



Mid-mountain adaptation to  
climate change



## **LIFE MIDMACC**

### **Mid-mountain adaptation to climate change**

LIFE18 CCA/ES/001099

Start date of the project: 1st July 2019

Duration of project: 5 years

### **Entregable 21**

**Evaluación socioeconómica de las medidas de adaptación  
en zonas de media montaña**

Due date of deliverable: 12-2022

Actual submission date: 02-2023

Beneficiary leading this deliverable: OCCC

Dissemination level: Public

## Authors

Renan Goetz, Jordi Rosell y Angels Xabadia

## Cite as

Goetz R, Rosell, J, Xabadia A (2022). Evaluación socioeconómica de las medidas de adaptación en zonas de media montaña. Entregable 21. LIFE MIDMACC.

## Resumen

Este informe evalúa los impactos socioeconómicos de diferentes medidas de intervención en el territorio propuestas por el proyecto MIDMACC para mitigar los impactos del cambio climático en tres zonas de media montaña de la Península Ibérica. En particular, se evalúa el efecto de la recuperación de pastos para la ganadería extensiva, los distintos regímenes de gestión forestal que se basan en la limpieza periódica del sotobosque y la plantación de viñedos. Este informe evalúa la eficiencia, eficacia y costes y beneficios de estas medidas de intervención y el potencial de replicabilidad. Para su evaluación, el informe se centra en los efectos del cambio climático tanto actuales como futuros y sus consecuencias socioeconómicas sobre la disponibilidad de recursos hídricos, la fijación de la población en el territorio y la reducción del riesgo y la propagación de los incendios forestales, incluida la contabilización de las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas.

Los resultados muestran que las medidas de intervención en el territorio son efectivas. Por ejemplo, la limpieza de matorral en La Rioja ha reducido la probabilidad de incendio forestal en un 70% aproximadamente. Los costes evitados por hectárea quemada se evalúan en unos 1.400 € por hectárea. Los recursos hídricos generados (agua azul) aumentan para todos los escenarios de cambio climático considerados, hasta unos 4 hm<sup>3</sup>, lo que permite obtener notables ganancias económicas en algunas de las zonas consideradas. Por ejemplo, en Cataluña supone unos beneficios que se sitúan en torno a 4.900 € por hectárea intervenida, en términos de incremento en el PIB. Aparte de las medidas de intervención en el territorio, el informe contiene una herramienta que permite evaluar la efectividad y eficiencia de otras medidas para reducir la propagación de incendios forestales.

## Executive summary

This report evaluates the socioeconomic impacts of different land-intervention measures proposed by the project MIDMACC to mitigate the effects of climate change in three mid mountain regions of Spain. In particular, it evaluates the effect of the regaining pastureland for extensive livestock keeping, different forest management regimes that rely on periodical clearing of the forest understory and the plantation of vineyards. This report evaluates the efficiency, effectivity and the costs and benefits of these intervention measures and its potential for replicability. For its assessment, the report focuses on the current and future effects of climate change on the socioeconomic consequences on the availability of water resources, the fixation of the population in the territory, the reduction of the risk and spread of forest fires, and the accounting of avoided CO<sub>2</sub> emissions.

The results show that the well-defined land-intervention measures are effective. For instance, clearing shrublands in the analysed region in La Rioja reduced the probability of wildfire by approximately 70%. The costs avoided per hectare burned by the shrubland clearing policy is around 1,400 € per hectare. The generated hydric resources (blue water) increase for all considered climate change scenarios of up to 4 hm<sup>3</sup>, resulting in notable economic gains in some of the analysed areas. For example, in Catalonia it represents in terms of an increase in GDP benefits of around 4,900 € per hectare intervened. Apart from the intervention measures in the territory, the report offers a tool that allows to evaluate the effectiveness and efficiency of other measures to reduce the spread of forest fires.

## Contenido

1. Introducción.....	8
2. Evaluación de las medidas de adaptación – riesgo de incendios y fijación de población.	9
2.1. Metodología y datos .....	10
2.1.1. Área de estudio .....	10
2.1.2. Sistemas de Información Geográfica.....	13
2.1.3. Censo .....	14
2.1.4. Modelo .....	14
2.2. Resultados .....	15
2.2.1. Análisis descriptivo de los incendios forestales .....	15
2.2.2. Análisis descriptivo del buffer o área de influencia .....	16
2.2.3. Análisis descriptivo de las cabezas de ganado y población.....	20
2.2.4. Análisis económico de los incendios en el buffer o área de influencia.....	26
2.2.5. Regresiones .....	27
2.2.6. Aproximación al análisis coste beneficio de la medida .....	31
2.3. Discusión .....	33
3. Evaluación de las medidas preventivas para la reducción de la propagación de incendios.....	34
3.1. Simulación de Monte Carlo .....	34
3.2. WildfireArray.....	38
3.2.1. InterventionArray/PossibleBurntHaArray .....	38
3.2.2. BurntHaArray .....	39
3.3. Análisis coste beneficio de las intervenciones forestales.....	40
3.3.1. Análisis de sensibilidad .....	41
3.3.2. Implementación estratégica de las medidas de intervención.....	43
3.4. Resultados .....	48
4. Evaluación de las medidas de adaptación – incremento de los recursos hídricos .....	50
4.1. Metodología y datos .....	51
4.1.1. Modelo socioeconómico .....	51
4.1.2. Datos hidrológicos.....	52
4.2. Resultados .....	54
4.2.1. Resultados generales.....	54
4.2.2. Resultados para las zonas de estudio.....	55
4.3. Discusión .....	59
5. Conclusiones.....	60
6. Referencias.....	61

Anexo 1 .....	63
Anexo 2 .....	64

## Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre la superficie total y del área de estudio por provincias .....	11
Tabla 2. Relación entre la superficie del área de estudio por buffer y provincias .....	12
Tabla 3. Distribución de los incendios por tipos de causa de inicio.....	19
Tabla 4. Superficie quemada relativa por área dentro del buffer.....	20
Tabla 5. Media de cabezas de ganado y habitantes por municipios y años de censos en el área del buffer .....	24
Tabla 6. Correlación por pares en la zona del buffer con el nivel de significación y número de observaciones .....	25
Tabla 7. Medias de diferentes variables por municipios con y sin algún incendio y por comunidad autónoma .....	26
Tabla 8. Gastos de extinción y pérdidas por hectárea quemada .....	27
Tabla 9. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015 .....	29
Tabla 10. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015 por tipos de causa.....	30
Tabla 11. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015 por tipos de causa y sin las variables explicativas vegetación.....	31
Tabla 12. Beneficios y costes de los desbroces .....	32
Tabla 13. Potencial medio de preservación (porcentaje) del número de ha quemadas en función de las tasas de extensión y eficiencia .....	37
Tabla 14. Ángulos de la dirección, N = Norte, E = Este, S = Sur, W = Oeste.....	45
Tabla 15. Ángulos entre LongAxis y DirectionWind y localización del bosque rectangular. ...	46
Tabla 16. Aumento en la disponibilidad de agua azul derivado de las actuaciones .....	53
Tabla 17. Impacto del aumento de 1hm <sup>3</sup> de agua de los recursos hídricos sobre el VA.....	55
Tabla 18. Valor Actual Neto de los beneficios derivados del incremento en la disponibilidad de agua (euros por hectárea) .....	57
Tabla 19. Cálculo del coste del agua exportada .....	58

## Índice de figuras

Figura 1. Definición del área de estudio según la altitud.....	10
Figura 2. Definición del área de estudio según altitud y un buffer de 20 km de radio.....	12
Figura 3. Incendios forestales en el área de estudio entre los años 2001 y 2015 .....	15
Figura 4. Evolución temporal del número de incendios por superficie en las comunidades autónomas de La Rioja y Castilla y León.....	16
Figura 5. Incendios forestales en el área de estudio de los buffers entre los años 2001 y 2015 .....	17
Figura 6 . Distribución de los incendios por tipos de causa de inicio.....	18
Figura 7. Evolución temporal de la densidad de cabezas de ganado y población en el buffer .....	20
Figura 8. Variación del número de ovejas, cabras y población en el buffer entre los años 1999 y 2009 .....	21
Figura 9. Variación de cabezas de ovino y caprino entre los años 1999 y 2020 por municipio .....	22
Figura 10. Variación de la densidad de población entre los años 1999 y 2020 por municipio .....	23
Figura 11. Captura de pantalla de la pestaña “Análisis coste-beneficio” del programa EXCEL donde los campos de datos que el usuario tiene que introducir están marcados en amarillo .....	35
Figura 12. Daño monetario medio de la área quemada y costes de intervención medidos como una función de la tasa de extensión. Daño monetario por ha = 5.000, coste mínimo = 50, coste máximo = 80, tasa de eficiencia = 0,6, número de incendios forestales = 15.....	41
Figura 13. Daño monetario medio de la área quemada y costes de intervención medidos como una función de la tasa de extensión. Daño monetario por ha = 5.000, coste mínimo = 50, coste máximo = 80, tasa de eficiencia = 0,6, número de incendios forestales =12 .....	42
Figura 14. Ilustración del ángulo entre el eje longitudinal del rectángulo y la dirección esperada del viento.....	44
Figura 15. Recolocación del bosque rectangular como resultado del valor de Ángulo.....	44
Figura 16. Distancia óptima entre dos barreras con una tasa de eficiencia de 1.....	46
Figura 17. Distancia entre barreras y reducción del área quemada. ....	47

Figura 18. Captura de la pestaña “Strategic Intervention” del programa de Excel donde los campos llenados por el usuario están marcados en color amarillo. Los campos de color azul indican datos que el usuario ha introducido en la hoja “Cost Benefit Analysis” .....48

Figura 19. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en Aísa.....56

Figura 20. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en Leza .....56

Figura 21. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en L’Anyet.....57

Figura 22. Esquema de un modelo Input-Output .....65

Figura 23. Esquema de un modelo Input-Output multiregional con 3 regiones .....66

## 1. Introducción

El objetivo del proyecto LIFE MIDMACC es promover la adaptación de diferentes regímenes de gestión del paisaje que ayuden a mitigar el impacto del cambio climático en las zonas marginales de media montaña de la Península Ibérica (La Rioja, Aragón y Cataluña) y mejorar el desarrollo socioeconómico de estas zonas. Durante el transcurso del proyecto se han diseñado diferentes medidas de gestión en el territorio que ayudan a mitigar el impacto del cambio climático: la recuperación de pastos para la ganadería extensiva, la limpieza periódica del sotobosque y el cultivo del viñedo, con el objetivo de evaluar sus impactos ecológicos y socioeconómicos. Este informe se focaliza en los aspectos socioeconómicos de las medidas de gestión del suelo, incluido su potencial para promover la actividad económica dentro de las zonas marginales de media montaña.

Las actuaciones llevadas a cabo en este proyecto se encuentran justamente en el tercer año de experimentación, lo que dificulta el análisis detallado de su eficacia socioeconómica. Además, la incidencia de estas medidas es muy restringida en el espacio, haciendo difícil la detección de los posibles impactos que estas medidas generan en el ámbito socioeconómico. Así, frente a esta doble dificultad, se evalúan medidas similares que se desarrollan en las tres comunidades autónomas participantes en el proyecto MIDMACC.

El informe evalúa las medidas de adaptación para la reducción del riesgo de incendios y fijación de la población, para la reducción de la propagación de incendios, y para el incremento de los recursos hídricos, en lo que se refiere a los criterios de eficiencia, efectividad, coste-beneficio y replicabilidad. Para cada uno de los tres grupos de medidas, los cuatro criterios se formulan con mayor precisión de forma que sean medibles y que permitan realizar su diagnóstico.

A partir de datos empíricos, el capítulo segundo de este informe evalúa los aspectos socioeconómicos de la limpieza periódica del sotobosque para reducir la propagación de los incendios forestales, así como el impacto de estos aclareos en la fijación de la población en el territorio. El capítulo tercero desarrolla e implementa un modelo teórico en un programa informático para evaluar los aspectos socioeconómicos de la limpieza del sotobosque o de otras medidas de intervención como el cultivo del viñedo para reducir la propagación de incendios forestales e incrementar las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas. El capítulo cuarto evalúa los aspectos socioeconómicos de las medidas como consecuencia de los cambios en el equilibrio del ciclo del agua. Dado que la metodología utilizada es diferente para cada aproximación, está explicitada dentro de cada uno de los capítulos. Por último, el capítulo quinto resume las principales conclusiones de la evaluación llevada a cabo.



## 2. Evaluación de las medidas de adaptación – riesgo de incendios y fijación de población

Evaluar es la acción de analizar una determinada política, programa o intervención pública para responder a una pregunta relacionada con la problemática a la que el programa pretende resolver. A través de las evaluaciones el decisor público puede tener mayor conocimiento sobre los distintos aspectos de la política pública y, en consecuencia, debe poder permitir mejorar esta política.

En cuanto a las políticas forestales, y para revertir parcialmente la tendencia de avance del bosque (forestación) en la Península Ibérica y, por extensión, en el sur de Europa, los desbroces se configuran como una oportunidad para restaurar parcialmente los paisajes culturales, recuperar la ganadería extensiva tradicional, enfatizar la complejidad introducida históricamente por la actividad humana, y ayudar a mejorar la biodiversidad y la producción de escorrentía (agua azul) sin aumentar el riesgo de erosión del suelo. La finalidad de estas actuaciones es construir un paisaje más complejo y heterogéneo, recuperar parte del paisaje cultural, aumentar la biodiversidad, reducir la probabilidad de grandes incendios forestales, incrementar la provisión de los servicios ecosistémicos y mejorar la supervivencia de los sistemas de ganadería extensiva que también contribuyen a la biodiversidad (García-Ruiz et al., 2020).

La Rioja es una de las comunidades que ha sido pionera en gestión forestal de desbroces (Lasanta et al., 2022). Estos desbroces combinan la limpieza mecánica de arbustos con el pastoreo del ganado. Los objetivos son similares a los perseguidos con las quemas prescritas: reducir la biomasa y crear un paisaje de mosaico, con bosques alternados con matorrales y zonas de pasto. Así, además de estos dos principales objetivos, se consigue reducir también las quemas de biomasa prescritas, origen de posibles fuegos por accidente o negligencia. El objetivo es gestionar el terreno con fines ambientales (reducción de incendios) y socioeconómicos (fomentar la ganadería extensiva y fijar la población en el territorio).

En 1986 el gobierno de La Rioja puso en marcha un Plan de desbroces de matorral para mejorar el control de incendios y fomentar la ganadería extensiva (Lasanta et al., 2022). Desde entonces y hasta 2020, se ha desbrozado el 28,4% de la superficie de matorral, lo que ha contribuido a crear un paisaje más fragmentado y diverso. Esto ha supuesto la reducción de la superficie total quemada de una media de 1.060 ha anuales entre 1968 y 1986 a una media de 221,7 ha anuales entre 1987 y 2020.

Este plan de desbroces nunca se ha aplicado en las provincias de Burgos y Soria, en la comunidad autónoma de Castilla y León, al tratarse de comunidades autónomas diferentes. En Castilla y León la política de desbroces no ha sido ni mucho menos tan intensa ni en superficie tratada, ni tampoco en dotación económica. Una de las actuaciones que se llevó a cabo es el llamado Plan 42. Este plan estaba destinado a los 42 municipios de Castilla y León (un 1,9% del total) en los que se producían el 40% de los incendios forestales de la comunidad. Cada uno de estos municipios había sufrido, en el quinquenio 1995-1999, un mínimo de 50 incendios y un máximo de 243 (Moliner et al., 2008). Así, el número total de incendios generados en este quinquenio en los 42 municipios fue de 3.862. Este Plan 42 sólo estuvo vigente entre 2002 y 2010, período durante el cual sí se lograron resultados positivos en cuanto a la prevención de incendios forestales, los cuales se vieron reducidos en número en ciertas áreas de la Comunidad Autónoma. Este Plan de prevención dejó de estar operativo en 2010 debido a la carencia de medios económicos, a la que se sumaba la falta de personal cualificado, falta de medios y de asesoramiento a los ayuntamientos. La zona de actuación

más cercana era el norte de la provincia de Burgos, a unos 50 km del límite entre ambas comunidades autónomas.

El objetivo principal de este capítulo es cuantificar el efecto de los desbroces en la reducción de incendios forestales en la media montaña, así como el ahorro económico en reducción de gastos de extinción y pérdidas económicas derivadas de estos incendios. También, se analizarán las variaciones de población en zonas con desbroces, comparando sus efectos con zonas donde no se han producido.

Los indicadores que se utilizarán cumplirán los criterios de credibilidad, legitimidad, relevancia y replicabilidad.

## 2.1. Metodología y datos

### 2.1.1. Área de estudio

El área de estudio está comprendida por dos partes: el área tratada y el área control. El área tratada corresponde a la media montaña de La Rioja. Entendemos como media montaña aquellas zonas con una altitud entre los 700 y 1.500 m. Esto hace que, de esta comunidad quede excluida, mayoritariamente, una parte con altitudes superiores a los 1.500 m y que hace frontera con la provincia de Soria, así como también el valle del río Ebro por tener una altitud inferior a los 700 m, situada en el norte de esta comunidad atravesándola de oeste a este (Figura 1).

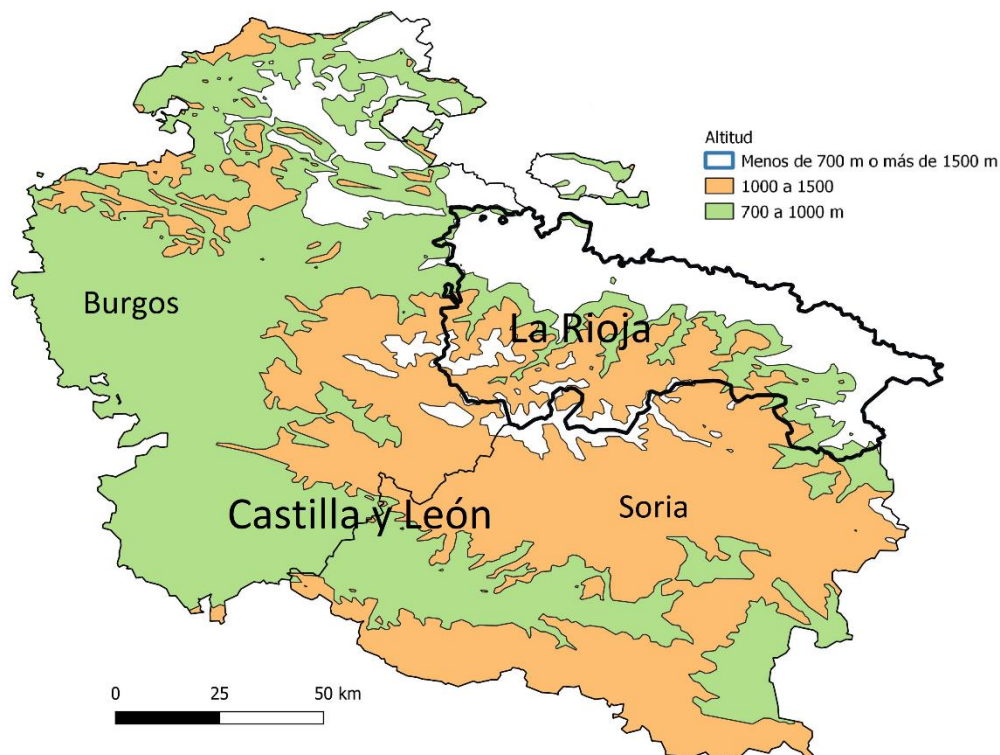


Figura 1. Definición del área de estudio según la altitud

El área control corresponde a la media montaña limítrofe a la media montaña de La Rioja. En este caso, en las provincias de Burgos y Soria, en Castilla y León, que son limítrofes en el monte medio de La Rioja. Se aplica el mismo criterio de intervalo de altitud (entre 700 y 1500 m). Por lo que respecta a la provincia de Soria, prácticamente toda esta provincia pasa a ser zona control. Por lo que se refiere a la provincia de Burgos, mayoritariamente se excluye una parte del noroeste por altitud inferior a la escogida, pero también buena parte de esta provincia pasa a ser zona control (Tabla 1).

Provincia	Superficie total (km <sup>2</sup> )	Superficie área estudio (km <sup>2</sup> )	Porcentaje área estudio sobre superficie total (%)
<b>La Rioja</b>	5.045	2.888,6	57,26%
<b>Burgos</b>	14.292	12.873	90,07%
<b>Soria</b>	10.306	9.986	96,90%

*Tabla 1. Relación entre la superficie total y del área de estudio por provincias*

De la anterior área de estudio se desprende una importante limitación: se están comparando zonas con una distancia superior al centenar de kilómetros del límite entre la zona tratada y control. Aunque se tengan en cuenta estos factores, una zona de estudio de partida con características más similares puede facilitar la comparativa. Así, manteniendo el criterio de la altitud explicado en la Figura 1, se aplica un buffer sobre la frontera administrativa entre las dos comunidades autónomas, para establecer una área de influencia (Figura 2). Con este buffer se pretende reducir el efecto de otras variables al tratarse de escenarios geográficos distintos. Para acotar la aleatoriedad en la generación de este buffer, se decide realizar un primer buffer de 10 km de radio.

En la Figura 2 sale representado dentro del área buffer, como la zona gris. Aproximadamente representa unos 10 km desde el límite administrativo entre ambas comunidades hasta un punto de la zona tratada o control más alejado de esta frontera. Con este buffer, el principal problema es que el número de incendios forestales es muy bajo y no permite realizar la comparación entre ambas áreas con total garantías de que haya suficiente número de observaciones. Así, se opta por un buffer de 20 km de radio.

