema complejo en

múltiples más sencillos que están jerárquicamente relacionados entre sí (GOMPF et al., 2021). Pero también gracias a la comparación pareada (un criterio en comparación con otro utilizando una escala), lo que permite la obtención de los pesos de cada uno de los criterios considerados en la decisión, consiguiendo así la comparación de variables heterogéneas e, incluso, la comparación de variables cualitativas con otras cuantitativas (MELE & POLI, 2017). En este sentido, la colaboración de distintos actores puede resultar difícil por su inexperiencia o desconocimiento sobre técnicas de manejo y toma de decisiones.

El AHP es una metodología muy flexible y se ha usado en combinación con otras, como el *Multiattribute Utility Theory* (MAUT) (DYER, 2005) o la programación lineal (LP) para, entre otras muchas posibilidades, poder obtener mapas aptitudinales y con ello representar espacialmente un resultado aptitudinal óptimo (o satisfactorio si no es posible el óptimo) en un marco multiobjetivo. La programación lineal (LP) es un método que trata de minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a un número finito de restricciones (KARLOFF, 1991). Fue poco después de la segunda guerra mundial, con el crecimiento de la potencia de los ordenadores, cuando la programación lineal comenzó a generalizarse. La primera industria en aplicar este método fue la del petróleo, con unos resultados muy fructíferos (DANTZING & THAPA, 1997).

La combinación de estas metodologías ha sido ampliamente utilizada, y existen numerosos trabajos publicados con muchas aplicaciones forestales, como por ejemplo la del análisis de susceptibilidad o riesgo de incendios (LJUBOMIR et al., 2019; BUSICO et al., 2019; NUTHAMMACHOT et al., 2021), en gestión forestal (ZANDEBASIRI & POURHASHEMI, 2016), análisis de indicadores de biodiversidad (EZQUERRO et al., 2016), gestión de turismo (TAVAKOLI, 2018), análisis de posibles conflictos en áreas transfronterizas con un árbol de numerosos criterios de diferentes tipologías como conservación, uso, desarrollo y políticos, divididos en tres niveles (CASTRO-PARDO et al., 2019), aplicaciones en decisión estratégica teniendo en cuenta numerosos criterios como el del consumo de combustible en el transporte por carretera y diferentes escenarios (PÉREZ-RODRÍGUEZ & AZEVEDO, 2020), u orientados al análisis de la conservación (ZHAN et al., 2015), entre otros muchos.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar el diseño de un modelo conceptual para el futuro desarrollo de un aplicativo informático que automatice todos los procesos de estructuración y determinación con AHP, para diferentes servicios ecosistémicos, así como el desarrollo de un generador matricial para solucionar mediante programación lineal problemas multiobjetivo a nivel espacial.

3. Metodología

El generador matricial consta de dos partes: i) el generador de modelos aptitudinales basado en la metodología AHP y MAUT, en el que a través de un árbol de decisiones con diferentes criterios y atributos se aporta a cada unidad espacial un valor. ii) el constructor de funciones objetivo y restricciones, que formula la ecuación a maximizar o minimizar según el objetivo propuesto; y el constructor de restricciones, que añadirá al sistema aquellas preferencias o limitaciones globales o particulares, como puede ser que el sumatorio de la superficie de algún servicio esté entre un mínimo y/o un máximo preestablecido en una región de estudio, o si existe compatibilidad o incompatibilidad entre servicios.

Modelos aptitudinales: Una ventaja del método AHP es su facilidad para ser implementado y entendido por las partes interesadas, lo que hace que sea el sistema más ampliamente utilizado en la planificación de recursos naturales a nivel mundial (SEGURA et al., 2015). A nivel espacial, tanto

el AHP como el MAUT son muy útiles a la hora de convertir o transformar una opinión o valor subjetivo en un valor numérico que puede ser utilizado en análisis cuantitativos (PÉREZ-RODRÍGUEZ & AZEVEDO, 2020).

Constructor de funciones objetivo y restricciones: Tanto la función objetivo como las restricciones a las que está sujeta expresan la naturaleza del problema, determinándolo en forma matemática (RASHEED, 2019). La combinación de estas metodologías, AHP y LP, ayuda a la aproximación de una o varias soluciones factibles de un conjunto casi infinito de posibilidades. Por ello, la aplicación de estas metodologías se hace relevante a la hora de poder relacionar diferentes mapas aptitudinales, buscando una solución consenso entre diferentes objetivos, estableciendo diferentes restricciones en las que se determina, entre otras, la sinergia o incompatibilidad entre servicios.

4. Resultados

Se presenta a continuación el diagrama de flujo del generador matricial de programación lineal multi-objetivo para análisis aptitudinal de servicios de ecosistema. La primera consta de un diagrama de flujo para la generación de mapas aptitudinales en base a la combinación de AHP y MAUT (Figura 1). Esto se consigue mediante la estructuración a través de un árbol de criterios dividido en diferentes niveles y clústeres de subcriterios. La determinación de las preferencias de cada clúster de criterios resulta en un valor relativo, que mediante la transitividad entre los niveles del propio árbol de decisión permite obtener un valor absoluto para cada criterio, pudiendo construirse un ranking de estos. Estos pesos o valores pueden ponderar un modelo de utilidad aplicado a los atributos de un ráster o capa vectorial, obteniéndose un valor aptitudinal de 0 a 1 de preferencia para un servicio dado.

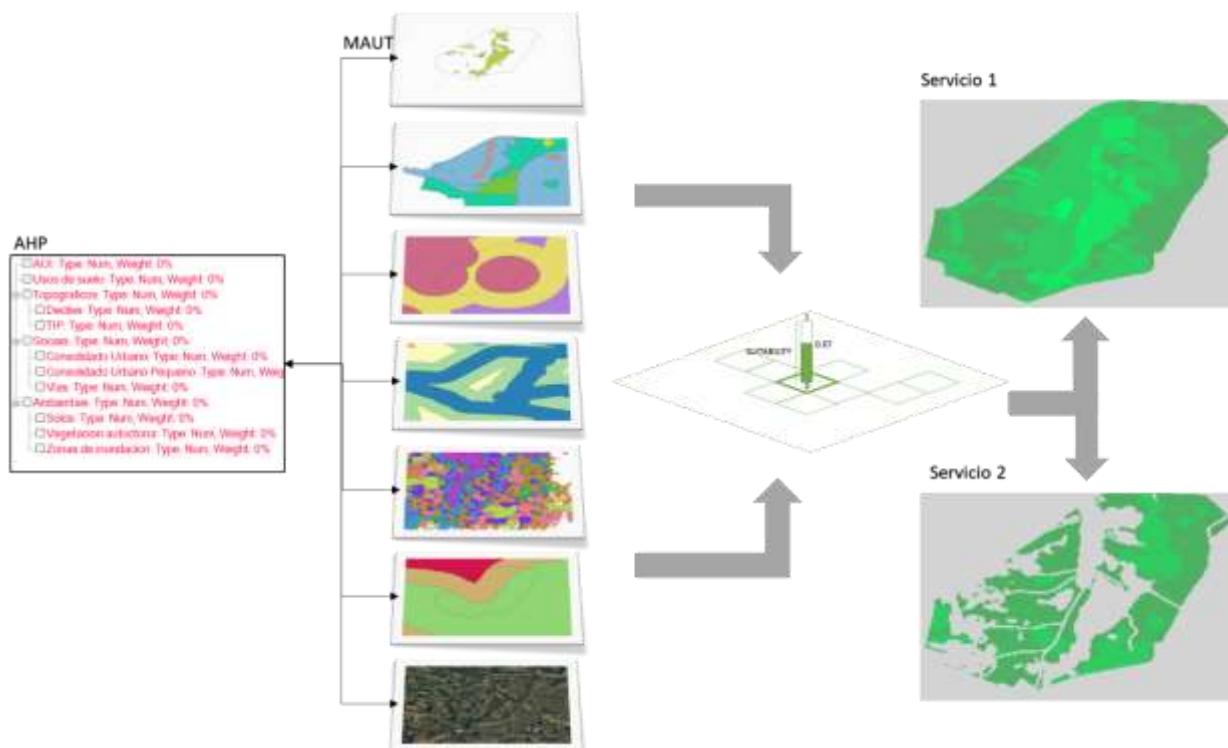


Figura 1. Diagrama de flujo para la obtención de planos aptitudinales. En la primera parte se estructura un árbol decisional que es resultado con AHP obteniendo un peso para cada criterio. Cada uno de los criterios puede llevar asociado a cartografía temática, que, mediante MAUT es establecida un peso a cada atributo. El resultado es un ráster en el que cada una de sus celdas representa un peso para determinado servicio de 0 (mínima apetencia) a 1 (máxima apetencia)