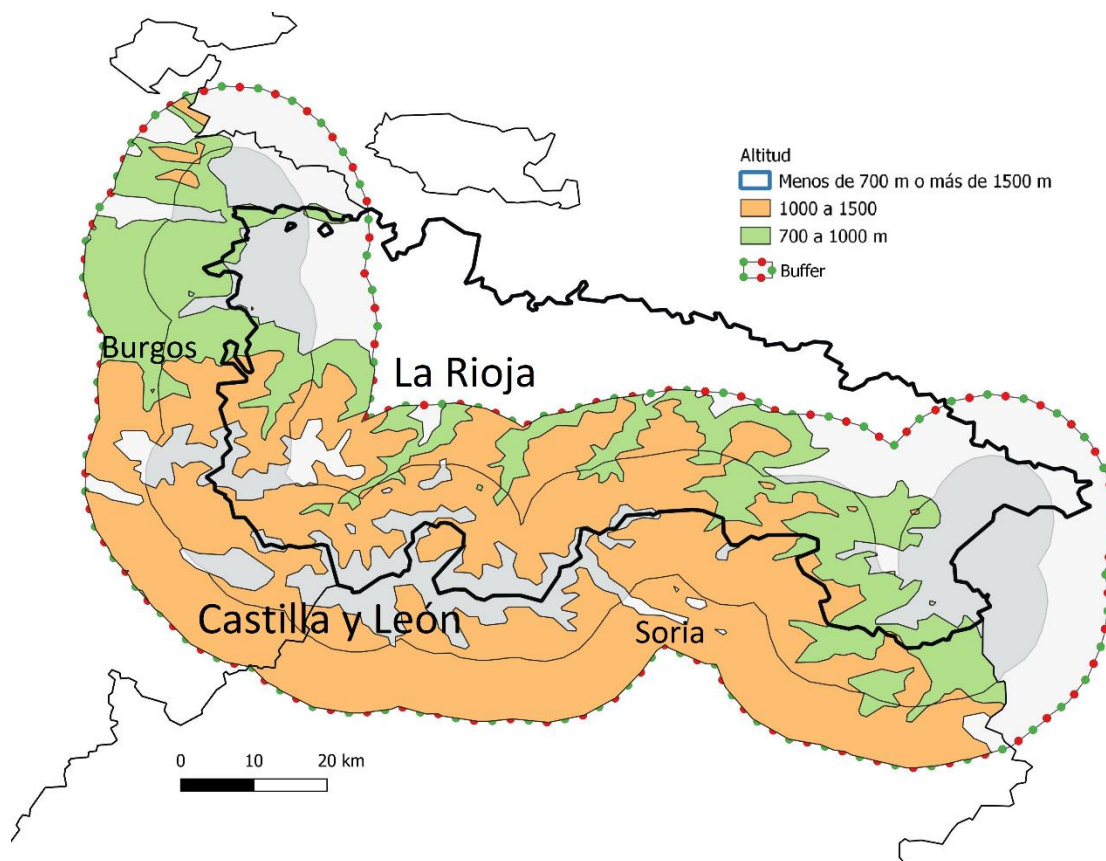


Figura 2. Definición del área de estudio según altitud y un buffer de 20 km de radio

En la Tabla 2 se cuantifica la superficie del buffer para cada provincia y para diferentes niveles de altitud de la Figura 2. Comparando con los datos de la Tabla 1, existe una gran reducción de la superficie susceptible de estudio en las provincias de Burgos y Soria. Así, el buffer que corresponde a un radio aproximado de unos 20 km implica que el 37,63% del total de la superficie corresponde a La Rioja, mientras que el 62,37% en Castilla y León.

Área	Altitud	La Rioja (km <sup>2</sup> )	Burgos (km <sup>2</sup> )	Soria (km <sup>2</sup> )	Total (km <sup>2</sup> )
Buffer	700-1.000 m	829	649,8	184,9	1.663,7
	1.000-1.500 m	1.266,7	740,9	1.898,4	3.906
<b>Total</b>		2.095,7	1.390,7	2.083,3	5.569,7

Tabla 2. Relación entre la superficie del área de estudio por buffer y provincias

La base de datos de incendios forestales ha sido elaborada por la ONG [Civio](#) a partir de los datos de incendios forestales de los que dispone el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). No existe ninguna base de datos en España tan amplia y con tantas variables como ésta, y que presenta homogeneidad geográfica en su elaboración. Como principal limitación, sólo incluye los incendios forestales entre 2001 y 2015. Así, se ha preferido tener la base de datos más fiel de la realidad, aunque el período temporal no sea el más reciente.

Existen otras limitaciones menores como:

- la causalidad de los incendios forestales no es cierta, sino supuesta en más del 55% de los casos,
- la geolocalización de los incendios no está especificada en casi un 18% de los incendios,
- la información sobre pérdidas económicas y gastos es muy escasa, lo que hace muy difícil analizar el coste real de los incendios que se han producido. Más de un 30% de los informes de incendios no proporcionan datos de gastos de extinción y casi un 9% carecen de datos de pérdidas económicas.
- los datos ofrecidos por el Ministerio pueden contener errores.

Para cada incendio forestal, se dispone de las siguientes variables, entre otras:

- la fecha de detección del incendio,
- las coordenadas geográficas del inicio del incendio, así como la comunidad autónoma, provincia y municipio,
- la causa del incendio,
- la superficie quemada,
- el número de muertes,
- el número de heridos,
- el tiempo para tener controlado el incendio,
- el tiempo para extinguir el incendio,
- el número de personas que han participado en la extinción del incendio (incluye técnicos, agentes forestales, brigadas, bomberos, voluntarios, guardias civiles y ejército),
- el número de medios terrestres y aéreos que han participado en la extinción del incendio (incluye autobombas, bulldozers, tractores, aviones y otros),
- los gastos de extinción asociados al incendio y, finalmente,
- las pérdidas económicas asociadas al incendio.

### 2.1.2. Sistemas de Información Geográfica

Las capas en un Sistema de Información Geográfica tienen gran cantidad de información, hecho que deben ser consideradas como base de datos. Del Instituto Geográfico Nacional, se utilizan:

- Límites comunidades autónomas, provinciales y municipales. A partir de estas capas, se calculará tanto la superficie de término municipal como de buffer para las zonas tratadas y control.

- Orografía: para escoger el territorio considerado como media montaña, se escogerá aquella superficie que tenga una altitud entre los 700 y 1.500 m por encima del nivel del mar, diferenciando entre 700 y 1.000 m y entre 1.000 y 1.500 m . Para cada término municipal, se escogerá también la altitud de éste.
- Cubiertas vegetales provenientes del proyecto europeo CORINE Land Cover con una nomenclatura de cuarenta y cuatro clases y con versión del año 1990. Se elige el tipo de cobertura predominante en el término municipal. Se hace una clasificación de cuatro tipos de cubiertas vegetales: cultivos de secano, bosque, matorral y viñedos. Dentro de la categoría de bosque, se incluye el bosque de frondosas, coníferas y bosque mixto. En cuanto a matorral, se incluye la categoría de pastos naturales, landas y matorral, vegetación esclerófila y matorral boscoso de transición.

### 2.1.3. Censo

En cuanto a la población municipal, se toman los datos del censo realizados por el Instituto Nacional de Estadística en el año 1999, 2009 y 2020. También, el dato del padrón municipal para el año 2015, al coincidir con el fin del período de los datos de incendios forestales. En cuanto a los censos agrarios, éstos se realizan según marca el calendario establecido por las autoridades europeas. Así, se eligen los censos agrarios de 1999, 2009 y 2020 para obtener la información a nivel municipal. Las variables escogidas son el número de cabezas de ganado ovino y caprino, dado que son los rebaños que más se benefician de los desbroces de matorral. También se utiliza el censo de 2020 a efectos descriptivos.

### 2.1.4. Modelo

En esta evaluación se pretende responder a la pregunta de si una política de desbroces tiene un efecto sobre la reducción del número de incendios o no en la media montaña. El área de estudio, como ya se ha mencionado, corresponde a la zona de la media montaña entre La Rioja y Castilla y León creada a partir de un buffer de 20 km.

Para aislar el efecto de los desbroces, se propone utilizar un conjunto de regresiones lineales que permitan aislar el efecto de los desbroces controlando por diferentes variables. Así, se plantea un modelo de regresión logística con las siguientes variables explicativas:

$$\begin{aligned} \text{Incendio alguna vez}_i &= \text{La Rioja}_i + \text{Superficie}_i + \text{Altitud}_i + \text{Vegetación}_i + \text{Población (log)}_i \\ &+ \text{Densidad población}_i + \text{Densidad ovejas y cabras}_i + \varepsilon_i \end{aligned}$$

- La variable dependiente Incendio alguna vez es una variable dicotómica que toma el valor 1 si en ese municipio del buffer ha habido algún incendio entre el año 2001 y 2015, y cero en cualquier otro caso. Así, en este modelo se pierde el efecto temporal y no se pueden observar los efectos de los desbroces a lo largo del tiempo.
- La variable La Rioja es una variable dicotómica que toma el valor 1 si ese municipio está en La Rioja, mientras que toma el valor cero si está en Castilla y León.
- La variable Superficie son los km<sup>2</sup> del término municipal.
- La variable Altitud es la altitud sobre el mar en la que se encuentra el Ayuntamiento de ese municipio.

- La variable Vegetación es una variable categórica que puede tomar cuatro posibles valores: cultivos de secano, bosque, matorral y viñedos.
- La variable Población es el logaritmo de la población en ese municipio en el año 2015.
- La variable Densidad de población, los habitantes por kilómetro cuadrado en ese municipio en el año 2015.
- La variable Densidad de ovejas y cabras es la cantidad de cabezas de ganado por kilómetro cuadrado del término municipal en el año 2009.

En este modelo se puede cambiar la definición de la variable dependiente de "si ha habido algún incendio en ese término municipal" a "si ha habido algún incendio en ese término municipal por alguna causa concreta". Es decir, dado que los incendios forestales pueden ser causados por rayos, causas intencionadas, accidentes, negligencia o causas desconocidas, estas cuatro variables pueden ser también variables dependientes en diferentes regresiones.

## 2.2. Resultados

### 2.2.1. Análisis descriptivo de los incendios forestales

En la Figura 3 se representan los incendios forestales entre el año 2001 y 2015. Tal como se puede observar, se detecta en La Rioja un menor número de incendios forestales, sobre todo en el área de 1.000 a 1.500 m. Se detecta una distribución relativamente homogénea de los incendios en toda la superficie de media montaña de Castilla y León, pero con la excepción de la zona de La Rioja, donde aparecen áreas sin prácticamente ningún incendio.

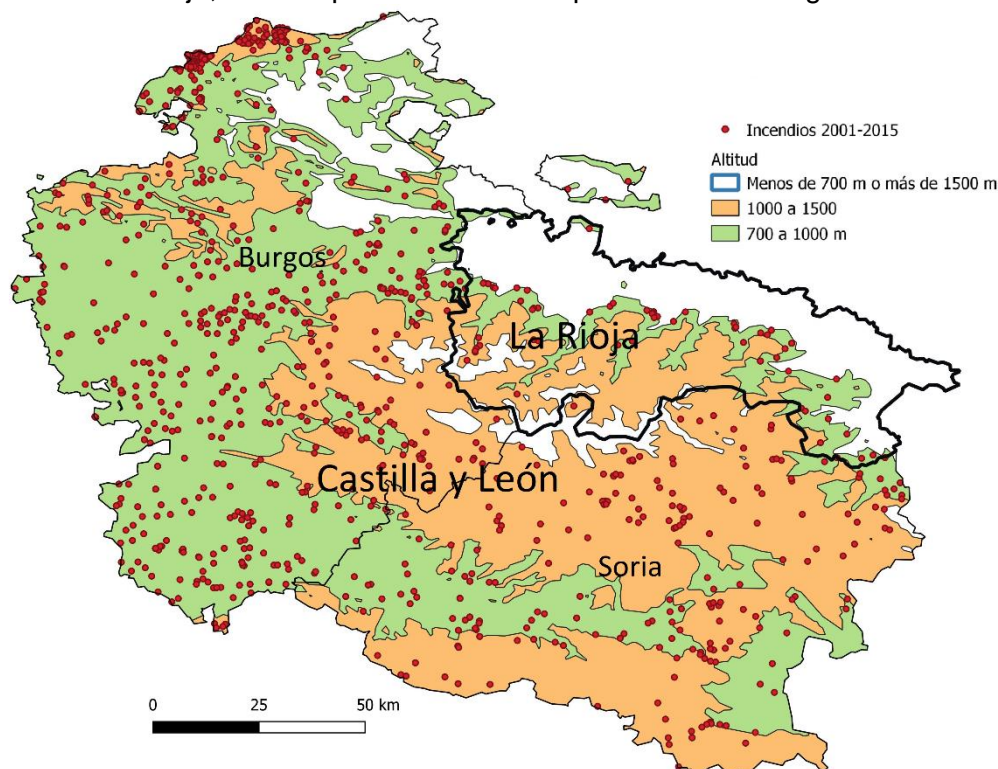


Figura 3. Incendios forestales en el área de estudio entre los años 2001 y 2015

Siguiendo con el mismo hilo argumental de la importancia de la reducción del número de incendios por la misma unidad de superficie, en la Figura 4 se muestra la evolución a lo largo del tiempo del número de incendios por cada 1000 km<sup>2</sup>. Tal como puede verse, la tendencia de disminución en ambas zonas es muy parecida, aunque es destacable que el número de incendios ha disminuido más en La Rioja que en Castilla y León.

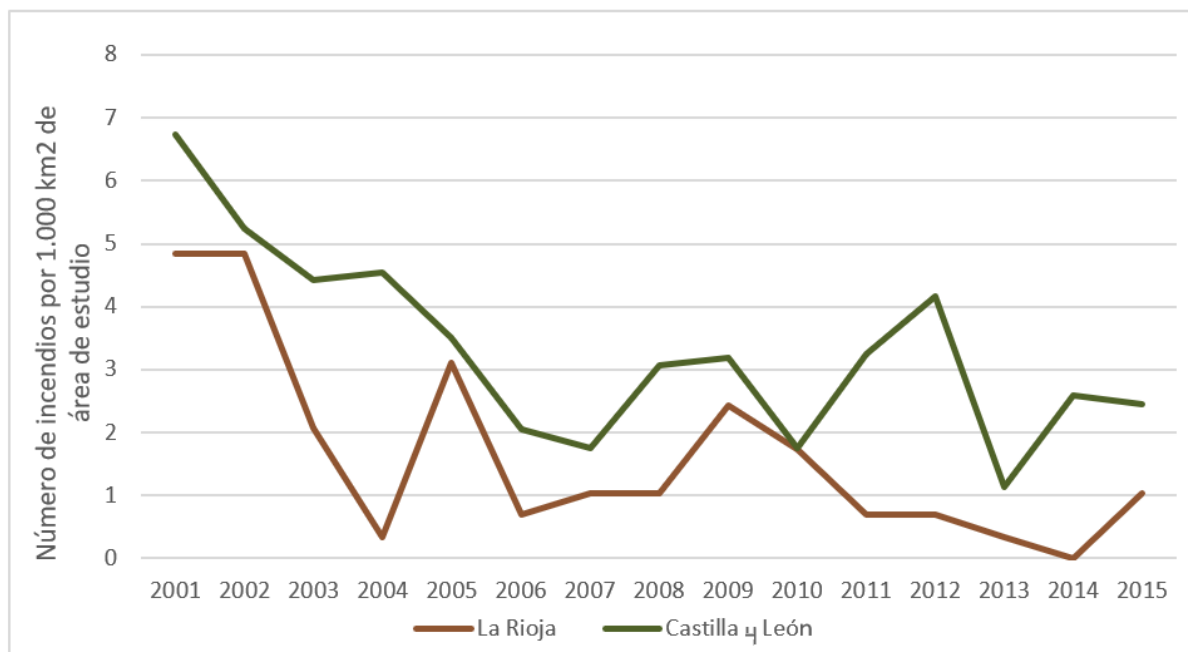


Figura 4. Evolución temporal del número de incendios por superficie en las comunidades autónomas de La Rioja y Castilla y León

### 2.2.2. Análisis descriptivo del buffer o área de influencia

En el subapartado anterior, se han descrito los principales resultados cuando el área de estudio correspondía a toda la superficie de las provincias del área de estudio que estuvieran en el intervalo de altitud seleccionado (Figura 1). A continuación, se realizará el análisis descriptivo cuando el área seleccionada corresponde a un buffer de 20 km de radio (Figura 2).

En la Figura 5 se muestran los incendios entre 2001 y 2015. A simple vista se puede ver cómo en La Rioja el número de incendios es menor. Más concretamente, a una altitud entre los 1.000 y 1.500 m, la diferencia con Castilla y León es clara. Por lo que se refiere a la altura entre 700 y 1.000 m, esta diferencia no parece tan clara. Si miramos si en un término municipal se ha declarado algún incendio en este período en las diferentes comunidades autónomas, encontramos que, en Castilla y León, al 49,25% de los municipios se ha dado al menos un incendio mientras que para La Rioja, tan sólo en el 22,4% de los municipios se ha dado al menos un incendio. Un test de medias nos dice que estos valores son distintos para un nivel de significación del 99%. Por tanto, se confirma que hay diferencias en si un municipio ha



sufrido un incendio o no durante este período dependiendo de la comunidad autónoma a la que pertenece.

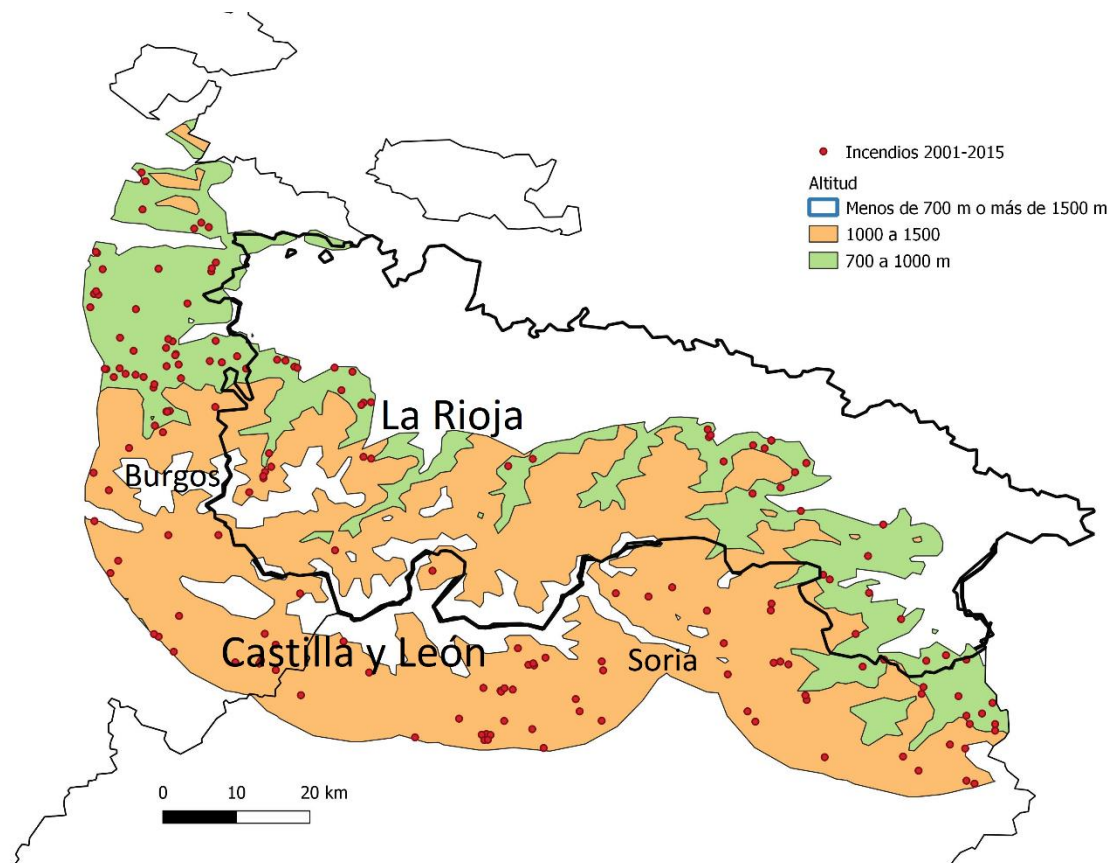


Figura 5. Incendios forestales en el área de estudio de los buffers entre los años 2001 y 2015

En la Figura 6 se muestran las cuatro principales causas de inicio de un incendio: por un rayo, por causa intencionada, por accidente o negligencia y por causa desconocida.

- En cuanto a los rayos, en La Rioja hay dos incendios mientras que en Castilla y León seis. Con estos valores, un test de diferencia de medias nos dice que estos dos valores no presentan diferencias para ambos grupos.
- En cuanto a los incendios de causa intencionada, se detecta un mayor número de incendios en Castilla y León que en La Rioja. Más concretamente, un 28,4% de los municipios de Castilla y León tuvieron al menos un incendio por causa intencionada, mientras que, en La Rioja, se sitúa en el 20,7%.
- Por contra, cuando la causa de origen del incendio es un accidente o negligencia, en la Figura 6 se observa que en La Rioja tan sólo se da un incendio. Así, en el 6,7% de los municipios de Castilla y León se ha dado al menos un incendio por accidente o negligencia mientras que en La Rioja sólo ha sido el 0,9%. Para un nivel de significación del 95%, estos valores son distintos.

- En cuanto a los incendios de causa desconocida, éstos se dan en el 5,2% de los municipios de Castilla y León y, en el 2,6% de los municipios de La Rioja.