A partir de los mapas aptitudinales de diferentes servicios de ecosistema, se generan funciones objetivo recorriendo cada píxel, y generando variables con los pesos obtenidos, con el fin de maximizar o minimizar esta función (PÉREZ-RODRÍGUEZ & AZEVEDO, 2020). En la construcción de las restricciones es donde se añade el sentido de sinergia y/o incompatibilidad entre los servicios, comprometiendo a la función a la función objetivo. Por otra parte, se han de tener en cuenta restricciones que limiten por ejemplo la superficie máxima y/o mínima que se desea.

Como ejemplo de aplicación, se muestra en la Figura 2 una prueba con dos tipos de restricciones. La primera en la que la zonificación de los servicios de ecosistema son incompatibles entre ellos, o lo que es lo mismo, solo puede haber uno, o ii) en la que no se establece incompatibilidad entre ellos. Este ejemplo es totalmente genérico, ya que para poder exponer un ejemplo real se debieran obtener opiniones para evaluar el arbol previamente definido en AHP para cada servicio de ecosistema, siendo el objetivo de este trabajo realizar el modelo conceptual y general para poder resolverlos.

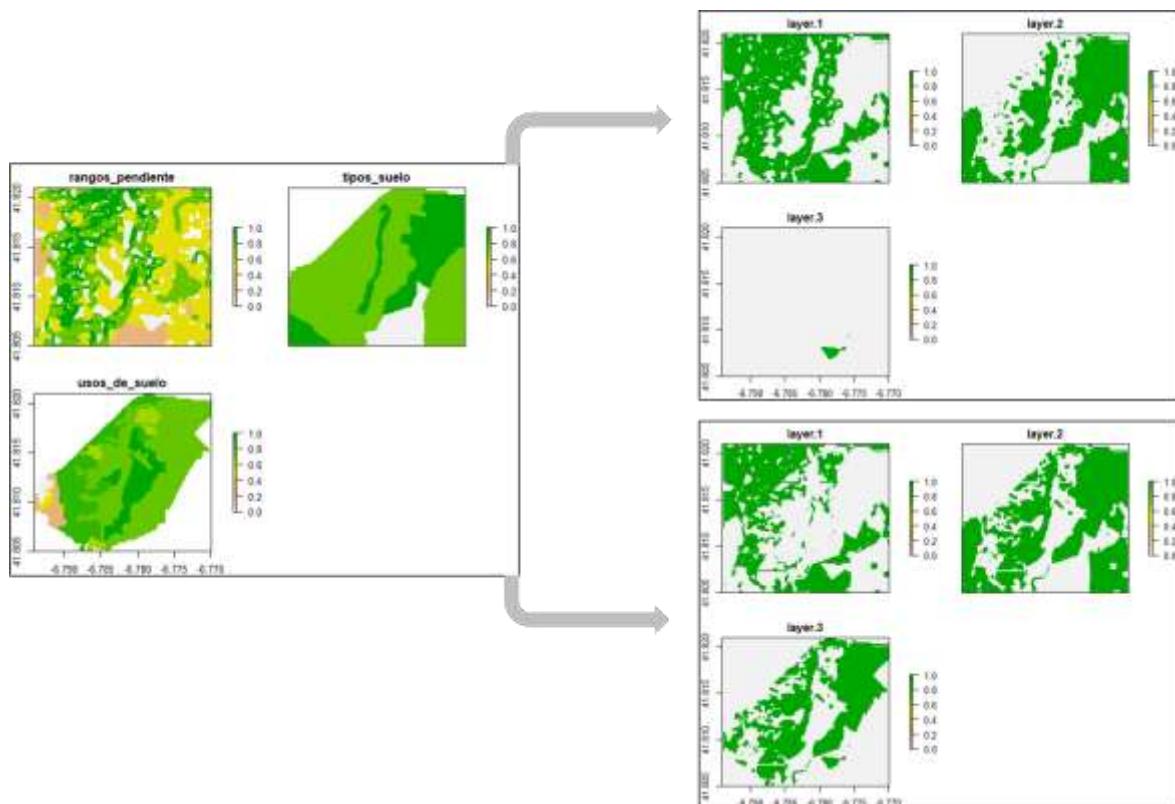


Figura 2. Se muestra en esta imagen un ejemplo de como serían las zonificaciones que dan como resultado la aplicación del generador matricial de programación lineal. En este ejemplo se construyen tres planos de aptitud, que se introducen en el generador matricial y se crea el programa a optimizar con dos posibles alternativas: la primera (arriba a la derecha) los resultados con incompatibilidad entre los tres posibles servicios de ecosistema (layer 1, layer 2 y layer 3), y abajo a la derecha lo mismo, pero sin establecer incompatibilidades.

5. Discusión

Son varias las cuestiones a considerar en la aplicación del generador matricial de programación lineal multi-objetivo para análisis aptitudinal de servicios de ecosistema que se presenta. La primera de ellas es que siempre que se utilizan métodos cualitativos o de opinión, ha de tenerse en cuenta la incertidumbre y/o la variabilidad en la opinión de una persona o grupo de personas. En este caso esa variabilidad ha de tenerse en cuenta evaluando no solamente un único

resultado, sino una batería de resultados, y estableciendo escenarios como se propone en trabajos como (PÉREZ-RODRÍGUEZ & AZEVEDO, 2020).

Por otra parte, la obtención de modelos aptitudinales en servicios de ecosistema ha de ser lo más transparente y democrático posible (TURNHOUT et al., 2014). En este sentido, la utilización de metodologías como el AHP facilitan incorporación de manera sencilla de opiniones de distintos actores que de otra manera podría resultar difícil.

Finalmente, la optimización lineal es fácil de aplicar cuando se tiene un número de variables pequeño. Sin embargo, este modelo conceptual está basado en la aplicación de la programación lineal construyendo las diferentes funciones a maximizar y/o minimizar a partir de cada uno de los valores de las celdas de un mapa aptitudinal previamente calculado, por lo que dependiendo del área de interés a abordar y el tamaño de píxel deseado, el número de variables que entran en el modelo es muy elevado. Es por ello por lo que surge la necesidad de automatización del proceso. El desarrollo de modelos de programación lineal requiere amplios conocimientos matemáticos para la construcción de las funciones objetivo, así como de las restricciones. Se hace por tanto necesario el desarrollo de un aplicativo informático que automatice todo el proceso para minimizar posibles errores en la construcción del modelo. Además, debido al posible elevado número de criterios, unido a la unidad espacial, la cantidad de variables de decisión en la función objetivo pueden ser elevadas, hasta el punto de hacer la optimización inviable sin un soporte informático.

6. Conclusiones

Tomar decisiones en un entorno multifuncional como es el forestal es sumamente complejo; sin embargo, la aplicación conjunta de metodologías cualitativas como el AHP y el MAUT ayuda para tener en cuenta opiniones de los diferentes actores, y poder así obtener aproximaciones a mapas aptitudinales o modelos de valor de un servicio del ecosistema en una región dada. La variabilidad que es inherente a estos modelos cualitativos hace que existan un número elevado de combinaciones en la preferencia por diferentes servicios. La programación lineal ayuda en este caso a poder obtener una batería de soluciones satisfactorias según unas restricciones o preferencias dadas. Esta aplicación de la programación lineal ayuda a reducir notablemente el número de posibles soluciones, facilitando con ello la toma de decisiones. Por último, el siguiente paso en este estudio es el desarrollo de la herramienta para automatizar la aplicación de las metodologías mencionadas.

7. Bibliografía

BUSICO, G.; GIUDITTA, E.; KAZAKIS, N.; COLOMBANI, N.; 2019. A hybrid GIS and AHP approach for modelling actual and future forest fire risk under climate change accounting water resources attenuation role. *Sustainability* 11(24) 7166.