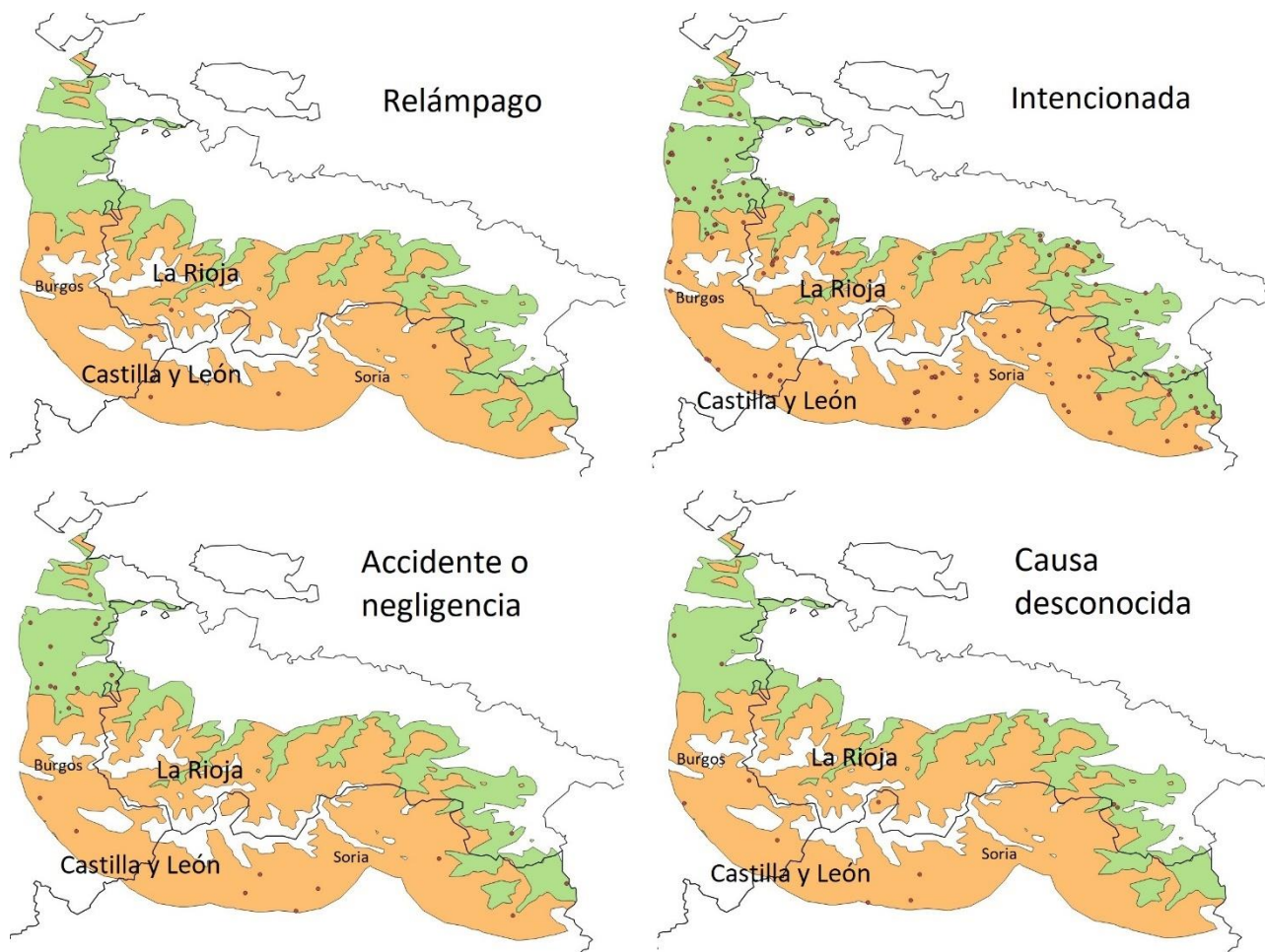


Figura 6 . Distribución de los incendios por tipos de causa de inicio

	Número de incendios		Número de incendios por 1.000 km <sup>2</sup>	
	Castilla y León	La Rioja	Castilla y León	La Rioja
<b>Relámpago</b>	6**	2	1,73	0,95
<b>Intencionada</b>	97**	47	27,92	22,43
<b>Accidente o negligencia</b>	23	1	6,62	0,48
<b>Desconocida</b>	4*	8	1,15	3,82
<b>Total</b>	134**	54	38,57	25,77

Niveles de significación: \* 90%, \*\* 95%, \*\*\* 99%

*Tabla 3. Distribución de los incendios por tipos de causa de inicio*

En la Niveles de significación: \* 90%, \*\* 95%, \*\*\* 99%

Tabla 3 se muestra el número de incendios en cada comunidad autónoma del buffer y según la causa de origen. En cuanto a los rayos, la proporción es de 6 incendios en Castilla y León y de 2 incendios en La Rioja, siendo esta diferencia significativa al 95%. Sin embargo, si lo hacemos por superficie de buffer, esta diferencia se ve reducida. En cuanto a los incendios de causa intencionada, encontramos el doble de incendios en el área de Castilla y León que en La Rioja. Estas medias son estadísticamente distintas entre sí. Sin embargo, cuando corregimos por superficie de buffer, el número de incendios por causa intencionada en Castilla y León sigue siendo un 24,5% mayor que en La Rioja.

Cuando la causa es un accidente o una negligencia, la proporción es de 23 incendios en Castilla y León y 1 en La Rioja. No se puede realizar un test de diferencia de medias dado que sólo hay una observación en la zona de La Rioja. Sin embargo, la proporción de incendios por accidente o negligencia es mucho mayor en Castilla y León. Si lo hacemos por superficie de buffer, encontramos que en Castilla y León se dan 13 veces más incendios por accidente o negligencia que en La Rioja. Por tanto, hay suficiente evidencia de que los incendios por accidente o negligencia se dan en menor número en La Rioja. En cuanto a los incendios por causas desconocidas, encontramos que existen más en La Rioja, tanto en cifras absolutas como relativas a la superficie.

A partir de estos datos, podemos afirmar que en la zona del buffer riojano se han dado muchos menos incendios por accidente o negligencia que en el lado del buffer de Castilla y León. Igualmente, el número de incendios por causa intencionada también son mucho menores en La Rioja que en Castilla y León.

En cuanto a las características de los incendios forestales, encontramos que se han quemado 1.449 ha en la zona de Castilla y León, y 917 ha en La Rioja. Si miramos la superficie quemada por la totalidad de los incendios durante el período de análisis por superficie de buffer, en La Rioja los incendios que se han producido han quemado 0,437 hectáreas por kilómetro cuadrado de buffer (Tabla 4), mientras que en Castilla y León la cifra es ligeramente inferior. Así, el mayor número de incendios en Castilla y León que en La Rioja iría acompañado de una superficie quemada por incendio mucho mayor en Castilla y León (16,97) que en la parte del buffer riojano (10,81).

Superficie área estudio	Área	Ha quemadas	Ha quemadas / km <sup>2</sup> buffer	Ha quemadas por incendio
Buffer	La Rioja	916,6	0,437	10,81
	Castilla y León	1.449,2	0,417	16,97

Tabla 4. Superficie quemada relativa por área dentro del buffer

### 2.2.3. Análisis descriptivo de las cabezas de ganado y población

A continuación, se compara la evolución de las cabezas de ganado y de la población en el buffer. En cuanto a la densidad de cabezas de ganado de ovejas y cabras, en 1999 eran muy parecidas entre las dos comunidades autónomas (Figura 7). Con el paso del tiempo, existe una disminución del número de cabezas en ambas zonas, con la diferencia de que en Castilla y León esta disminución es mayor que en La Rioja, tanto si escogemos en 2009 como en 2020. Así, la disminución en el número absoluto de ovejas y cabras es menor en La Rioja (Figura 8). En cuanto a la densidad de población, ésta es mucho más elevada en La Rioja que en Castilla y León. Así, vemos que entre 1999 y 2009 aumenta en un 8% en la zona de Castilla y León la densidad de población, mientras que en La Rioja lo hace en un 16% (Figura 8).

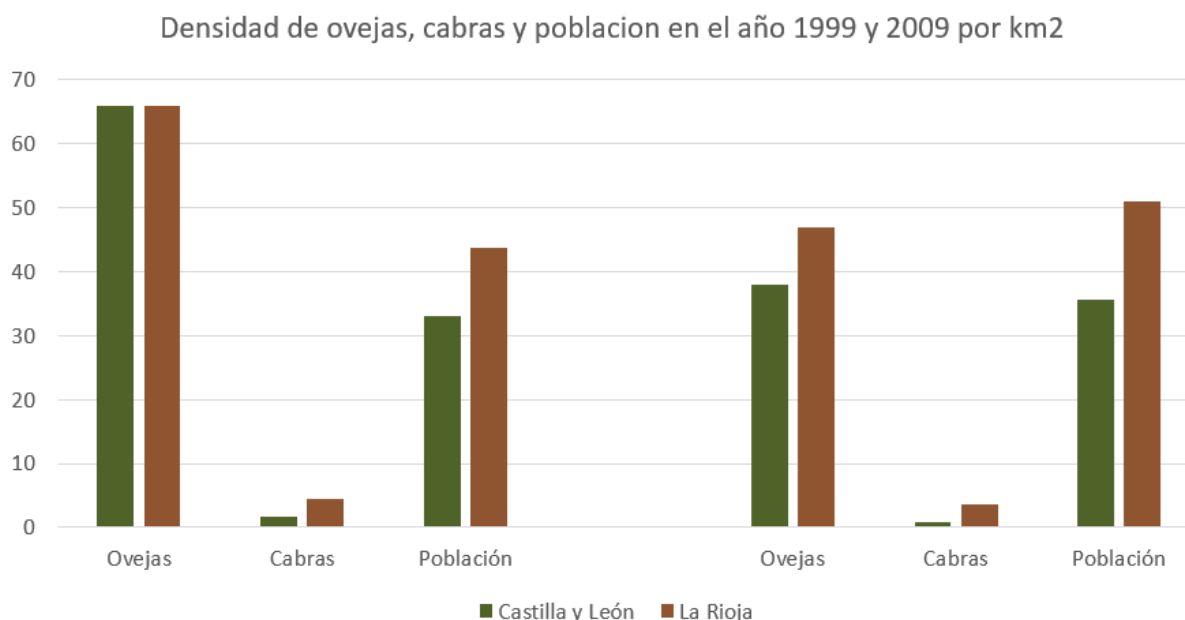


Figura 7. Evolución temporal de la densidad de cabezas de ganado y población en el buffer

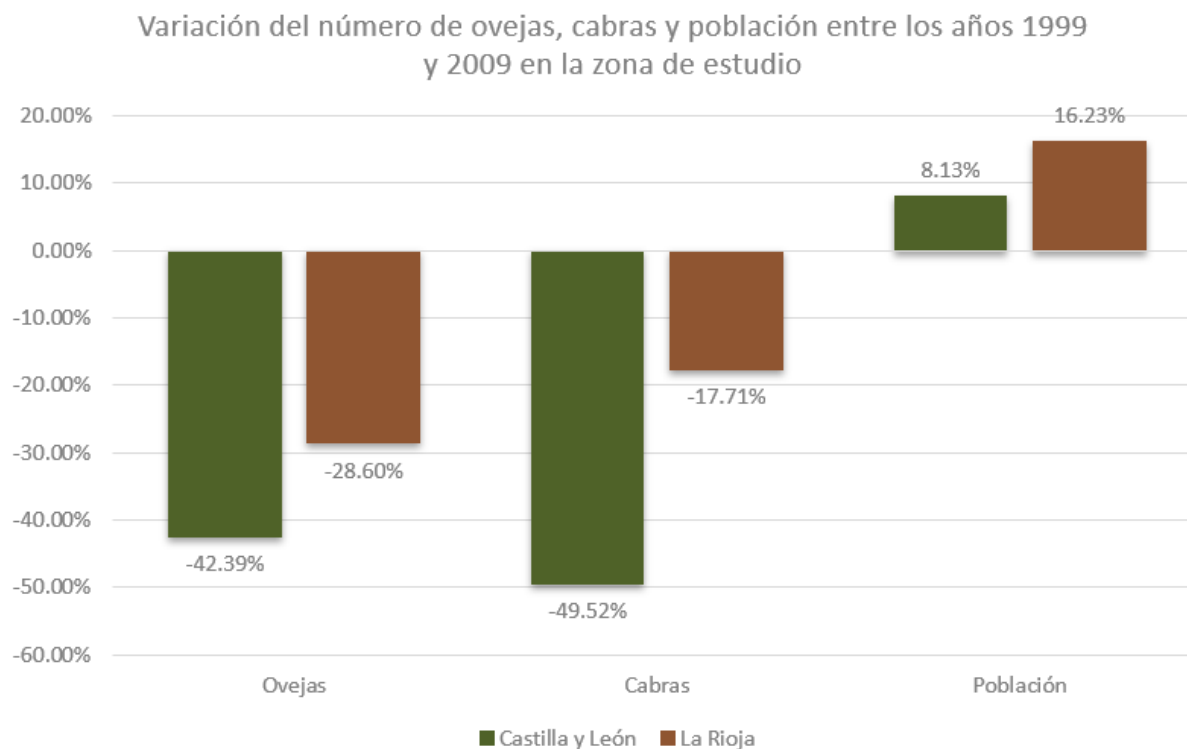


Figura 8. Variación del número de ovejas, cabras y población en el buffer entre los años 1999 y 2009

Aunque la disminución en reses es más pronunciada en la parte de Castilla y León que en La Rioja, se podría detectar alguna dinámica territorial diferenciada en el buffer. Por eso, en la Figura 9 se compara la evolución de las reses (ovino y caprino) entre los años 1999 y 2020. Tal y como se puede observar, no existe ningún tipo de dinámica geográfica muy marcada entre los distintos lados de la frontera. Sin embargo, se observa que hay más municipios en la zona riojana que aumentan el número de cabezas de ganado en más de un 25% que en la zona de Castilla y León. Por otra parte, las fuertes reducciones de reses se dan con más frecuencia en Castilla y León que en La Rioja. Así, se detecta una cierta dinámica espacial de disminuciones de las reses allá donde no se han hecho los desbroces de matorral y/o los aclareos.

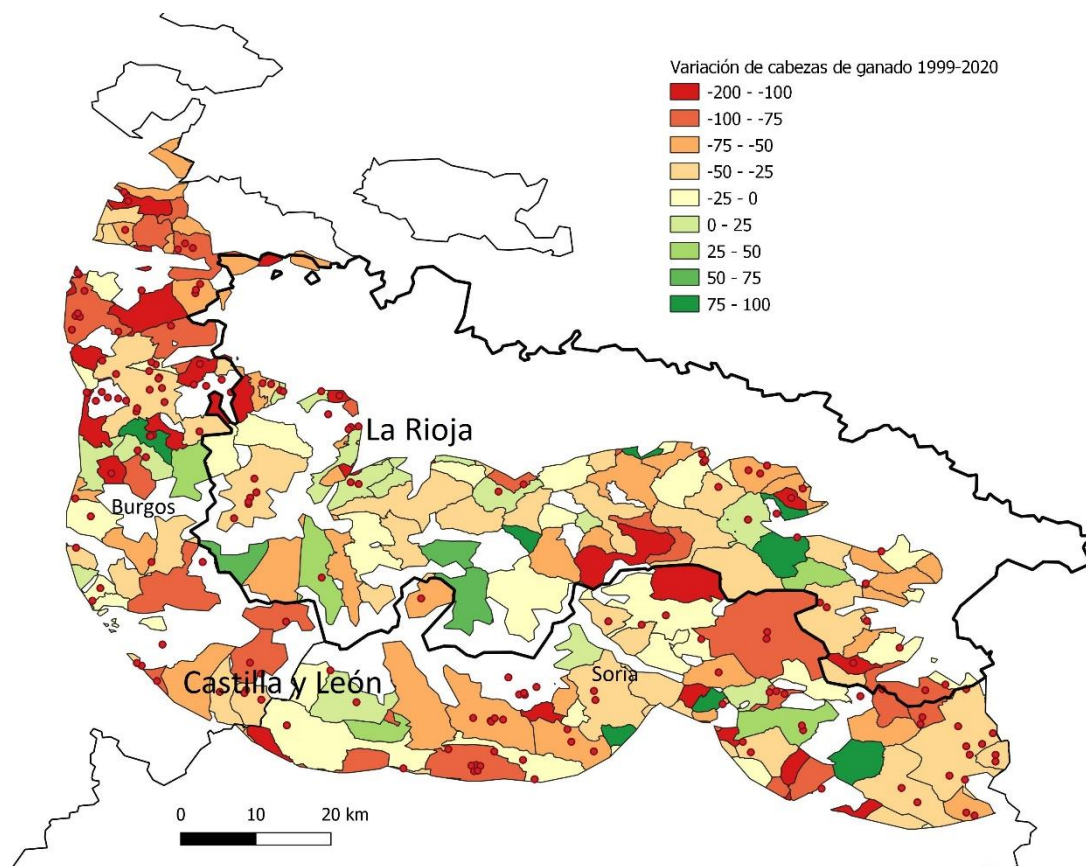


Figura 9. Variación de cabezas de ovino y caprino entre los años 1999 y 2020 por municipio

Una vez analizada la situación por las reses, hacemos el mismo ejercicio para la población; comparamos la evolución de la densidad de población a nivel de municipio por el buffer. Tal como podemos observar en la Figura 10, no se detecta ninguna dinámica espacial específica a nivel territorial en la variación de la densidad de población. Sin embargo, se da una situación parecida a la de la Figura 9: hay más municipios que pierden población en el lado de Castilla y León que en el de La Rioja, así como también hay más municipios que ganan población en el lado de La Rioja que en Castilla y León.

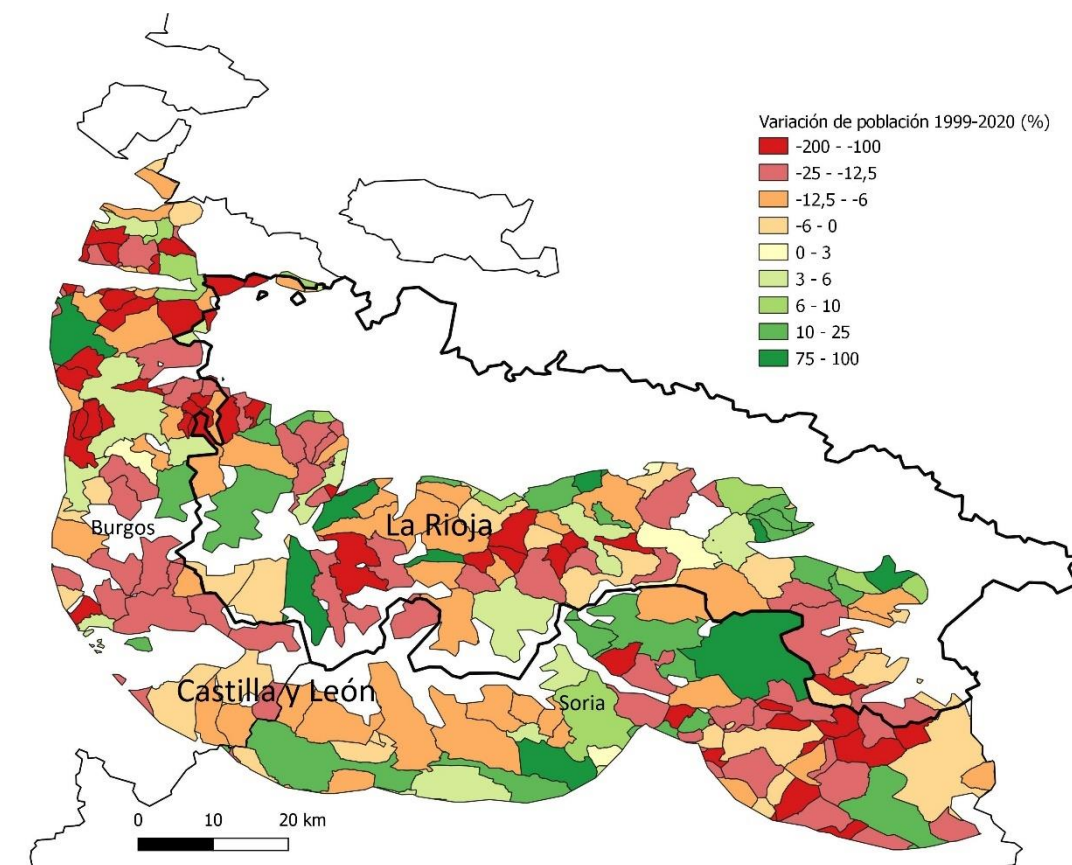


Figura 10. Variación de la densidad de población entre los años 1999 y 2020 por municipio

Para complementar la información de la Figura 9 y la Figura 10, obtenemos la media municipal en densidad de reses y habitantes para los años 1999, 2009 y 2020 (Tabla 5). Para cada año, realizamos un test de diferencia de medias entre ambos valores. En cuanto a reses, en el año 1999 había más densidad de reses en Castilla y León que en La Rioja. Con el paso del tiempo, esa diferencia desaparece. Aunque las cifras puedan indicar que en La Rioja existe una densidad de reses un 50% más elevada que en Castilla y León (30,23 vs 20,80), no se puede llegar a afirmar esto dado que el test de diferencia de medias nos dice que esta diferencia no es significativa para el año 2020. En cuanto a la densidad de habitantes, en 1999 no se aprecia ninguna diferencia significativa entre ambas zonas. Sin embargo, con el paso del tiempo, la densidad de población en Castilla y León es menor que en La Rioja. Así, estaríamos ante una dinámica de pérdida de población en la zona castellana.

	Densidad de ovejas y cabras (cabezas/km <sup>2</sup> )			Densidad población (habitantes/km <sup>2</sup> )		
	1999	2009	2020	1999	2009	2020
<b>Castilla y León</b>	61,90 <sup>***</sup>	28,42	20,80	12,26	12,06*	10,51*
<b>La Rioja</b>	41,78	35,23	30,23	18,31	21,15	19,45

Niveles de significación: \* 90%, \*\* 95%, \*\*\* 99%

*Tabla 5. Media de cabezas de ganado y habitantes por municipios y años de censos en el área del buffer*

Entre las distintas variables, podemos examinar cuál es su nivel de relación. Por eso, en la Tabla 6 se muestra el nivel de correlación por pares para los municipios que están dentro del buffer de análisis. Se muestra el valor de esa correlación, su nivel de significación y el número de observaciones. Para las variables relativas a la cantidad de ovejas, cabras y el total de éstas, se toma el censo del año 2009. Si hubiésemos tomado los datos del censo de 2020 no se da ningún cambio en los niveles de significación encontrados y que describimos a continuación. El número de habitantes en un municipio tiene relación positiva con que se haya producido algún incendio en el municipio, aunque con un valor de correlación entre bajo y moderado. Otras variables a destacar que parece que no afectan a que se haya producido un incendio son la densidad de ovejas, cabras o la suma de cabezas en total. No se detectan demasiadas diferencias entre La Rioja y Castilla y León con las variables analizadas. Tan sólo se detecta que en La Rioja existe una mayor densidad de cabras. Sin embargo, este resultado no es trasladable para las ovejas. El coeficiente entre las variables dicotómicas La Rioja e Incendio alguna vez no tiene mucho sentido su interpretación, aunque muestra un nivel de relación moderado y negativo entre haberse producido algún incendio en un municipio y que este municipio no se encuentre en La Rioja. Este valor parece confirmar los valores de la Figura 5, donde en La Rioja se dan menos incendios que en Castilla y León.



	Incendio alguna vez	La Rioja	Población (log)	Densidad población	Densidad ovejas	Densidad cabras	Densidad cabezas
La Rioja	-0,300	1					
	0						
	250	250					
Población (log)	<b>0,179</b>	0,030	1				
	0,005	0,634					
	250	250	250				
Densidad población	-0,050	0,066	0,661	1			
	0,433	0,298	0				
	250	250	250	250			
Densidad ovejas	0,034	0,077	0,053	0,070	1		
	0,625	0,262	0,441	0,308			
	214	214	214	214	214		
Densidad cabras	-0,006	<b>0,287</b>	0,050	0,019	0,295	1	
	0,936	0	0,485	0,793	0		
	200	200	200	200	194	200	
Densidad cabezas	-0,049	0,041	-0,105	-0,003	0,817	0,310	1
	0,471	0,544	0,119	0,965	0	0	
	220	220	220	220	214	200	220

Tabla 6. Correlación por pares en la zona del buffer con el nivel de significación y número de observaciones

Pasamos a describir las diferencias entre las zonas del buffer que han tenido al menos un incendio o ninguno y por comunidades autónomas. Con esta comparativa, se pretende realizar una aproximación a las regresiones del subapartado siguiente. Primero, en el 49,25% de los municipios de Castilla y León se ha dado al menos un incendio entre el año 2001 y 2015, mientras que en La Rioja sólo se ha dado en el 22,4% de los municipios (Niveles de significación: \* 90%, \*\* 95%, \*\*\* 99%

Tabla 5). Un test de diferencia de medias indica que este resultado es estadísticamente significativo al 99%. Por tanto, hay más del doble de probabilidad de encontrar un municipio con al menos un incendio forestal en la zona de Castilla y León que en La Rioja.

A pesar de esta probabilidad, puede haber diferencias entre las diversas variables entre comunidades autónomas. Por ejemplo, los municipios de Castilla y León que han sufrido un incendio tienen una superficie de 51,6 km<sup>2</sup>, mientras que los municipios de la parte riojana que han sufrido un incendio tienen una extensión de 46,9 km<sup>2</sup>. A pesar de esta diferencia, éstas no son estadísticamente significativas. En cuanto a la altitud, los municipios de Castilla y León donde ha habido un incendio, éste se ha declarado a 987,5 m mientras que en La Rioja en los 722,4 m. La diferencia de medias es estadísticamente significativa en el 99%. Del mismo modo, los municipios donde no se ha declarado ningún incendio de Castilla y León, tienen una altitud sobre el nivel del mar de 947,7 m, mientras que, en los municipios riojanos sin ningún incendio, la altitud es de 754,3 m. Esta diferencia de medias es estadísticamente significativa en el 99%. En cuanto a las demás variables, no se detecta ninguna diferencia entre que se den los incendios en una u otra comunidad autónoma. Tan sólo cabe destacar que en los municipios de Castilla y León donde no se han dado incendios, la densidad de cabezas es inferior a la riojana (16,1 vs. 30,7). Por otra parte, no hay ninguna diferencia estadísticamente significativa en la densidad de reses en Castilla y León entre los municipios donde ha habido al menos un incendio y donde nunca ha habido ninguno.

	Castilla y León		La Rioja	
	Al menos un incendio	Ningún incendio	Al menos un incendio	Ningún incendio
<b>Proporción de municipios con al menos un incendio (%)</b>	49,25***	50,18	22,4	77,6
<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	51,56	28,32	46,93	30,57
<b>Altitud (m)</b>	987,47***	947,72***	722,35	754,29
<b>Cultivos de secano (%)</b>	22,73	44,11	19,23	30,00
<b>Matorral (%)</b>	19,70	11,77	34,62	22,22
<b>Arbolado (%)</b>	57,57	44,12	42,31	43,33
<b>Viñedos (%)</b>	0	0	3,84	4,45
<b>Población (hab.)</b>	1058,06	653,18	908,6	784,42
<b>Densidad población (hab/km<sup>2</sup>)</b>	10,40	10,61	15,87	20,48
<b>Densidad cabezas (cabezas/km<sup>2</sup>)</b>	25,68	16,06**	28,83	30,65
<b>Observaciones</b>	134		116	

Niveles de significación: \* 10%, \*\* 5%, \*\*\* 1%

*Tabla 7. Medias de diferentes variables por municipios con y sin algún incendio y por comunidad autónoma*

#### 2.2.4. Análisis económico de los incendios en el buffer o área de influencia

En este subapartado, se pretende analizar si existen diferencias en gastos de extinción y pérdidas ligadas a los incendios forestales. Tal y como se describe en el apartado 2.1.2, no

se proporciona para la mayoría de los incendios información económica. Así, para las variables gastos de extinción y pérdidas ligadas a estos incendios, se dispone de pocas observaciones. Más concretamente, para el total de 188 incendios en el buffer, sólo se dispone de datos en gastos de extinción para 72 incendios, y en pérdidas ocasionadas por éstos en 75 incendios. Por otra parte, se actualizan los valores económicos según los datos de inflación para Castilla y León y La Rioja, siendo las cifras en euros correspondientes al año 2021.

En la Tabla 8 se muestran los gastos de extinción y las pérdidas ocasionadas por los incendios forestales para cada comunidad autónoma según la zona del buffer. Los gastos de extinción en La Rioja son de 917,67 € por hectárea, mientras que en Castilla y León son de 1.292,87 €. Aunque en Castilla y León son más elevadas, un test de diferencia de medias no nos permite afirmar que ambos valores son distintos. En cambio, en las pérdidas por hectárea quemada sí encontramos diferencias significativas. Es decir, las pérdidas en el área riojana son de 237,57 € por hectárea, mientras que en Castilla y León lo son de 1.274,03 €. La diferencia de pérdidas ocasionadas es de 1.036,56€, mientras que en gastos de extinción es de 375,02€. Así, la diferencia en gastos de extinción y pérdidas sería de 1.411,58 € por hectárea quemada.

Superficie área estudio	Área	Gastos de extinción / ha quemada	Pérdidas / ha quemada
Buffer	La Rioja	917,67 €	237,57** €
	Castilla y León	1.292,87 €	1.274,03 €

Niveles de significación: \* 10%, \*\* 5%, \*\*\* 1%

Tabla 8. Gastos de extinción y pérdidas por hectárea quemada

Esta cifra de 1.411,58 € corresponde al diferencial de costes directos ocasionados por los incendios forestales en la zona del buffer de Castilla y León en comparación con La Rioja.

### 2.2.5. Regresiones

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la regresión descrita en la subsección Metodología. El objetivo principal es analizar si existen efectos de la variable La Rioja, así que se van añadiendo variables explicativas para encontrar si existe algún cambio en el comportamiento de la variable que mide si ha habido algún incendio forestal. Ante todo, debemos decir que las variables que se utilizan en cada una de las especificaciones añaden valor predictivo, tal y como muestra el test del ratio de verosimilitud. Por otra parte, la variabilidad explicada por parte de las variables explicativas es creciente conforme añadimos más variables. Así, el  $R^2$  McFadden pasa de un valor de 0,074 a 0,175. Sin embargo, cabe destacar el valor de este estadístico cuando sólo se incluye la variable dicotómica *La Rioja*, que llega a explicar el 0,074 de la variabilidad total de la variable dependiente. Así, estar en una u otra área geográfica parece tener cierto poder explicativo. Otro estadístico del modelo responde al valor del Akaike (AIC). La especificación a elegir será aquella que tenga el menor valor. En nuestro caso, la especificación con más variables incluidas (especificación 5) sería la especificación a elegir. Adicionalmente, se ha realizado un test de multicolinealidad

de factor de inflación de la varianza y todas las variables están por debajo de cuatro, lo que nos permite descartar la presencia de multicolinealidad.

La variable dicotómica *La Rioja* es negativa y significativa para todas las especificaciones. Si hacemos la interpretación de este coeficiente a partir de las razones de probabilidad de la regresión logística, encontramos que en los municipios de La Rioja existe entre un 67 y un 77% menos de probabilidad de que se haya dado al menos un incendio entre el año 2001 y 2015 respecto a la zona limítrofe del buffer de Castilla y León.

A continuación, explicamos los resultados de las variables explicativas y de control. La variable *Superficie* es positiva y significativa; a mayor superficie del término municipal, mayor es la probabilidad de sufrir un incendio entre 2001 y 2015. La variable *Altitud* no es significativa para ninguna de las especificaciones. La variable categórica tipo de vegetación no parece afectar a la probabilidad de que se dé al menos un incendio en ese municipio, a grandes rasgos. Sin embargo, es significativa en la mayoría de las especificaciones la variable *Matorral*: cuando la vegetación predominante es el matorral, existe entre 2,4 y 2,6 más probabilidad de que se haya dado un incendio en el municipio.

La *Población* en un municipio es positiva y significativa al 99% para ambas especificaciones; cuanto mayor es la población de un municipio, mayor es la probabilidad de que se haya dado un incendio. Por lo que respecta a la *Densidad de población*, ésta es negativa y significativa. Así, municipios con mayor densidad de población, tienen menos probabilidad de haber sufrido un incendio. En cuanto a la *densidad de ovejas y cabras*, esta variable no afecta a tener un incendio o no.

Variable dependiente: algún incendio entre 2001 y 2015	Espec. 1	Espec. 2	Espec. 3	Espec. 4	Espec. 5
	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)
La Rioja	-1,202*** (0,263)	-1,107*** (0,298)	-1,385*** (0,337)	-1,371*** (0,340)	-1,471*** (0,385)
Superficie		0,015*** (0,004)	0,014*** (0,005)	0,005 (0,006)	0,021*** (0,006)
Altitud (log)		0,406 (0,543)	-0,413 (0,707)	-0,226 (0,809)	0,239 (0,843)
Vegetación (cultivo secano)					
Matorral			1,182** (0,478)	1,064* (0,484)	0,836 (0,511)
Arbolado			0,502 (0,425)	0,242 (0,440)	0,066 (0,466)
Viñedo			-0,941 (1,384)	-0,915 (1,390)	-1,161 (1,432)

Variable dependiente: algún incendio entre 2001 y 2015	Espec. 1	Espec. 2	Espec. 3	Espec. 4	Espec. 5
Población (log)				0,559*** (0,192)	0,631*** (0,210)
Densidad población				-0,014** (0,007)	-0,016*** (0,007)
Densidad ovejas y cabras					0,009 (0,040)
Constante	0,002 (0,171)	-3,340 (3,720)	1,845 (4,714)	-4,565 (5,722)	-4,858 (5,948)
Observaciones	250	250	250	250	250
R <sup>2</sup> McFadden	0,074	0,122	0,144	0,174	0,175
Test ratio razón de verosimilitud (p-valor)	24,28 (0,0)	40,22 (0,0)	47,46 (0,0)	57,12 (0,0)	51,62 (0,0)
AIC	308,66	296,72	295,49	289,89	262,80

Tabla 9. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015

Tal como se describe en la subsección de Metodología, la variable dependiente puede ser una variable dicotómica que toma el valor 1 si ha habido algún incendio por una causa concreta y 0 por cualquier otro motivo. En la Tabla 10 se muestran los resultados para cada una de las cuatro variables dependientes a partir de la especificación 5 de la Tabla 9, al ser la especificación preferida por tener un valor lo más bajo posible del criterio Akaike (AIC). En cuanto a la especificación de los incendios originados por un rayo, la variable La Rioja sale como no significativa; no existen efectos territoriales en los incendios originados por rayos. En cuanto a los incendios de causa intencionada, se detecta un efecto negativo en el área del buffer riojano. Este coeficiente negativo y altamente significativo, tiene una interpretación de una reducción de la probabilidad del 74% que se haya declarado al menos un incendio entre los años 2001 y 2015 en el área del buffer riojano, manteniendo todas las demás variables igual. Cuando la causa del incendio es desconocida, tampoco se detecta ningún efecto significativo de la variable La Rioja. En cuanto a la especificación de los fuegos con origen una negligencia o accidente, la variable La Rioja no es significativa. En la Tabla 10 **Error! Reference source not found.** se puede ver cómo los fuegos por negligencia son prácticamente inexistentes en La Rioja, mientras que el modelo no encuentra ningún efecto significativo, aunque el coeficiente aparece con un signo negativo. En el número de observaciones, se ve que se han perdido unas cincuenta y cinco observaciones en la regresión, lo que puede explicar este resultado. Estas observaciones se pierden por multicolinealidad de la variable tipo de vegetación.

Variable dependiente	Relámpago	Intencionada	Negligencia	Desconocida
	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)	Coef. (Error. St.)
La Rioja	-0,910 (1,239)	-1,338*** (0,412)	-1,869 (1,188)	-0,819 (0,821)
Superficie	0,020 (0,017)	0,003*** (0,006)	0,001 (0,011)	-0,003 (0,013)
Altitud (log)	4,088 (3,596)	-2,947 (0,898)	-0,656 (1,880)	-1,205 (1,670)
Vegetación (cultivo seco)				
Matorral	-	0,975* (0,516)	-	-
Arbolado	-9,848** (4,529)	0,727 (0,474)	-1,044 (0,958)	0,491 (0,948)
Viñedo	-	-1,252 (1,177)	-0,941 (1,384)	-
Población (log)	-0,991 (0,793)	0,203 (0,197)	0,442 (0,380)	0,601 (0,511)
Densidad población	-0,016 (0,031)	0,001 (0,005)	-0,002 (0,009)	-0,032 (0,037)
Densidad ovejas y cabras	-0,033 (0,034)	-0,006 (0,005)	0,005 (0,006)	-0,002 (0,011)
Constante	-17,452 (22,423)	-3,340 (3,721)	-8,707 (12,781)	2,696 (11,469)
Observaciones	123	250	195	195
R <sup>2</sup> McFadden	0,193	0,110	0,140	0,059
Test ratio razón de verosimilitud (p-valor)	9,27 (0,234)	30,78 (0,0)	11,01 (0,138)	4,65 (0,70)
AIC	54,68	296,29	83,88	90,239

Tabla 10. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015 por tipos de causa

Dada la pérdida de observaciones por la variable *Vegetación* en la Tabla 10, en la Tabla 11 se realizan las mismas regresiones omitiendo la variable *Vegetación*. A grandes rasgos, se mantienen los resultados de las diferentes variables explicativas mientras que, a nivel de la variable *La Rioja*, se mantiene la no significación en las especificaciones de fuegos con origen un rayo o causa desconocida mientras que para las causas de inicio del fuego intencionado o por negligencia, son negativas y significativas. Más concretamente, en el caso de la especificación de fuegos causados de forma intencionada, en *La Rioja* existe una disminución

del 65% de la probabilidad de que se dé al menos un fuego por causa intencionada, manteniendo constante las demás variables. Por otro lado, existe un 92% menos de probabilidad de que se dé al menos un incendio en La Rioja por una negligencia que en la zona del buffer de Castilla y León.

	<b>Relámpago</b>	<b>Intencionada</b>	<b>Negligencia</b>	<b>Desconocida</b>
	<b>Coef. (Error. St.)</b>	<b>Coef. (Error. St.)</b>	<b>Coef. (Error. St.)</b>	<b>Coef. (Error. St.)</b>
La Rioja	-0,176 (1,239)	-1,047*** (0,375)	-2,534** (1,220)	-0,867 (0,816)
Superficie	0,014 (0,013)	0,004*** (0,006)	-0,004 (0,010)	-0,004 (0,012)
Altitud (log)	0,726 (1,987)	-1,915 (0,700)	-0,415 (1,421)	-0,484 (1,383)
Población (log)	-0,991 (0,792)	0,214 (0,191)	0,460 (0,361)	0,659 (0,519)
Densidad población	-0,006 (0,022)	-0,002 (0,005)	-0,001 (0,008)	-0,039 (0,044)
Densidad ovejas y cabras	-0,019 (0,034)	-0,005 (0,005)	0,0022 (0,006)	-0,005 (0,012)
Constante	-8,352 (14,418)	11,072 (4,996)	-1,979 (9,891)	-2,186 (9,791)
Observaciones	250	250	250	250
R <sup>2</sup> McFadden	0,060	0,090	0,134	0,059
Test ratio de verosimilitud (p-valor)	3,38 (0,760)	25,24 (0,0)	11,22 (0,134)	4,97 (0,545)
AIC	67,23	268,81	86,76	93,02

Tabla 11. Regresión logística sobre haber tenido un incendio en un municipio del buffer entre 2001 y 2015 por tipos de causa y sin las variables explicativas vegetación

### 2.2.6. Aproximación al análisis coste beneficio de la medida

Para la elaboración del análisis coste-beneficio, debe realizarse una determinación de los posibles costes y beneficios, así como su valoración monetaria. Mientras que en un análisis económico-financiero sólo tendremos en cuenta los flujos de caja, en un análisis coste-beneficio también debemos tener en cuenta los costes y beneficios sociales (Tabla 12).

Para estimar el valor social de la política deberemos escoger el horizonte temporal y la tasa de descuento social para actualizar los diferentes flujos. En cuanto al horizonte temporal, escogeremos el período temporal de 2001 a 2015. Dado que los desbroces se practicaban

con anterioridad a 2001, podemos considerar que en nuestro período temporal se da un estado estacionario entre costes y beneficios. Es decir, tanto a principio como a final de nuestro período, los costes y beneficios son constantes.

La valoración de los costes y beneficios se realizará a través de los precios de mercado. Sin embargo, en muchos casos no es posible una valoración directa de éstos, por lo que habrá que buscar el mejor criterio en ausencia del mismo. Para los precios de mercado, no pueden utilizarse precios públicos regulados o subvencionados, así como precios que incluyan requerimientos fiscales, como es el caso del IVA u otros tributos indirectos. En el caso de impuestos indirectos, no se incluirán cuando sean una transferencia, pero sí cuando se trate de una predisposición a pagar.

Beneficios	Costos
Reducción de los gastos de extinción en incendios forestales	Coste de los desbroces
Reducción de las pérdidas económicas de los incendios forestales	
Reducción de las externalidades de los incendios forestales	
Externalidades positivas de los desbroces en otros sectores	

*Tabla 12. Beneficios y costes de los desbroces*

Para cuantificar el coste de los desbroces en el buffer sabemos que se han extendido 18.918 ha durante este período en toda La Rioja (Lasanta et al., 2022). A partir del IV Inventario Forestal de La Rioja y, suponiendo que la proporción de desbroce es la misma en el buffer que en La Rioja, obtenemos que se ha actuado sobre 12.789 ha en el buffer entre 2001 y 2015. Si suponemos un coste medio de 434,27 € por hectárea en 2021 (dato de uso interno por parte del gobierno de La Rioja), los gastos en desbroces ascienden a 5.553.879 €.

Para cuantificar la reducción en gastos de extinción y pérdidas ligadas a incendios forestales, necesitamos saber qué cantidad se hubiera quemado en la zona del buffer riojano si no se hubieran llevado a cabo los desbroces entre 2001 y 2015. Si escogemos el modelo con un menor Akaike de la Tabla 9, que representa el mejor modelo de los encontrados, y hacemos una predicción con esta regresión logística, obtenemos que, si no se hubiera llevado a cabo la política de desbroces en La Rioja, se habrían quemado 641,62 ha más en la zona riojana del buffer. Esto implica que se han ahorrado 240.620€ en extinción de incendios y 665.077€ en pérdidas económicas.

En este capítulo se ha podido evaluar y cuantificar la reducción de los gastos de extinción y las pérdidas económicas evitadas de los incendios forestales gracias a los desbroces. A parte de estos beneficios, faltaría poder estimar otros beneficios ligados a los desbroces, como las menores externalidades negativas derivadas de la reducción en el riesgo de los incendios forestales (emisiones de gases de efecto invernadero, biodiversidad...) así como externalidades positivas que los desbroces pueden estar originando, como es el caso de la creación de puestos de trabajo y diversificación de la economía local. La valoración económica de estos conceptos nos permitiría poder realizar una evaluación completa de los desbroces.