DANTZIG, G.B.; THAPA, M.N.; 1997. Linear Programming 1. Springer Series in Operation Research. 1997 12-13. Berlin

DE CASTRO-PARDO, M.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, F.; MARTÍN-MARTÍN, J.M.; AZEVEDO, J. C.; 2019. Modelling stakeholders' preferences to pinpoint conflicts in the planning of transboundary protected areas. *Land Use Policy* 89 104233.

DÍAZ- BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2008. Making forestry decision with multiple criteria: A review and an assessment. *Forest Ecology and Management* 255 3222 – 3241.

DYER, J.S.; 2005. MAUT—multiattribute utility theory. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (pp. 265-292). Springer, New York, NY.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2016. Operational research techniques used for addressing biodiversity objectives into forest management: an overview. *Forests*, 7(10), 229.

GOMPF, K.; TRAVERSO, M.; HETTERICH, J.; 2021. Using Analytical Hierarchy Process (AHP) to Introduce Weights to Social Life Cycle Assessment of Mobility Services. *Sustainability* 2021 13, 1258.

KARLOFF, H.; 1991. *Linear Programming*. Springer Science & Business Media. 149. Berlin

LJUBOMIR, G.; PAMUČAR, D.; DROBNJAK, S.; POURGHASEMI, H.R.; 2019. Modeling the spatial variability of forest fire susceptibility using geographical information systems and the analytical hierarchy process. En: POURGHASEMI, H.R.; GOKCEOGLU, C.; *Spatial modeling in GIS and R for earth and environmental sciences*. 337-369. Elsevier. Holanda.

MELE, R.; GIULIANO, P.; 2017. The Effectiveness of Graphical Data in Multi-Criteria Evaluation of Landscape Services. *Data* 2017 2, 9.

NIEMELÄ, J.; YOUNG, J.; ALARD, D.; ASKASIBAR, M.; HENLE, K.; JOHNSON, R.; KURTIJA, M.; LARSSON, T.B., MATOUCH, S., NOWICKI, P., PAIVA, R., PORTOGHESI, L., SMULDERS, R., STEVENSON, A.; TARTES, U.; WATT, A.; 2005. Identifying, managing and monitoring conflicts between forest biodiversity conservation and other human interests in Europe. *Forest Policy and Economics*, 7(6), 877-890.

NUTHAMMACHOT, N.; STRATOULIAS, D.; 2021. Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: method and case study. *Environment, Development and Sustainability* 1-16.

ORTIZ-URBINA, E.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2019. Decision-making in forestry: A review of the hybridisation of multiple criteria and group decision-making methods. *Forests*, 10(5), 375.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, F.; AZEVEDO, J.C.; 2020. Evaluation of Forest Industry Scenarios to Increase Sustainable Forest Mobilization in Regions of Low Biomass Demand. *Applied Sciences* 10(18) 6297.

RASHEED, M.S.; 2010. Approximate Solutions of Barker Equation in Parabolic Orbits. *Engineering & Technology Journal* 28 (3) (2010) 492-499.

SAATY, T.L.; 1980. The Analytic Hierarchy Process. Planning priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill

SEGURA, M.; MAROTO, C.; BELTON, V.; GINESTAR, C.; 2015. A New Collaborative Methodology for Assessment and Management for Ecosystem Services. *Forests* 2015 6 1696-1720.

TAVAKOLI, M.; 2018. Comparison of Fuzzy-AHP and ANP Decision Making Methods to Assess the Ecological Capability of Ecotourism Application (Case study: Dehloran National Natural Monuments). *Geography and Sustainability of Environment* 8(3) 51-63.

TURNHOUT, E.; NEVES, K.; DE LIJSTER, E.; 2014. Measurementality in biodiversity governance: knowledge, transparency, and the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). *Environment and Planning A*, 46(3), 581-597.

ZANDEBASIRI, M.; POURHASHEMI, M.; 2016. The place of AHP method among Multi Criteria Decision Making methods in forest management. *International Journal of Applied Operational Research-An Open Access Journal* 6(2) 75-89.

ZHAN, J.; YAN, H.; SHI, C.; LIU, Y.; WU, F.; WANG, G.; 2015. Land-Use-Oriented Conservation of Ecosystem Services. En: J ZHAN, J.; 2015. Impacts of Land-use Change on Ecosystem Services. 211-260. Springer, Berlin, Heidelberg.