### 2.3. Discusión

Uno de los resultados a destacar de este capítulo es que los desbroces estarían reduciendo entre un 67 y un 77% la probabilidad de que se dé al menos un incendio forestal en un municipio de La Rioja entre los años 2001 y 2015 en comparación con un municipio de Castilla y León. Lasanta et al. (2022) aportan que en La Rioja se quemaron entre 1968 y 1986 una media de 1.060 ha por año, mientras que de 1987 a 2020 fue de 221,7 ha/año. Se trata de una reducción del 79% entre antes y después de la entrada en vigor de la política de desbroces en La Rioja. Si hacemos coincidir esta estadística con nuestro período temporal de análisis, de 2001 a 2015, encontramos que la superficie forestal quemada en La Rioja ha sido de 146,63 ha por año. Esta reducción sería, por tanto, del 86,2%.

Un segundo resultado a destacar es la reducción del número de incendios ligados a causas intencionadas, así como también por negligencias o accidentes en la zona del buffer riojano. Con los datos disponibles, no se puede ni atribuir directamente esta diferencia a la política de desbroces en La Rioja, ni tampoco se puede descartar que éste sea el motivo principal de esta reducción. Cabe recordar que los desbroces pretenden reducir las quemadas de biomasa, que pueden ser el origen de muchos incendios originados por accidente o negligencia, o incluso de causa intencionada. Por tanto, aunque no se puede atribuir de forma automática esta reducción de incendios, sí que hay motivos suficientes para pensar que esta reducción se debe a los desbroces.

Un tercer resultado ligado a los incendios forestales a destacar sería la obtención de los costes directos evitados por hectárea quemada. En la Rioja, esta cifra es de 1.411,58 € teniendo en cuenta los gastos de extinción y pérdidas ligadas a los incendios. Buena parte de este diferencial se debe a las pérdidas evitadas (1.036,56 €) más que a gastos de extinción (375,02 €).

Esta cifra no es la totalidad de los costes evitados por hectárea por la política de desbroces en incendios forestales, ya que debería incluirse la valorización económica de las externalidades negativas ligadas a los incendios forestales, para poder hacer una valoración de ambas.

Así, estamos ante un indicador creíble que nos cuantifica los costes evitados en incendios forestales gracias a los desbroces. Se han reproducido las condiciones más cercanas a un casi experimento para dar legitimidad al indicador, siendo este imparcial y no sesgado. Es relevante porque podrá ser utilizado en análisis coste-beneficio de los desbroces, y es factible porque ha podido ser obtenido en tiempo, esfuerzo adecuado y disponibilidad de datos.

Un cuarto y último resultado, ligado a la fijación de población en el territorio, es que no se detecta una pérdida de población en zonas donde se han llevado a cabo desbroces. Aunque la evidencia no es concluyente, sí parece indicar que en zonas donde se han llevado a cabo desbroces la caída de la población ha sido menor o, incluso, se han dado ganancias de población.

Por otro lado, los desbroces también generan efectos positivos no sólo en la reducción de incendios forestales, sino también en la producción de agua azul. En el capítulo cuarto se realiza una evaluación de los desbroces sobre la mayor disposición de agua.

Una de las características de esta evaluación es su replicabilidad. Por un lado, al tratarse de datos públicos, esta evaluación puede ser replicada tanto para confirmar los resultados como para extenderla. Y, por otra parte, se puede replicar la política de desbroces y aclareos en otros lugares y evaluar sus efectos.

### 3. Evaluación de las medidas preventivas para la reducción de la propagación de incendios

En este capítulo se evalúan medidas de intervención en el territorio enfocadas a reducir la propagación de incendios forestales. Las medidas de intervención incluyen desde la plantación de una barrera natural en forma de viñas cultivadas, cortafuegos artificiales u otras intervenciones que pretenden reducir la carga de combustible del bosque como el pastoreo o la limpieza del sotobosque. En este sentido, las medidas analizadas de intervención en el territorio son más genéricas y comprenden varias de las medidas de intervención del suelo propuestas por el proyecto LIFE MIDMACC. Para esta parte del estudio, las diferentes dimensiones de la evaluación socioeconómica dan lugar a los cuatro índices siguientes:

- **Eficiencia:**  
Índices: Nivel óptimo de la extensión de las medidas de intervención implementadas aleatoria o estratégicamente.
- **Efectividad:**  
Índices: El tamaño de la superficie forestal que es salvada de quemarse como resultado de las medidas de intervención. La cantidad de CO<sub>2</sub> evitada como consecuencia de las medidas de intervención.
- **Análisis coste-beneficio:**  
Índice: Cálculos de coste-beneficio
- **Replicabilidad:**  
Índice: un programa de ordenador basado en la simulación de Monte Carlo

Para los cálculos de estos índices, definimos la superficie de masa forestal que es salvaguardada del incendio como una función de la tasa de extensión y de la tasa de eficiencia de las intervenciones. La dimensión de la tasa de extensión mide la proporción del área del bosque que se ha intervenido y la dimensión de la tasa de eficiencia valora la probabilidad que la zona intervenida actúe como una barrera de los incendios forestales. La dimensión tasa de eficiencia es relativamente baja si se repiten las limpiezas de sotobosque solo cada 15 años, en lugar de cada 5 años y es relativamente alta si las plantaciones de viñas actúan como barrera de incendios. Calculamos la proporción de tierra que se ha salvado de ser quemada utilizando una simulación de Monte Carlo explicada a continuación.

#### 3.1. Simulación de Monte Carlo

Los resultados de la simulación de Monte Carlo son adimensionales y, como tales, son aplicables para cualquier bosque. Para facilitar la interpretación de los resultados utilizamos el programa EXCEL, puesto que se ejecuta bajo muchos sistemas operativos. El programa

Excel de nombre- “ForestIntervent.xlsx” podría estar situado en un repositorio público de forma que pueda ser ampliamente utilizado. Para ajustar el programa EXCEL a las necesidades de los usuarios, el programa permite introducir datos específicos del bosque. Los campos de entrada para estos datos están marcados en amarillo – véase un ejemplo en la Figura 11. Por otro lado, los números en rojo indican los datos generados por el programa.

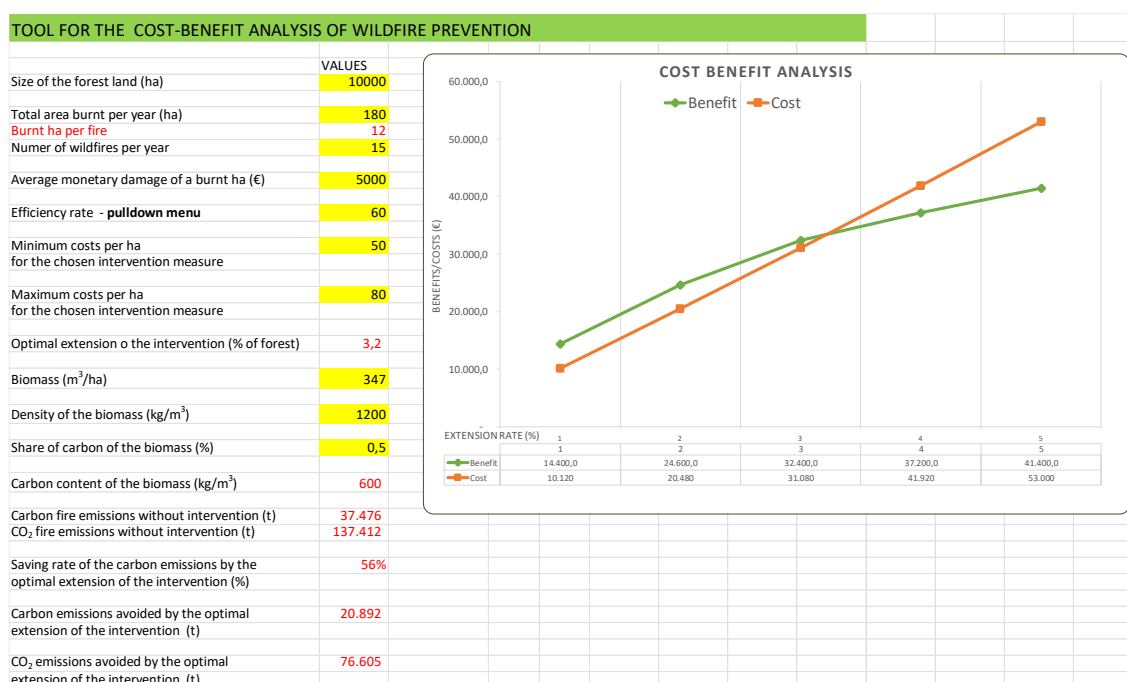


Figura 11. Captura de pantalla de la pestaña “Análisis coste-beneficio” del programa EXCEL donde los campos de datos que el usuario tiene que introducir están marcados en amarillo

Datos exógenos suministrados por el usuario:

Superficie del bosque (ha): LSize

Área total quemada por año (ha): BurntHa

Número de incendios forestales por año: NumFire

Media del daño monetario por ha quemada: DamageHa

Tasa de eficiencia (%) de una medida de intervención específica de la serie {0, 10, 20, ..., 100}:

Efficiency

Coste mínimo de la intervención escogida por ha y año: minC

Coste máximo de la intervención escogida por ha y año: maxC

Biomasa (m<sup>3</sup>/ha): Biomass

Densidad de la biomasa (kg/ m<sup>3</sup>): Density

Cantidad de carbono de la biomasa (%): ShareCarbon

Los nombres en verde indican los parámetros que se utilizan en esta parte del informe.

En esta sección se discuten las tres primeras variables y las siete restantes se discuten en la sección 3.3. El dato introducido por el usuario, LSize hace referencia a la superficie media total del bosque en un periodo de tiempo determinado. Además, consideramos que el bosque no está dividido por barreras naturales significativas que impidan la propagación del incendio forestal. En caso de que existan, se tendría que considerar cada división del bosque individualmente y utilizar el programa con los datos específicos por las diferentes divisiones del bosque. La variable BurntHa hace referencia al número medio de hectáreas quemadas por año durante el periodo de tiempo determinado. La última variable, NumFire, hace referencia al número medio de incendios forestales ocurridos durante el periodo de tiempo determinado. Utilizando estas variables podemos calcular la probabilidad que un incendio forestal empiece en cualquier hectárea del bosque. Por ejemplo, si el usuario ha introducido los siguientes datos:

LSize = 10.000ha, BurntHA = 180ha, NumFire = 15

Tendríamos que la extensión media de un incendio forestal =  $\text{BurntHa}/\text{NumFire} = 180/15 = 12$  ha y que la probabilidad que un incendio forestal empiece en cualquiera de las 10.000 ha es  $\text{NumFire}/\text{LSize} = 15/10.000 = 0,0015$ .

En otras palabras, en una hectárea cualquiera hay una probabilidad de 0,0015 de que empiece un incendio forestal y este quemaría de media 12 ha (en el programa de EXCEL los números marcados en rojo indican los resultados de los cálculos en contraste con los parámetros o los datos introducidos). En nuestro marco conceptual no tenemos en cuenta la dirección que toma el incendio forestal a medida que va avanzando. Tampoco tenemos en cuenta que puede ser que un incendio forestal empiece cerca del umbral del bosque y como resultado de los vientos dominantes progrese hacia el extremo del bosque. Su propagación puede ser limitada porque el extremo del bosque forma una barrera natural a causa de la presencia de un lago o de tierra agrícola trabajada. En este modelo, el bosque está considerado como un área sin fronteras donde todos los extremos están conectados entre sí. Obviamente esta consideración es una generalización, pero consideramos que el error introducido es desdeñable y que solo afecta de manera no significativa a los resultados.

Los datos de BurntHa y NumFire son específicos para cada bosque, no solo por las condiciones naturales (por ejemplo, la carga de combustible, la intensidad de las olas de calor, las precipitaciones, etc.) y las actividades humanas, sino también por la capacidad de apagar el incendio (accesibilidad en el territorio por parte de los bomberos, el equipo de los bomberos, etc.).

Para la simulación de Monte Carlo tenemos en cuenta la tasa de eficiencia (%) 0, 10, 20, ..., 100 y la tasa de extensión (%) 0, 1, 2, 3, ..., 50. La simulación calculada con el programa Mathematica® permite obtener la Tabla 13.

EXTENSIÓN	EFICIENCIA										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1%	0	4	9	13	17	21	24	28	32	33	35
2%	0	9	18	25	31	35	42	47	51	54	57
3%	0	13	25	35	42	48	54	59	63	67	68
4%	0	17	30	42	50	57	62	67	70	73	76
5%	0	21	37	49	56	63	69	73	77	79	82
6%	0	25	42	55	61	69	73	77	80	81	84
7%	0	28	46	59	67	73	76	80	82	86	86
8%	0	31	50	63	70	76	80	83	84	87	88
9%	0	34	54	65	73	78	82	85	87	88	89
10%	0	36	58	69	76	80	84	86	88	90	91
11%	0	40	59	71	78	83	85	87	89	90	91
12%	0	42	63	73	80	84	87	89	90	91	92
13%	0	44	65	75	81	86	88	90	91	92	93
14%	0	46	67	77	83	86	88	91	92	93	94
15%	0	49	69	79	84	87	90	91	92	94	94
16%	0	50	71	79	85	88	91	91	93	93	94
17%	0	52	72	80	86	89	91	92	93	94	95
18%	0	54	73	82	87	89	91	93	94	94	95
19%	0	56	75	83	87	90	92	93	94	95	95
20%	0	57	76	84	88	90	92	93	94	95	95
21%	0	58	77	84	88	91	93	94	95	95	96
22%	0	60	78	85	89	91	93	94	95	96	96
23%	0	61	79	86	90	92	93	94	95	96	96
24%	0	63	80	86	90	92	94	95	95	96	96
25%	0	63	80	87	91	92	94	95	95	96	97
26%	0	65	81	88	91	93	94	95	95	96	97
27%	0	65	82	88	91	93	94	95	96	96	97
28%	0	67	83	89	92	93	95	95	96	97	97
29%	0	68	83	89	92	94	95	95	96	97	97
30%	0	69	84	89	92	94	95	96	96	97	97
31%	0	69	84	90	92	94	95	96	96	97	97
32%	0	71	85	90	93	94	95	96	97	97	97
33%	0	71	85	90	93	94	96	96	97	97	97
34%	0	72	86	91	93	95	95	96	97	97	98
35%	0	73	86	91	93	95	96	96	97	97	98
36%	0	73	87	91	94	95	96	97	97	97	98
37%	0	74	87	92	94	95	96	97	97	98	98
38%	0	75	87	92	94	95	96	97	97	98	98
39%	0	75	88	92	94	95	96	97	97	98	98
40%	0	76	88	92	94	95	96	97	97	98	98
41%	0	76	88	92	94	96	96	97	97	98	98
42%	0	77	89	93	95	96	96	97	97	98	98
43%	0	77	89	93	95	96	97	97	98	98	98
44%	0	78	89	93	95	96	97	97	98	98	98
45%	0	78	89	93	95	96	97	97	98	98	98
46%	0	79	90	93	95	96	97	97	98	98	98
47%	0	79	90	93	95	96	97	97	98	98	98
48%	0	80	90	94	95	96	97	97	98	98	98
49%	0	80	90	94	95	96	97	98	98	98	98
50%	0	81	91	94	96	97	97	98	98	98	99

Tabla 13. Potencial medio de preservación (porcentaje) del número de ha quemadas en función de las tasas de extensión y eficiencia

Por ejemplo, la tabla indica que para una medida de intervención con una tasa de extensión del 3% y una tasa de eficiencia del 10%, se puede salvaguardar el 13% de la superficie de ser quemada aplicando esta intervención. Para hacer este cálculo, simulamos el inicio de un incendio forestal y calculamos el número medio de hectáreas susceptibles de ser quemadas. Realizamos este cálculo de manera repetida utilizando todas y cada una de las hectáreas del bosque como punto de partida del incendio forestal. El inicio del incendio forestal está modelado por WildfireArray y el número medio de hectáreas susceptibles a ser quemadas por la InterventionArray y lo BurntHaArray. En los dos apartados siguientes se presentan los cálculos subyacentes realizados por el programa Mathematica®. El código del programa está disponible en el Anexo 1 de este informe.

### 3.2. WildfireArray

Basándose en los datos introducidos por el usuario, el programa determina la probabilidad de que se inicie un incendio forestal para una hectárea determinada. En esta simulación, suponemos que la probabilidad que empiece un incendio forestal se distribuye uniformemente por toda la superficie forestal. El WildfireArray tiene una longitud de 100 y a una hectárea se le asigna aleatoriamente la probabilidad calculada de ignición de un incendio forestal 1 y al resto de las hectáreas se les asigna el complemento de la probabilidad de ignición, que es el número 0. Los primeros 9 elementos del WildfireArray de longitud 100 pueden tener como ejemplo la forma siguiente:

0	0	1	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

En el caso del ejemplo anterior, encontramos que la tercera hectárea es donde se ha iniciado el incendio y en todas las otras no. El programa repite este proceso 1.000 veces, de forma que al final tenemos 1.000 WildfireArrays de longitud 100.

#### 3.2.1. InterventionArray/PossibleBurntHaArray

Consideramos el área quemada como un “array” con una longitud de 100, para poder interpretar nuestros resultados como un porcentaje. Denominamos este “array” InterventionArray. Por convención, pero sin perder generalidad, asumimos que el incendio forestal empieza, si empieza, siempre en el primer elemento (ha) del InterventionArray. Usando la tasa de extensión, asignamos aleatoriamente medidas de intervención a los elementos del “array” con una tasa de eficiencia concreta. De este modo, suponemos que la probabilidad de realizar intervenciones se distribuye uniformemente en la superficie forestal. Dicho de otro modo, las intervenciones no se colocan estratégicamente. Más adelante, hacemos más extenso el modelo y consideramos la realización estratégica de intervenciones dentro del bosque.

Por ejemplo, si la tasa de extensión es 3% y la tasa de eficiencia es 100%, cada hectárea del bosque puede tener asignada una intervención con una probabilidad del 0,03. Teniendo una tasa de eficiencia del 100% hay una probabilidad del 0,97 de tener el número 0, indicando que no tiene lugar ninguna intervención en aquella hectárea. Después de esta asignación aleatoria con la probabilidad del 0,03, los primeros 9 elementos del InterventionArray de medida 100 podrían tener la siguiente forma:

0	Intervention	0	0	0	0	Intervention	0	0
---	--------------	---	---	---	---	--------------	---	---

El número de hectáreas susceptibles a ser quemadas para la hectárea considerada es 1, teniendo en cuenta que el incendio forestal siempre empieza en el primer elemento de la InterventionArray y que la tasa de eficiencia de la intervención es del 100%. El término número de hectáreas susceptibles a ser quemadas indica la extensión del incendio forestal si el incendio empieza en la primera hectárea del InterventionArray. Para la simulación de Monte Carlo se generan 1.000 arrays de intervención con la tasa de extensión del 3% y la tasa de eficiencia del 100%.

Si la tasa de eficiencia fuera del 10%, calcularíamos el número de ha susceptible a ser quemadas como el número esperado de hectáreas susceptibles a ser quemadas. Para el ejemplo actual, el número esperado de hectáreas susceptibles a ser quemadas de la InterventionsArray viene dado por: (cardinalidad del primer intervalo de ceros)  $0.9^{0}$  + (cardinalidad del segundo intervalo de ceros)  $0.9^{1}$  + (cardinalidad del tercer intervalo de ceros)  $0.9^{2}$  y así sucesivamente. Tomando la media del número de hectáreas susceptibles a ser quemadas se obtiene el número medio de hectáreas susceptibles a ser quemadas por todos los 1.000 InterventionArrays, utilizando una tasa de extensión del 3% y una tasa de eficiencia del 10%. En consecuencia, calculamos la media del número de hectáreas susceptibles a ser quemadas para cada una de las combinaciones restantes de tasas de extensión y de eficiencia. La media del número de hectáreas susceptibles a ser quemadas para cada una de las 1.000 InterventionArrays produce el SusceptibleBurntHaArray de longitud 1.000. Por ejemplo, para la combinación de la tasa de extensión del 3% y la tasa de eficiencia del 100%, los primeros 9 elementos del SusceptibleBurntHaArray pueden tomar la siguiente forma:

13,12	31,23	9,22	41,87	58,30	43,82	27,32	12,98	23,82
-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

El SusceptibleBurntHaArray muestra que el número medio de hectáreas susceptibles a ser quemadas es de 13,12 si la primera hectárea se incendia y de 31,23 si la segunda hectárea es el punto de partida del incendio forestal. Sin embargo, los elementos del SusceptibleBurntHaArray, por ejemplo, 13,12, no se tienen que interpretar como hectáreas sino como el porcentaje del valor BurntHa que ha especificado el usuario.

### 3.2.2. BurntHaArray

Para el cálculo real de las hectáreas quemadas multiplicamos cada elemento del WildFireArray con el elemento correspondiente del SusceptibleBurnHaArray. En otras palabras, para cada hectárea determinamos si la hectárea en la posición "x" del incendio forestal es o no es un punto de inicio del incendio. En el supuesto de que lo sea, el número de hectáreas susceptibles a ser quemadas se convierte en el número de hectáreas quemadas. Si no es el punto de partida de un incendio forestal el número de hectáreas quemadas es igual a 0. Para los ejemplos de WildFireArray y SusceptibleBurntHaArray presentados anteriormente, el BurntHaArray es el siguiente:

0	0	9,22	0	0	0	0	0	0
---	---	------	---	---	---	---	---	---

El valor 9,22 indica el porcentaje del BurntHa especificado e introducido por el usuario que se producirá teniendo en cuenta las tasas de extensión y de eficiencia establecidas. En consecuencia, multiplicamos los WildFireArrays y SusceptibleBurntHaArrays para todas las

combinaciones de las tasas de extensión y de eficiencia. Los resultados se resumen en la Tabla 13 como un valor relativo en porcentaje. La Tabla 13 permite calcular el número absoluto de hectáreas que se salvan del BurntHA especificado por el usuario como una función de las tasas de extensión y de eficiencia. Por lo tanto, si el usuario ha especificado que BurntHa es igual a 180 la reducción en el área quemada es  $180 \times 0,0922 = 16,60$ .

### 3.3. Análisis coste beneficio de las intervenciones forestales

El programa Excel requiere que el usuario introduzca tres datos económicos diferentes para poder comparar los costes y beneficios de las medidas de intervención específicas elegidas por el usuario del programa.

#### Datos exógenos suministrados por el usuario

Daño monetario mediano de una hectárea quemada incluyendo los costes de la extinción de incendios<sup>1</sup> y también daños a los servicios ecosistémicos del bosque: **DamageHa**

Tasa de eficiencia<sup>2</sup> de una medida de intervención específica del conjunto {0, 10, 20, ..., 100}:

**Efficiency**

Coste mínimo de la intervención escogida por ha y año: **minC**

Coste máximo de la intervención escogida por ha y año: **maxC**

Biomasa (m<sup>3</sup>/ha): **Biomass**

Densidad de la biomasa (kg/ m<sup>3</sup>): **Density**

Proporción de carbono de la biomasa (%): **ShareCarbon**

Los datos sobre los costes de intervención se preguntan al usuario, puesto que consideramos que los costes de la intervención son mínimos si la tasa de extensión de la intervención es pequeña. Los gestores forestales pueden elegir las zonas donde los costes son más pequeños (hectáreas altamente accesibles, características naturales del terreno favorables como por ejemplo un terreno llano o suelo bueno, etc.). Sin embargo, a medida que la tasa de extensión aumenta, las zonas son menos accesibles y las características naturales son menos favorables, de forma que aumentan los costes de intervención. De este modo, asumimos que las medidas preventivas se llevan a cabo primero en las zonas donde los costes son más bajos y, que a medida que se amplían las intervenciones preventivas, los costes aumentan.

A partir de los datos entrados por el usuario y de la información proporcionada por la Tabla 13, la Figura 12 ilustra el daño monetario medio (beneficios) de la zona quemada en función de la tasa de extensión de la intervención - línea verde. La línea naranja de la Figura 12 presenta los costes de la intervención en función de la tasa de extensión. Así, la intersección de estas dos curvas representa la tasa de extensión óptima teniendo en cuenta los datos escogidos por el usuario.<sup>3</sup> El programa Excel proporciona el valor numérico de la tasa de extensión óptima. Para el ejemplo considerado viene dado por el 3,2% de la superficie forestal. El eje "Eficiencia" se puede ampliar hasta el 50%. Aun así, para la presentación gráfica del caso en cuestión solo hemos incluido la tasa de extensión hasta el 4%.

---

<sup>1</sup> La información sobre el valor medio y el valor mediano de los daños de los incendios forestales se puede encontrar en <https://civio.es/espana-en-llamas/metodologia/>.

<sup>2</sup> El programa requiere que el usuario conozca la tasa de eficiencia, bien a través de datos experimentales o a través de resultados de simulaciones computacionales

<sup>3</sup> Esta tasa es óptima en el sentido que una nueva ampliación de las medidas de intervención no comporta ningún beneficio neto adicional. No maximiza los beneficios netos equiparando los beneficios y los costes marginales.





Figura 12. Daño monetario medio de la área quemada y costes de intervención medidos como una función de la tasa de extensión. Daño monetario por ha = 5.000, coste mínimo = 50, coste máximo = 80, tasa de eficiencia = 0,6, número de incendios forestales = 15

El programa de Excel también determina las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se han evitado como resultado de la extensión óptima de la medida de intervención (vean Figura 112). Para poder determinarlo, el usuario tiene que especificar la información siguiente: biomasa (m<sup>3</sup>/ha) (Biomass), densidad de la biomasa (kg/m<sup>3</sup>) (Density) y la proporción aérea y subterránea de carbono de la biomasa (%) (ShareCarbon). Con el producto de las dos últimas variables obtenemos el contenido de carbono de la biomasa (kg/m<sup>3</sup>). Con la multiplicación de este valor obtenido por Biomass y por BurntHa obtenemos la emisión total de carbono por año causada por el incendio forestal. El programa calcula estas emisiones en términos de toneladas de carbono y en términos de toneladas de CO<sub>2</sub>. Como se ha explicado anteriormente, la extensión óptima de la intervención permite reducir el área BurntHa según el porcentaje especificado a la Tabla 13. Por lo tanto, la extensión óptima de la medida de intervención también permite reducir la emisión total de carbono por año de los incendios forestales según el porcentaje especificado en la Tabla 13.

### 3.3.1. Análisis de sensibilidad

En el supuesto de que el usuario quiera explorar la tasa de extensión óptima para medidas de intervención con diferentes tasas de eficiencia, el usuario puede cambiar el valor de la eficiencia en el programa Excel. Del mismo modo, el usuario puede modificar el número medio de incendios, la extensión media de la zona quemada, los daños monetarios por hectárea o los costes mínimos o máximos de la medida de intervención. Los datos modificados se ven reflejados en la nueva figura del programa Excel. Se presentan como ejemplo los resultados de un cambio llevado a cabo por el usuario especificado en la Figura 12. Los nuevos datos modificados por el usuario se especifican en la leyenda de la Figura 13 y una comparación con la leyenda de la Figura 12 muestra que el número de incendios forestales se redujo de 15

a 12. Como resultado, la tasa de extensión óptima aumenta de 3,2 a 4,8. A primera vista este resultado no es intuitivo, pero hay que recordar que reduciendo el número de incendios forestales en un 20% la extensión de cada incendio aumenta un 25% si no se modifica el número total de hectáreas quemadas.<sup>4</sup> En esta situación, la reducción de los incendios forestales comporta incendios más extendidos que requieren mayores tasas de extensión. Aun así, si el número de incendios forestales se reduce de 15 a 12 y la superficie total quemada se reduce en un 20% de 180 a 144, la tasa de extensión óptima vuelve a ser de 3,2. Este ejemplo explica que cambiar el número de incendios forestales solo cambia la probabilidad de ignición de un incendio forestal, pero sin cambios en el área total quemada, se aumenta la probabilidad de propagación del incendio forestal. Por lo tanto, los cambios en estos dos parámetros se tienen que considerar simultáneamente.

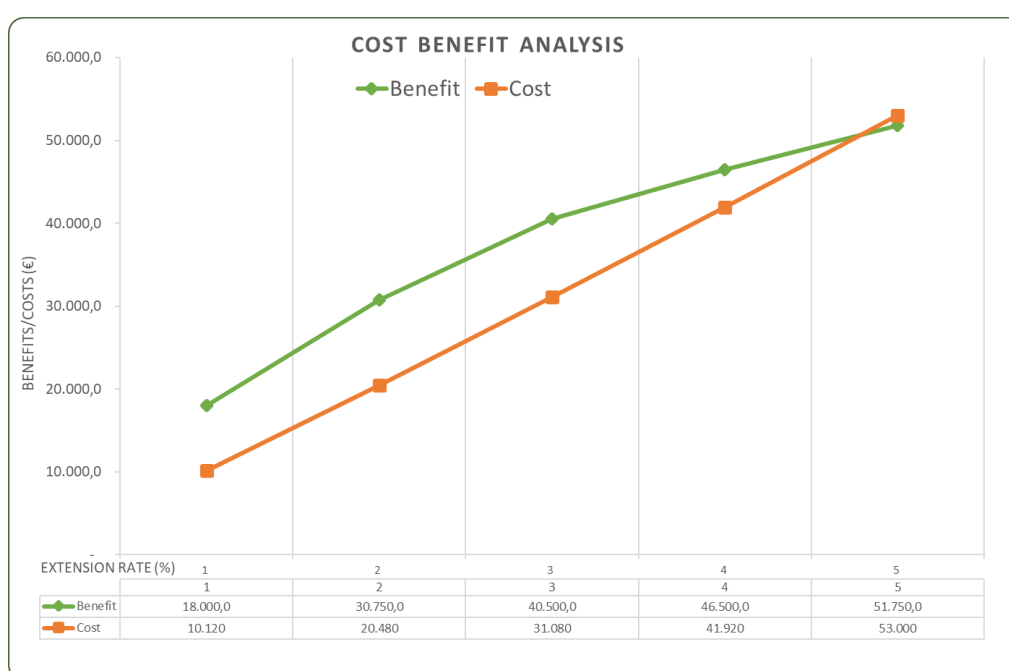


Figura 13. Daño monetario medio de la área quemada y costes de intervención medidos como una función de la tasa de extensión. Daño monetario por ha = 5.000, coste mínimo = 50, coste máximo = 80, tasa de eficiencia = 0,6, número de incendios forestales =12

Los cambios en los datos introducidos por el usuario se pueden realizar utilizando el programa Excel y no es necesario ejecutar el programa Mathematica® otra vez porque los resultados obtenidos de este programa son adimensionales y en términos relativos. Además, cambios en la probabilidad de incendios forestales conducen a cambios proporcionales del número relativo de BurntHaArray. Por lo tanto, los resultados del programa Excel se pueden actualizar directamente utilizando los resultados ya existentes del programa Mathematica®

4 Esta variación es el resultado del cálculo de la dimensión media de un incendio forestal =  $BurntHa/NumFire = 180/12 = 15ha$ .

El usuario también puede cambiar la tasa de eficiencia de la medida de intervención por ejemplo del 60% al 100%. Si miramos los números de la Tabla 13 veremos que una tasa de extensión del 1% permite salvar el 35% del total de la zona quemada. Este número tiene que interpretarse con cuidado, puesto que las tasas de extensión y de eficiencia no son en realidad completamente independientes. El enfoque utilizado hasta ahora asume que las medidas de implementación se colocan aleatoriamente sobre una franja hipotética de bosque (unidimensional), pero no sobre un espacio bidimensional. El incendio forestal puede llegar a la barrera, pero si la tasa de extensión es baja, puede encontrar una manera de superar esta barrera. Por lo tanto, con una extensión baja y una elevada tasa de eficiencia, es probable que no se pueda bloquear completamente el fuego. Por lo tanto, es probable que combinaciones extremas de tasas de extensión y de eficiencia sobreestimen la capacidad de la medida de intervención de salvar zonas de ser quemadas. Para abordar este problema, analizamos en la siguiente sección la implementación estratégica de las medidas de intervención en los bosques para reducir la propagación de los incendios forestales.

### 3.3.2. Implementación estratégica de las medidas de intervención

Para el análisis de la colocación estratégica de medidas de intervención, consideramos el caso en el cual las barreras tienen una tasa de eficiencia del 100%, es decir, que impiden completamente la propagación de los incendios forestales. Estas medidas incluyen franjas de tierra que, por ejemplo, se cultivan con viñas o que no tienen ninguna carga de combustible. El objetivo de esta parte del estudio es calcular el número de hectáreas que se salvan de ser quemadas en función del número de barreras implementadas. La determinación del número óptimo de barreras para salvar un determinado porcentaje del bosque de ser quemado depende de tres parámetros: la dirección esperada del viento, la forma del límite de la masa forestal, y la diferencia de ángulo entre la dirección esperada del viento y la dirección del eje longitudinal del bosque. Para simplificar, suponemos que la forma de la frontera del bosque se puede aproximar (a) a un rectángulo y (b) que el ángulo entre la dirección esperada del viento y el lado más corto del rectángulo solo puede ser o bien  $0^\circ$  o bien  $90^\circ$ . Para el cálculo del rectángulo, el usuario tiene que especificar la distancia entre los dos puntos más alejados situados sobre el borde de BurntHa. Este parámetro especificado por el usuario se denota por FireLength (m). El FireWidth (m) se obtiene de la división de BurntHa entre FireLength multiplicada por 10.000 para tener en cuenta el hecho que BurntHa se expresa en hectáreas y FireLength en metros. Aparte de la aproximación de la forma que tiene la frontera del bosque, también tenemos que hacer una aproximación de la ubicación del rectángulo respecto a la dirección esperada del viento. Para este propósito, definimos el parámetro Ángulo que mide el ángulo entre el eje longitudinal del rectángulo y la dirección esperada del viento tal como se muestra en la Figura 14.

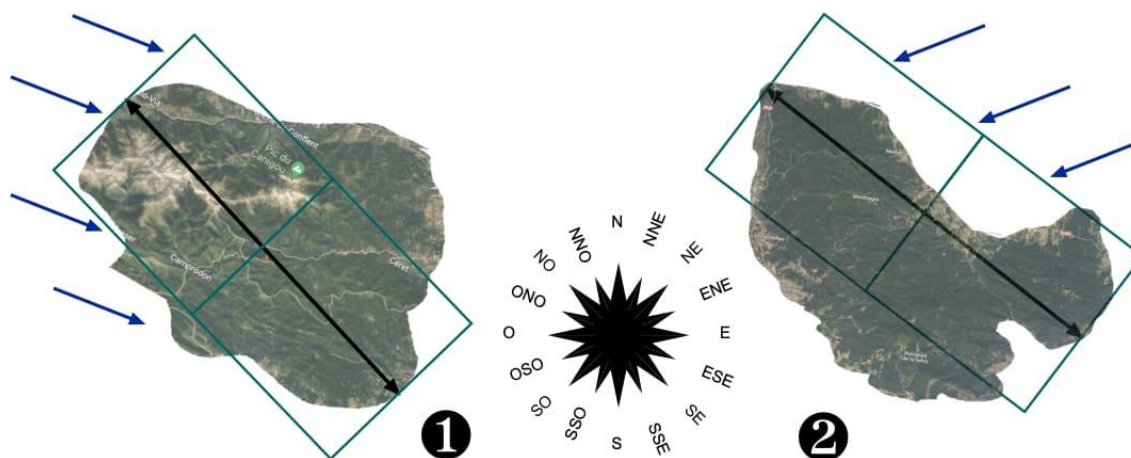


Figura 14. Ilustración del ángulo entre el eje longitudinal del rectángulo y la dirección esperada del viento.

Podemos distinguir dos casos, representados en la Figura 14. El caso 1 se da cuando el valor de Ángulo se encuentra entre  $0^\circ - 45^\circ$  o entre  $315^\circ - 360^\circ$ . Para el caso 1, podemos suponer que la anchura, o lado más corto, del rectángulo es perpendicular al valor esperado de la dirección del viento. El caso 2 se da cuando el valor del ángulo se encuentra entre  $45^\circ - 90^\circ$  o  $270^\circ - 315^\circ$  y, por lo tanto, el rectángulo está situado de forma que el lado más largo es perpendicular al valor esperado de la dirección del viento.

En cuanto al peligro de propagación del fuego, la dirección esperada del viento de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  son equivalentes. A causa de las condiciones de simetría del círculo, tomar los valores absolutos de los intervalos de grados mencionados anteriormente restando  $180^\circ$  podemos determinar la ubicación del rectángulo respecto a la dirección esperada del viento. Por ejemplo,  $0^\circ - 45^\circ$  da el intervalo  $180^\circ - 225^\circ$  y  $315^\circ - 360^\circ$  da el intervalo  $135^\circ - 180^\circ$ . Para ambos intervalos, el lado más corto del rectángulo se encuentra perpendicular al valor esperado de la dirección del viento. Para el ejemplo mostrado en la Figura 15, la recolocación de los bosques rectangulares da:

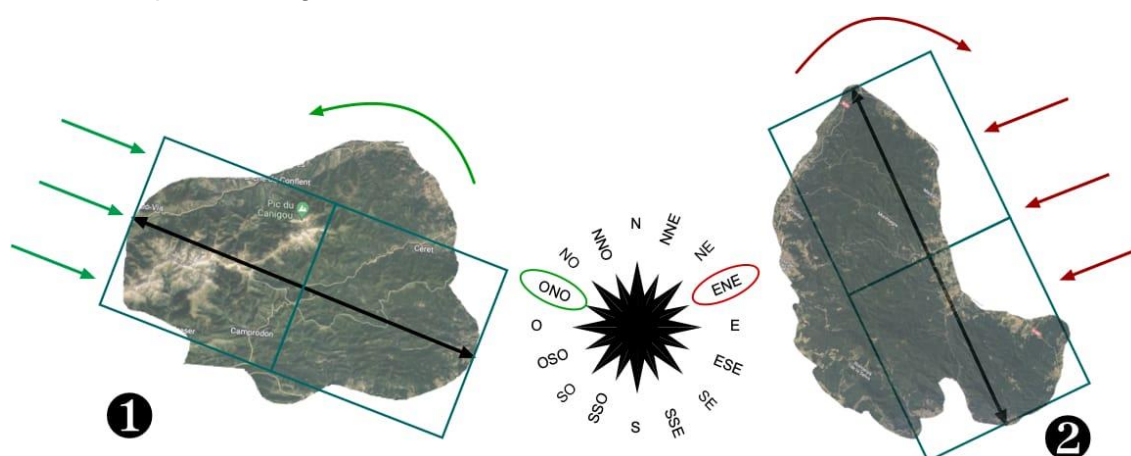


Figura 15. Recolocación del bosque rectangular como resultado del valor de Ángulo.

La recolocación del rectángulo equivalente se basa en la rotación. El rectángulo es rotado de tal manera que la dirección esperada del viento se encuentra o bien en línea con el eje longitudinal o en línea con el eje lateral del rectángulo, dependiendo de cual de las dos opciones requiere un ángulo de rotación menor.

Para los cálculos que hace el programa, el usuario tiene que especificar la dirección del eje longitudinal del bosque y el valor de la dirección esperada del viento basándose en la Tabla 14. Estos dos parámetros proporcionados por el usuario son denominados LongAxis y DirectionWind respectivamente. Los parámetros son escogidos por el usuario a partir de un menú desplegable en la pestaña “Strategic Intervention” del programa Excel.

Direction	Angle (°) with respect to East
E	0°
ENE	22,5°
NE	45°
NNE	67,5°
N	90°
NNW	112,5°
NW	135°
WNW	157,5°
W	180°
WSW	202,5°
SW	225°
SSW	247,5°
S	270 °
SSE	292,5°
SE	315°
ESE	337,5°

Tabla 14. Ángulos de la dirección, N = Norte, E = Este, S = Sur, W = Oeste

La longitud de los lados del rectángulo es calculada a partir de la variable ForestSize suministrada por el usuario. Si la frontera del bosque fuera un cuadrado con una longitud “x” calcularíamos un rectángulo con la misma ForestSize haciendo 2x (longitud) multiplicado por x/2 (anchura). Por lo tanto, el lado largo del rectángulo es igual a  $2\sqrt{ForestSize}$  y el lado corto a  $0.5\sqrt{ForestSize}$ . Independientemente de la posición del bosque rectangular, denominamos ForestLength al lado perpendicular a la dirección esperada del viento y, el otro lado, ForestWidth.

El análisis anterior se puede resumir en la Tabla 15.

Para determinar el número óptimo de barreras contra los incendios determinamos primero la ubicación del bosque, representado en forma de rectángulo, respecto a la dirección esperada del viento. En el caso 1, el lado más corto del rectángulo es perpendicular al valor esperado de la dirección del viento y, por lo tanto, el número de barreras es más alto, pero a la vez la longitud de cada barrera será menor si lo comparamos con el caso 2. Cada barrera tiene una anchura, BarrierWidth, especificada por el usuario del programa. La aplicación de las barreras se rige por dos principios:

La distancia entre dos barreras es igual a  $\text{FireLength} - \text{Barrier Width}$ .

El número de barreras viene determinado por el número entero obtenido de la división:  $\text{ForestLength}/\text{FireLength}$ . El módulo de este cociente dividido entre dos determina la distancia entre la frontera del bosque y la primera/última barrera. También se puede aumentar el número de barreras en una unidad si el residuo de la división es próximo a uno.

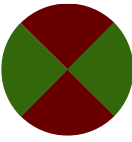
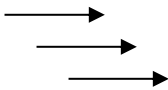

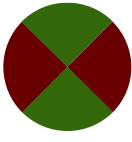
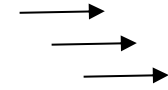

Ángulo entre LongAxis i DirectionWind		Dirección esperada del viento	Localización del bosque rectangular: ForestWidth por ForestLength
<b>Caso 1:</b> Ángulos admisibles de la dirección del viento, $315^\circ - 45^\circ$ y $135^\circ - 225^\circ$ (áreas verdes del círculo)			
<b>Caso 2:</b> Ángulos admisibles de la dirección del viento, $45^\circ - 135^\circ$ y $225^\circ - 315^\circ$ (áreas verdes del círculo)			

Tabla 15. Ángulos entre LongAxis y DirectionWind y localización del bosque rectangular.

Para ilustrar estos dos principios utilizamos la Figura 16 donde cada celda tiene una longitud de 1. Asumimos que el FireLength es ocho.

Barrera	Celda 1 (1)	Celda 2 (2)	Celda 3 (3)	Celda 4 (4)	Celda 5 (5)	Celda 6 (6)	Celda 7 (7)	Barrera	
---------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------	--

Figura 16. Distancia óptima entre dos barreras con una tasa de eficiencia de 1.

Si la distancia entre las barreras fuera inferior a 7, la superficie máxima de bosque que se salvaría de ser quemada por barrera disminuiría. Si un fuego que se propaga hacia la derecha empieza en la celda 7 de la Figura 16 (el primer número de la celda) la barrera evitaría que las siete celdas consecutivas fueran destruidas por el fuego. Por lo tanto, el área salvada de ser quemada es 7 (número entre corchetes). La misma línea de argumentación se puede aplicar si el fuego empieza en cualquiera de las otras celdas de la figura (celdas 6 a 1)

obteniendo un área salvada del fuego diferente por cada celda dependiendo de donde se inicia el incendio y de su distancia con la barrera. Por lo tanto, el área total de bosque salvado de ser quemado por la barrera es  $7+6+5+\dots+1 = 28$ . A partir de aquí podemos obtener la fórmula  $0.5 \cdot \text{NetFireLength} \cdot (\text{NetFireLength} + 1)$ , donde  $\text{NetFireLength}$  se obtiene a partir de  $\text{FireLength} - \text{BarrierWidth}$ . En el caso de la Figura 16 tenemos  $0.5 \cdot 7 \cdot (7+1) = 28$ . En caso de que la distancia entre las barreras sea menor que la longitud de  $\text{NetFireLength}$ , la superficie total de bosque salvado de ser quemado por la barrera disminuye. Por ejemplo, si la distancia entre las barreras fuera 6, la superficie total de bosque salvado sería  $0.5 \cdot 6 \cdot (6+1) = 21$ . Del mismo modo, si la distancia entre las barreras fuera más grande que  $\text{NetFireLength}$ , un incendio forestal originado en la celda más distante de la barrera no sería detenido por la barrera. Por lo tanto, la contribución de la siguiente barrera para salvar el bosque de ser quemado sería cero en el caso de incendios forestales iniciados en celdas más distantes que el  $\text{FireLength}$ .

Otra manera de ilustrar la distancia óptima entre barreras se muestra en la Figura 17. Las barreras se representan con líneas amarillas y la  $\text{FireLength}$  con la longitud de los rectángulos rojos. Las zonas verdes ilustran las áreas de tierra que se salvan de ser quemadas. Si la distancia entre barreras es más grande que  $\text{FireLength}$ , las barreras son menos efectivas, puesto que no ayudan a reducir la superficie de tierra quemada respecto a un incendio que empiece en el inicio de la distancia entre dos barreras.

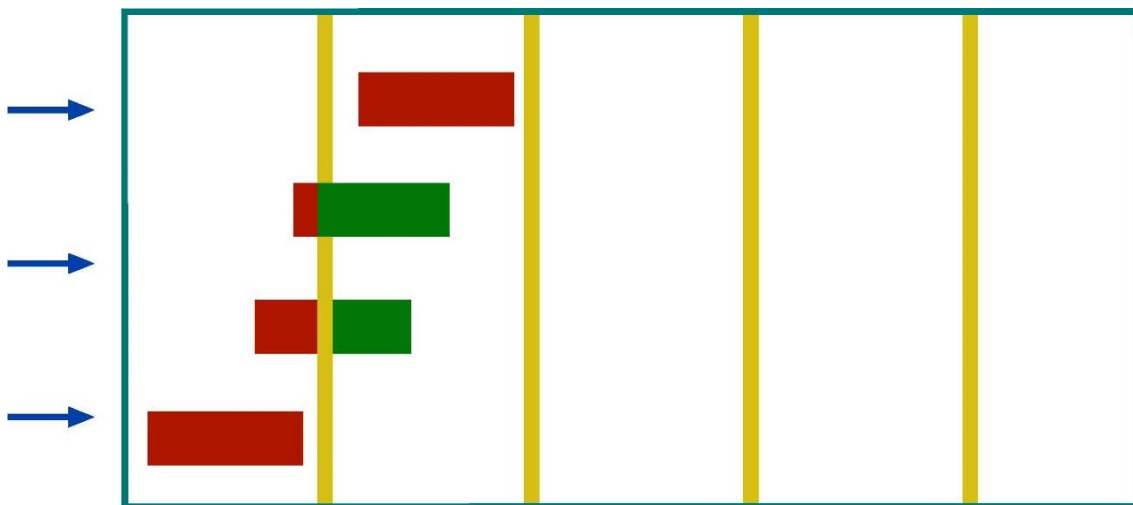
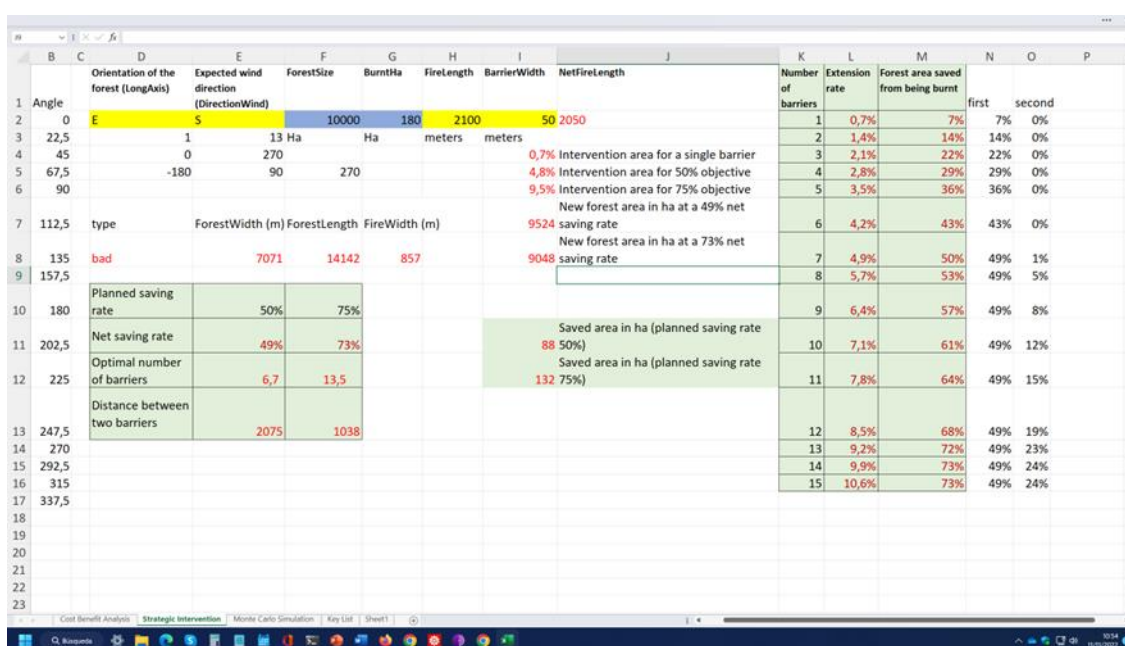


Figura 17. Distancia entre barreras y reducción del área quemada.

Para poder ilustrar el funcionamiento del programa presentamos una captura de pantalla del programa en la Figura 17. La captura corresponde a la pestaña del Excel "Strategic Intervention". Como se ha mencionado anteriormente, los campos que tiene que llenar el usuario están resaltados de color amarillo. Los valores de color azul indican valores que ya han sido suministrados en la página "Cost Benefit Analysis" y, como tal, solo se tendrían que modificar en la hoja "Cost Benefit Analysis". Los valores de color rojo indican que son resultados de los cálculos. Los resultados finales de la evaluación de la aplicación estratégica de las medidas de intervención están destacados en color verde claro. La Figura 18 muestra, para el caso considerado, que la implementación estratégica de una barrera con una anchura de 50 m corresponde a una tasa de extensión del 0,7% y permite salvar el 7% de la  $\text{BurntHa}$  de ser quemado. Dos barreras permiten reducir las hectáreas quemadas un 14% y tres

barreras, un 22%. Si el objetivo es salvar el 50% (tasa de ahorro planificada) de la zona quemada, hay que establecer 6,7 barreras. Como  $\text{BarrierWidth} = \text{FireLength} - \text{NetFireLength}$ , parte del área quemada ya se ha perdido en el momento de establecer la barrera. Por este motivo, en el ejemplo dado en la Figura 18, la tasa de ahorro neto del área BurntHa es del 49%. Este porcentaje baja a medida que aumenta la BarrierWidth. Con unas tasas de ahorro previstas del 50% y del 75%, el número de hectáreas salvadas es de 88 y 132 respectivamente. Para las tasas de ahorro previstas del 50% y 75%, las zonas intervenidas son el 4,8% y el 9,5% del ForestSize, respectivamente. El área forestal resultante de las barreras es 9.524 ha para la tasa de ahorro prevista del 50% y 9.048 ha para la tasa de ahorro prevista del 75%.



Angle	Orientation of the forest (LongAxis)	Expected wind direction (DirectionWind)	ForestSize	BurntHa	FireLength	BarrierWidth	NetFireLength	Number of barriers	Extension rate	Forest area saved from being burnt	first	second
0	E	S	10000	180	2100	50	2050	1	0,7%	7%	7%	0%
22,5			13 Ha	Ha	meters	meters		2	1,4%	14%	14%	0%
45		0	270				0,7%	3	2,1%	22%	22%	0%
67,5		-180	90	270			4,8%	4	2,8%	29%	29%	0%
90							9,5%	5	3,5%	36%	36%	0%
112,5	type	ForestWidth (m)	ForestLength	FireWidth (m)			9524	6	4,2%	43%	43%	0%
135	bad		7071	14142	857		9048	7	4,9%	50%	49%	1%
157,5								8	5,7%	53%	49%	5%
180	Planned saving rate		50%	75%				9	6,4%	57%	49%	8%
202,5	Net saving rate		49%	73%			88	10	7,1%	61%	49%	12%
225	Optimal number of barriers		6,7	13,5			132	11	7,8%	64%	49%	15%
247,5	Distance between two barriers		2075	1038				12	8,5%	68%	49%	19%
270								13	9,2%	72%	49%	23%
292,5								14	9,9%	73%	49%	24%
315								15	10,6%	73%	49%	24%
337,5												

Figura 18. Captura de la pestaña “Strategic Intervention” del programa de Excel donde los campos llenados por el usuario están marcados en color amarillo. Los campos de color azul indican datos que el usuario ha introducido en la hoja “Cost Benefit Analysis”.

### 3.4. Resultados

La evaluación socioeconómica de las medidas de intervención terrestres que tienen como objetivo reducir la propagación de los incendios forestales no es muy significativa si se realiza de manera general. La gran variedad de condiciones (condiciones geográficas, tipos de bosque, condiciones climáticas, actividades humanas, etc.) hacen imposible obtener resultados generales que sean representativos de las medidas de intervención analizadas. Por esta razón, hemos desarrollado un programa Excel basado en los resultados de una simulación de Monte Carlo. El programa determina para una tasa de eficiencia concreta el nivel óptimo de extensión de la intervención llevada a cabo en una zona aleatoria. Los resultados muestran que, incluso con una tasa de extensión baja, se puede reducir sustancialmente el área quemada. Por ejemplo, con una tasa de extensión del 2% y una tasa de eficiencia del 50%, el área quemada se puede reducir en un 37% (índice efectividad). El



programa también calcula la reducción correspondiente de las emisiones de CO<sub>2</sub> (índice efectividad). Basándose en la reducción del área quemada, el programa calcula los beneficios y los combina con los costes de las medidas de intervención colocadas aleatoriamente (índice análisis coste-beneficio). Considerando los costes y los beneficios juntos, se puede determinar la extensión de estas medidas de intervención a partir de la cual los costes de cualquier otra ampliación de la medida de intervención superan sus beneficios. Este valor crítico se denota como la extensión óptima de la medida de intervención (índice eficacia). El análisis de este informe se amplía considerando medidas de intervención colocadas estratégicamente, en vez de aleatoriamente. El programa determina el número óptimo de barreras para una reducción planificada de la zona quemada en un 50%. Además, los resultados muestran que la longitud del eje longitudinal de la extensión del fuego determina la distancia entre dos barreras (índice eficacia). El programa también ofrece el número óptimo de barreras para una reducción prevista en el área quemada en un 50% (índice eficacia). Finalmente, el índice de replicación corresponde al propio programa Excel y la publicación del código Mathematica® para la replicación de la simulación de Monte Carlo en el Anexo 1.

## 4. Evaluación de las medidas de adaptación – incremento de los recursos hídricos

El progresivo abandono rural de las últimas décadas ha causado la expansión de las áreas forestales sin gestionar, los cuales son responsables del incremento en la intercepción y la evapotranspiración observadas. Este crecimiento de la vegetación ha afectado a la dinámica hidrológica, y ha comportado una reducción de los recursos hídricos disponibles a nivel de cuenca (menos agua azul). En este sentido, las medidas de adaptación consistentes en una mayor y mejor gestión forestal (como la disminución de pies por hectárea y los desbroces) pueden causar un incremento de la infiltración y escorrentía, resultando en una mayor disponibilidad de agua azul, que a su vez puede revertir en una mayor actividad económica y en una mejora de los ecosistemas acuáticos.

A nivel de rodal o parcela, algunos autores han encontrado que el desbroce de matorral y/o los clareos parecen incrementar los flujos de agua (Nadal-Romero et al., 2013, 2018). En emplazamientos donde se han realizado seguimientos hidrológicos específicos y detallados se han obtenido datos que muestran el potencial de las medidas de gestión. Por ejemplo, en el marco del proyecto LIFE Climark, coordinado por el Centro de la Propiedad Forestal de la Generalitat de Catalunya (Agencia Catalana del Agua, 2022), se ha podido observar cómo en los años posteriores al clareo que se llevó a cabo en 2019-20 en la finca forestal de Mas Marimon, en el término municipal de La Llacuna (l'Anoia, Cataluña), los caudales de la Fuente de Marimon cercana en la finca mostraron un incremento considerable.

Los estudios de campo con simulaciones de lluvia a nivel de rodal o de parcela en el marco del presente proyecto LIFE MIDMACC también sugieren que la gestión puede causar un incremento de los recursos hídricos. Sin embargo, aunque los resultados van en la dirección esperada, a escala de parcela hay mucha variabilidad y se necesitan numerosos experimentos con series largas para poder observar patrones que sean estadísticamente significativos.

No obstante, estos estudios son esenciales puesto que permiten mejorar la calibración de los modelos hidro-ecológicos existentes, como el MEDFATE (De Cáceres et al., 2015) o el RHESys (Tague and Band, 2004). Trabajos realizados con dichos modelos establecen sin lugar a dudas que las acciones de adaptación pueden suponer un aumento importante en la exportación de agua azul. Simulaciones realizadas en el marco del proyecto LIFE CLIMARK aplicando diferentes tratamientos de gestión forestal han obtenido un aumento de la provisión de agua entre 26 y 367 mm anuales (de Cáceres et al., 2022). En un estudio realizado en la cuenca de Arnás en el Pirineo Central, Khorchani et al. (2020) modelizan el desbroce y limpieza de las zonas arbustivas y pastos abandonados, que representan el 15,75% de la superficie, de forma similar a las que se llevaron a cabo en La Rioja y que se han estudiado en el segundo capítulo, y encuentran que estas acciones reducen la evapotranspiración y pueden mejorar el caudal anual entre el 7,1% y el 24,2% dependiendo de la intensidad del desbroce. En un estudio paralelo a la cuenca del Estarrún en el Pirineo Central, Khorchani et al. (2021) obtienen que el desbroce en un 7,5% de la región aumentaría los caudales hídricos en un 6%, frente al escenario de no gestión.

En la acción C4 del proyecto LIFE MIDMACC, que proporciona el escalamiento a nivel regional de las medidas de adaptación al cambio climático propuestas en el proyecto, también se obtiene un aumento en los caudales hídricos a raíz de la gestión del territorio en la media montaña. En este apartado se presenta el escalamiento a nivel económico de las tres actuaciones analizadas en dicha acción C4. Para ello, se utilizan los aumentos de los recursos hídricos estimados de las acciones de gestión en varios emplazamientos representativos de

la media montaña y se infiere el impacto que estos aumentos pueden tener sobre la economía, utilizando la metodología Input-Output (IO) relacionada en el siguiente apartado.

## 4.1. Metodología y datos

### 4.1.1. Modelo socioeconómico

Para examinar los impactos de variaciones en los recursos hídricos derivadas de las acciones de adaptación al cambio climático en la media montaña sobre la economía se utiliza la metodología Input-Output (IO) desarrollada por Leontief (1941). Ésta es una metodología estándar que ha sido ampliamente utilizada con anterioridad en este campo (Freire-González et al., 2018; Garcia-Hernandez and Brouwer, 2020; Martin-Ortega et al., 2012). En particular, se usa una variación del modelo IO, correspondiente a la aproximación por la vía de la oferta (Ghosh, 1958). Siguiendo a Proops (1988), el modelo IO básico se extiende ambientalmente al uso de recursos hídricos definiendo un vector de uso de agua por unidad (€) de output. Ello permite calcular el agua necesaria para satisfacer las demandas finales de la economía. Así, se obtiene el uso total de recursos hídricos de la economía, es decir, el agua directa e indirectamente usada para satisfacer las demandas finales de un país o región. El modelo permite vincular el funcionamiento de la actividad económica con los impactos sobre los recursos hídricos de forma completa, es decir, teniendo en cuenta las interconexiones entre todos los sectores económicos. Una vez calculado el modelo base que representa la situación real en términos de presión hídrica, es posible analizar el efecto de un aumento en la disponibilidad de los recursos hídricos en la economía, en términos de cambio en el valor añadido (VA).

Adicionalmente, se ha de tener en cuenta que en un contexto de economías globalizadas los insumos, los recursos naturales y los productos finales están cada vez más interconectados a través del comercio internacional y las cadenas de suministro globales. Esto conlleva la necesidad de incorporar las interdependencias entre las diferentes regiones e industrias en el modelo económico empleado. Por este motivo se utiliza un modelo IO multirregional. El modelo se encuentra explicitado en el Anexo 2.

Los datos socioeconómicos para el análisis se obtienen de la versión 3.7 de EXIOBASE (Stadler et al., 2019). La base de datos proporciona información sobre los vínculos económicos entre 163 sectores en 44 países (entre ellos España) y 5 regiones agregadas — combinado con múltiples cuentas satélite sociales y ambientales. Consideramos que EXIOBASE es una base de datos IO multirregional óptima para realizar el análisis porque sigue las directrices del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica de las Naciones Unidas, proporcionando un alto nivel de detalle sectorial armonizado y comparable entre países para aquellas actividades económicas que ejercen una presión significativa sobre los recursos naturales, lo que permitiría replicar el análisis en otras regiones. Además, tiene un detalle minucioso en lo que respecta a los sectores agrarios. Esto es particularmente relevante cuando se trata de la valoración de los recursos hídricos, ya que la agricultura es el sector que más agua utiliza en el mundo (más del 70% en Cataluña). Por último, ofrece series consistentes, largas y actualizadas. Concretamente, utilizamos la información de los últimos cinco años 2014-2019<sup>5</sup> y calculamos los efectos promedio; de este modo los resultados no están condicionados por la coyuntura económica del momento.

---

<sup>5</sup> Se ha decidido no utilizar los años 2020 y 2021 porque no se pueden considerar representativos debido a las grandes repercusiones económicas de la pandemia del COVID-19.

El aumento en la disponibilidad de agua azul de las acciones de adaptación se aplica de manera proporcional al uso de agua de los distintos sectores agrarios, puesto que estos son los usuarios más importantes de recursos hídricos en la economía y son, por tanto, los primeros beneficiados de un aumento en estos recursos, siempre que se cumplan con carácter previo los requerimientos ambientales de los caudales de mantenimiento o ecológicos de los ríos. Además, si se tiene en cuenta que cambio climático previsiblemente provocará un aumento la demanda de agua agraria a causa de las altas temperaturas y las mayores necesidades hídricas de los cultivos, un aumento en la disponibilidad de agua azul puede ayudar a aliviar la escasez y aumentar la producción. Un factor relevante para el análisis es establecer la proporción del aumento de los recursos hídricos disponibles que se va a destinar a un uso económico, es decir, para incrementar la producción. Los cálculos parten de que el nivel de estrés hídrico medio en España en la última década se ha mantenido por encima del 40%,<sup>6</sup> específicamente, se sitúa en el 40,17% en el 2019, lo que significa que se consume más del 40% de las reservas disponibles de agua dulce. Además, la agricultura supone aproximadamente el 80% de los usos consuntivos del agua en el Estado español. Por tanto, asumimos que el 32% ( $0,32=0,8 \times 0,4$ ) del incremento en los recursos hídricos obtenidos por las actuaciones se destinará a la actividad económica agraria, y el porcentaje restante permanecerá en el medio natural.

Una vez determinados los volúmenes de agua disponibles adicionales, se debe estimar cómo estos incrementos en la disponibilidad se traducen en incrementos de producción agregados para cada uno de los sectores económicos. Con el fin de obtener estimaciones más precisas de estos efectos directos, utilizamos las elasticidades calculadas por Roson (2019), que cuantifican el cambio porcentual en la producción sectorial debido a un cambio relativo en el agua disponible. El aumento de producción en el sector primario va a generar un efecto arrastre en numerosos sectores económicos debido a la necesidad de aumentar los insumos intermedios de estos sectores, indispensables para la producción agraria, y estos a su vez requerirán de insumos de otros sectores generando un efecto en cadena. Una vez calculados los incrementos directos en la producción, se puede calcular el impacto indirecto en los distintos sectores mediante la aproximación de Ghosh, y a partir de ahí el impacto final total sobre la economía. Cabe matizar que el impacto sobre el Valor Añadido (VA) calculado de este modo es más conservador que si se aplica el aumento de los recursos hídricos sobre todos los sectores económicos, agricultura, industria y servicios, de manera proporcional a su uso del agua. En este documento se ha considerado el planteamiento más prudente. No obstante, en años de sequía extrema, los beneficios calculados se podrían ver incrementados si los aumentos adicionales de las medidas de gestión pueden ayudar a paliar la escasez del recurso tanto en los sectores agroganaderos como en determinados sectores industriales.

#### 4.1.2. Datos hidrológicos

Para modelar los incrementos de producción iniciales, es necesario en primer lugar estimar el incremento en la disponibilidad de agua de las distintas actuaciones. Las acciones de adaptación se han modelizado en Aísa (Aragón), en el valle del Leza (la Rioja) y en la cuenca del Anyet (Cataluña). Aísa comprende un área de 77,24 km<sup>2</sup>, y la actuación modelizada ha consistido en el desbroce de un 6% de matorral, con un incremento consiguiente de la zona de pastos. Además, se lleva a cabo un clareo del 50% en el dosel en los bosques de coníferas, los cuales representan el 27,12% del territorio. El segundo emplazamiento, el valle del Leza, ocupa una extensión de 285,13 km<sup>2</sup>. En él se despeja el territorio potencialmente desbrozable según los criterios del gobierno regional, esto es, el 20% de la superficie cubierta por matorral

<sup>6</sup> Datos del Banco Mundial, disponibles en

<https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWST.ZS?locations=ES>

(un 9,7% del total). En la cuenca del Anyet, de 143,26 km<sup>2</sup>, se modeliza el desbroce de los campos de cultivos abandonados y se tala aproximadamente el 50% de la superficie forestal inicial del género *Quercus*, que pasa a ocupar del 18,62%, al 9,81% del territorio. El entregable D17 del proyecto LIFE MIDMACC proporciona una mayor información de los lugares y actuaciones analizadas.

El impacto de la gestión forestal sobre la provisión del agua se obtiene de calcular el aumento en el agua exportada en el escenario gestionado en comparación con el de no gestión. El aumento en la disponibilidad de agua azul para las distintas actuaciones y escenarios considerados se muestran en la Tabla 16. En general se puede observar una mejora en el balance hídrico derivado de la gestión en comparación con la situación de no gestión. Si no se toman en consideración los efectos del cambio climático, la gestión en el valle del Leza supone un incremento de caudal promedio de 0,1266 m<sup>3</sup>/s (3,96 hm<sup>3</sup> anuales) mientras que en la cuenca del Anyet el aumento es de 0,0456 m<sup>3</sup>/s (1,44 hm<sup>3</sup> anuales). En cambio, la gestión en Aísa no estaría recomendada desde el punto de vista específico de los recursos hídricos puesto que la disponibilidad disminuye. En las modelizaciones bajo cambio climático, el cambio es positivo en todos los escenarios considerados, como se puede observar en la Tabla 16. De forma paralela a los escenarios que no consideran los efectos del cambio climático, se puede ver que el mayor impacto se da en el valle del Leza y en el del Anyet, mientras que los cambios para la región de Aragón son mucho más modestos.

Incremento medio de los caudales en cuenca (m <sup>3</sup> /s)	Aísa (Aragón)	Leza (La Rioja)	Anyet (Cataluña)
<b>Sin Cambio Climático</b>	-0,00048	0,12666	0,04568
<b>Ssp2.6</b>	0,00084	0,12834	0,04282
<b>Ssp4.5</b>	0,00066	0,11267	0,04223
<b>Ssp7.0</b>	0,00231	0,11514	0,04164
<b>Ssp8.5</b>	0,00314	0,11585	0,03791

Tabla 16. Aumento en la disponibilidad de agua azul derivado de las actuaciones

Adicionalmente, es necesario considerar la extensión en el tiempo del impacto de las actuaciones. La metodología propuesta por el LIFE Climark asume que el efecto de las acciones de adaptación sobre el volumen de agua adicional se va a extender más allá del período de actuación, pero establece que éste no es constante a lo largo del tiempo, sino que disminuye a medida que la vegetación vuelve a crecer. Khorchani et al. (2021) también señalan que el incremento en los caudales hídricos después del desbroce no se puede considerar estable en el tiempo. En un estudio en la Cuenca del Estarrún en el Pirineo Aragonés, obtienen que el incremento máximo se da en el segundo año después de la actuación, y esta mejora se va diluyendo los años siguientes para revertirse a la situación original en un período de 5 años. Así, siguiendo a Khorchani et al. (2021), en el presente análisis se asume un período de mejora de 5 años. Específicamente, se asume que el incremento anual respecto al incremento medio es 1,25, 1,75, 0,75, 0,6, 0,6 en los años 1 a 5, respectivamente.

## 4.2. Resultados

### 4.2.1. Resultados generales

A continuación, se presenta la estimación de los impactos derivados del aumento de los recursos hídricos sobre la economía. Primero se muestra el impacto que tendría un aumento genérico de 1 hm<sup>3</sup> de recursos hídricos, y posteriormente se hace el cálculo específico para las acciones de adaptación al cambio climático de la media montaña establecidas en el proyecto LIFE MIDMACC. Así, la Tabla 17 muestra el impacto total, directo e indirecto, de un aumento de 1 hm<sup>3</sup> de recursos hídricos destinados a la producción medidos en términos de VA, desagregando por sectores económicos. El impacto total es de aproximadamente 3,5 millones de euros, de los cuales, 275.424 € corresponden al impacto directo sobre el sector agrario, y 3.204.230€ al impacto indirecto sobre todos los sectores económicos gracias al efecto arrastre de la mayor producción agraria.

Sectores económicos	Impacto total en € (%)		Impacto directo en € (%)		Impacto indirecto en € (%)	
Cultivo de arroz	4.349	(0,12)	4.347	(1,58)	2	(0,00)
Cultivo de trigo	14.073	(0,40)	13.685	(4,97)	388	(0,01)
Cultivo de otros cereales	32.246	(0,93)	31.939	(11,60)	308	(0,01)
Cultivo de verduras, frutas, frutos secos	150.000	(4,31)	144.723	(52,55)	5.277	(0,16)
Cultivo de semillas oleaginosas	33.805	(0,97)	33.729	(12,25)	75	(0,00)
Cultivo de caña de azúcar, remolacha azucarera	1.385	(0,04)	1.385	(0,50)	0	(0,00)
Cultivo de fibras vegetales y otros c.	18.251	(0,52)	18.239	(6,62)	12	(0,00)
Agricultura	38.728	(1,11)	27.377	(9,94)	11.351	(0,35)
Lana, capullos de gusanos de seda y otros productos animales	1	(0,00)	-	-	1	(0,00)
Leche	1.210	(0,03)	-	-	1.210	(0,04)
Actividades forestales, madereras y relacionadas	45	(0,00)	-	-	45	(0,00)
Pesca	144	(0,00)	-	-	144	(0,00)
Minas y canteras	204	(0,01)	-	-	204	(0,01)
Procesado/fabricación de alimentos y bebidas	380.693	(10,94)	-	-	380.693	(11,88)
Manufactura de otros productos	43.044	(1,24)	-	-	43.044	(1,34)
Maquinaria, equipo de transporte y otras manufacturas.	41.314	(1,19)	-	-	41.314	(1,29)
Suministro de electricidad, gas y agua	14.322	(0,41)	-	-	14.322	(0,45)
Construcción	93.130	(2,68)	-	-	93.130	(2,91)

Sectores económicos	Impacto total en € (%)		Impacto directo en € (%)		Impacto indirecto en € (%)	
Comercio, Hoteles y restaurantes	2.024.047	(58,17)	-	-	2.024.047	(63,17)
Transporte, almacenamiento y comunicación	64.778	(1,86)	-	-	64.778	(2,02)
Intermediación financiera y afines	244.879	(7,04)	-	-	244.879	(7,64)
Administraciones públicas, Educación, Sanidad y organismos extraterritoriales	228.740	(6,57)	-	-	228.740	(7,14)
Otras actividades comunitarias, sociales y de servicios personales y del hogar	50.266	(1,44)	-	-	50.266	(1,57)
<b>Total</b>	<b>3.479.653</b>		<b>275.424</b>		<b>3.204.230</b>	

Tabla 17. Impacto del aumento de 1hm<sup>3</sup> de agua de los recursos hídricos sobre el VA

En la Tabla 17 también se puede observar como el impacto directo más importante se da en el cultivo de verduras, frutas y frutos secos (52,55% del total), en el de semillas oleaginosas (12,25%) y en el de cereales (11,6%). Por otro lado, varios sectores económicos también incrementan la producción de forma importante. Así, el mayor efecto se puede apreciar en el Comercio al por mayor y al por menor, Hoteles y restaurantes, que acumula el 63,17% del efecto indirecto y un 58,17% del incremento total en el VA. También es importante el efecto sobre el Procesado y manufactura de alimentos y bebidas (10,94% del total y 11,88% del indirecto).

#### 4.2.2. Resultados para las zonas de estudio

En cuanto a los impactos económicos para las zonas de Aísa, Leza y Anyet, se representan en la Figura 19, Figura 20 y en la Figura 21, respectivamente, así como en la Tabla 18. Los gráficos ilustran la evolución temporal del cambio en el VA o PIB anual, a raíz de las intervenciones modelizadas, mientras que la Tabla 18 muestra el Valor Actual Neto del aumento en el VA durante el período considerado, descontado a un tipo de interés del 2%.

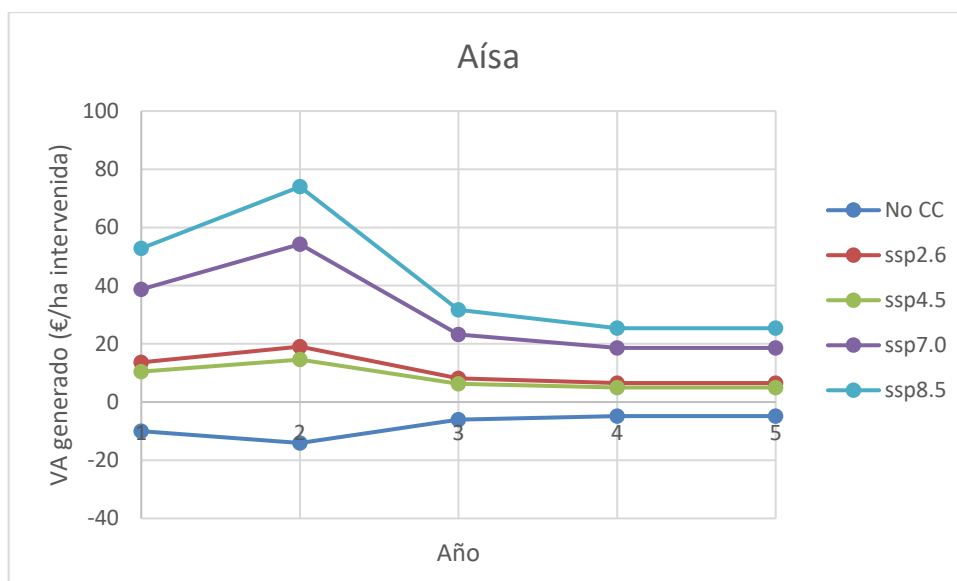


Figura 19. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en Aísa

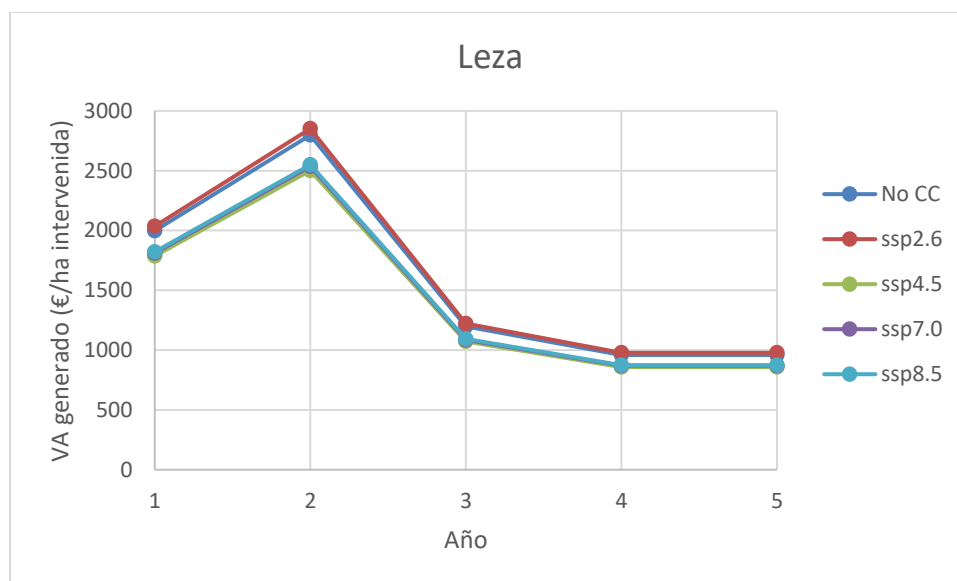


Figura 20. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en Leza



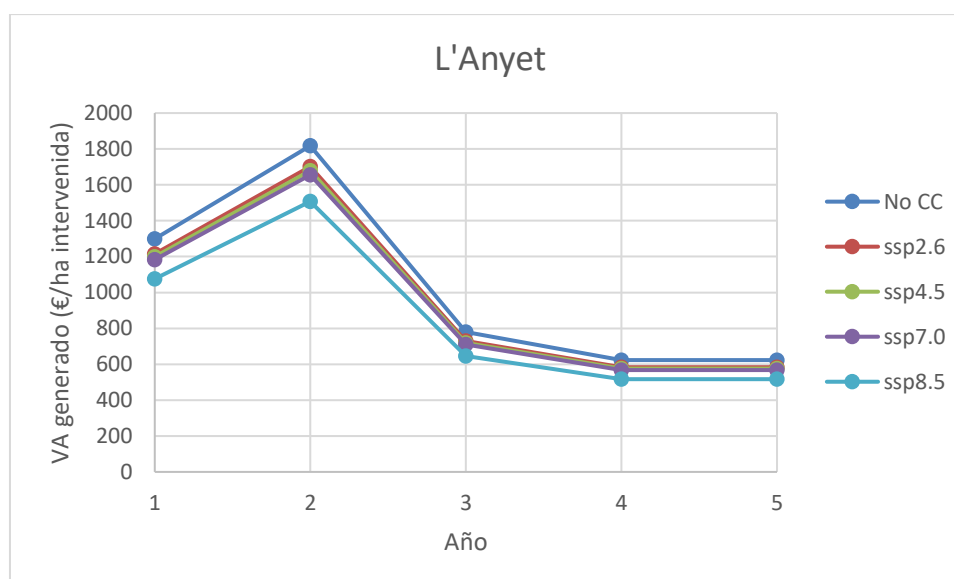


Figura 21. VA generado por el aumento en los recursos hídricos en L'Anyet

Escenario	Aísa (Aragón)	Leza (La Rioja)	Anyet (Cataluña)
No CC	-37,87 €	7.529,08 €	4.891,98 €
ssp2.6	51,29 €	7.673,00 €	4.580,02 €
ssp4.5	39,28 €	6.732,61 €	4.518,67 €
ssp7.0	146,04 €	6.824,58 €	4.454,94 €
ssp8.5	199,16 €	6.861,89 €	4.056,45 €

Tabla 18. Valor Actual Neto de los beneficios derivados del incremento en la disponibilidad de agua (euros por hectárea)

En la Figura 19 se puede observar como en una situación sin cambio climático la actuación en Aísa revierte en una pérdida de VA. En cambio, en los escenarios que contemplan los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos exportados el VA generado es positivo, y se sitúa en el intervalo de 13,61 – 52,85 € por hectárea intervenida el primer año después de las actuaciones de desbroce y aclareo, y entre 19,06 – 74,00 €/ha el segundo año, para disminuir posteriormente. El valor actual neto de los 5 años se sitúa entre los -37,87 – 199,16 €/ha (ver Tabla 18), dependiendo del escenario de cambio climático analizado. Teniendo en cuenta que la acción de adaptación que se valora es la de la recuperación de pastos a través del desbroce de 445 ha de matorral, cuyo coste se establece en 434,27€/ha a precio actualizado de 2021 y el desbroce, poda y aclareo de 2.095 ha de bosque de coníferas, con un coste entre 1.141 y 2.213€/ha, se puede considerar que el coste de los trabajos se situará entre los 1.017 y 1.901€/ha. Por tanto, el retorno de la actuación puede establecerse aproximadamente entre el 2% y el 19,6% de la inversión, es decir, por cada euro invertido se obtienen entre 0,02 y 0,19 euros derivados del incremento de los recursos hídricos. Este análisis nos muestra como las actuaciones modelizadas no son suficientes para proveer un servicio ecosistémico notable – en términos de la provisión de agua, desde el punto

de vista económico. Una potencial explicación podría ser la poca superficie de la zona que se puede desbrozar, o bien que el clareo del 50% de la cobertura forestal en los bosques de coníferas no es suficiente. Otra posible explicación podría ser que la pluviometría en la zona es elevada, lo que puede provocar una menor diferencia entre la gestión y la no gestión.

Por otro lado, el valor actual neto del incremento de producción (en términos de VA) generado en los desbroces de 2.760 ha de matorral en el valle del Leza son de 7.529 €/ha en el escenario sin cambio climático, y se sitúan en el rango de los 7.632,61 – 7.673 €/ha cuando se considera el efecto del cambio climático en la determinación de los cambios de caudal (Tabla 18). Estos valores son muy superiores al coste de las actuaciones, lo que indica que el beneficio social obtenido por los recursos hídricos generados es positivo, sin necesidad de contabilizar otros servicios ecosistémicos adicionales que pueda proveer el bosque.

Las actuaciones en la cuenca del Anyet dan unos resultados parecidos a los del Valle del Leza. El valor actual neto cuando no se considera el cambio climático es de casi 4.900 €/ha. Los beneficios obtenidos son ligeramente inferiores para los escenarios de cambio climático analizados (4.056,45 – 4.891,98 €/ha), pero igualmente superiores al coste que pueden suponer los desbroces y clareos.

Además del valor actual neto de las actuaciones se ha calculado el coste del agua exportada en las distintas localizaciones. La Tabla 19 muestra el resumen de los resultados.

	Aísa (Aragón)	Leza (La Rioja)	Anyet (Cataluña)
<b>Hectáreas intervenidas</b>	445 matorral 2.095 reducción dosel ( <i>Pinus</i> )	2760 matorral	326 recuperación de campos abandonados 1.218 tala ( <i>Quercus</i> )
<b>Coste de desbroce</b>	193.250 €	1.198.626 €	141.852 €
<b>Coste de gestión forestal</b>	2.390.395 – 4.636.235 €		1.389.467 – 2.694.908 €
<b>Coste total</b>	2.583.645 – 4.829.485 €	1.198.626 €	1.531.320 – 2.836.762 €
<b>Coste por m<sup>3</sup> de agua exportada (No CC)</b>	-	0,06 €	0,23 – 0,42 €
<b>Coste por m<sup>3</sup> de agua exportada (ssp2.6)</b>	22,09 – 41,29 €	0,06 €	0,24 – 0,45 €
<b>Coste por m<sup>3</sup> de agua exportada (ssp4.5)</b>	28,85 – 53,92€	0,07 €	0,24 – 0,45 €
<b>Coste por m<sup>3</sup> de agua exportada (ssp7.0)</b>	7,76 – 14,50€	0,07 €	0,25 – 0,46 €
<b>Coste por m<sup>3</sup> de agua exportada (ssp8.5)</b>	5,69 – 10,63€	0,07 €	0,27 – 0,50 €

Tabla 19. Cálculo del coste del agua exportada

Podemos observar en la Tabla 19 que los costes de provisión del agua derivados de las actuaciones en Leza son de 0,06 €/m<sup>3</sup> (0,07 €/m<sup>3</sup> en los escenarios que contemplan el cambio en las condiciones climatológicas), mientras que los del Anyet se encuentran entre 0,23 y 0,42 €/m<sup>3</sup> (0,24 - 0,50 €/m<sup>3</sup> con cambio climático). Se observa, como se ha apuntado anteriormente, la poca eficiencia de la medida en el emplazamiento de Aísa, donde los costes de provisión son muy altos.

### 4.3. Discusión

En este apartado se proporciona una estimación del valor económico de los recursos hídricos adicionales generados por las actuaciones de gestión agroganadera y forestal en la media montaña. Los resultados presentados muestran diferencias elevadas en función de la localización y las acciones propuestas. También sugieren que determinadas acciones de adaptación pueden resultar muy positivas para la provisión de servicios ecosistémicos esenciales en zonas que se espera que sufrarán los efectos negativos del cambio climático. El modelo utilizado se abstrae de algunos factores que podrían incluso acentuar los resultados. Por ejemplo, la estructura de la economía se supone fija, por lo que los incrementos en la disponibilidad de agua se han implementado en los distintos sectores agrarios siguiendo la estructura productiva española actual (promedio del período 2015-2019). Pero España es una de las zonas europeas con mayor escasez de agua y más propensa a las sequías, y en un futuro próximo la estructura económica actual podría verse comprometida debido a la necesidad imperativa de reducir las demandas del regadío al nivel de recursos disponibles. En este contexto, una mayor disponibilidad de agua puede ayudar a paliar la necesidad de modificar los cultivos hacia aquellos que impliquen unas menores necesidades hídricas, pero con un valor añadido inferior. Análisis de sensibilidad realizados considerando la estructura productiva en años de sequía extrema (como el 2006-2009) muestran que los beneficios aquí presentados podrían llegar a aumentar hasta un 70%.

Finalmente, cabe remarcar que, en un contexto de estrés hídrico notable como el de muchos países, las medidas de demanda se han de combinar con medidas encaminadas a aumentar la oferta de los recursos. Si comparamos el coste del agua exportada en Leza y Anyet con el coste actual de la desalación, que se puede situar en el rango 0,6 – 1 €/m<sup>3</sup>, o el coste del agua reutilizada (0,45 €/m<sup>3</sup>), el estudio sugiere que las soluciones basadas en la naturaleza tienen potencial como alternativas para reducir la presión sobre los recursos hídricos.

Tanto los costes de provisión del agua obtenidos como los beneficios en términos de aumento de valor añadido son relevantes en tanto que permiten evaluar las políticas de gestión del territorio en términos de coste-efectividad. Aun así, los resultados deben tomarse con cautela, a medida que se disponga de una mayor cantidad de estudios de seguimiento hidrológico, y más extensos en el tiempo, con resultados rigurosos y contrastables se podrá mejorar la predicción sobre la provisión adicional de agua que suponen las medidas de adaptación al cambio climático en la media montaña. Además, las cifras encontradas se pueden considerar como valores genéricos para el territorio español. El análisis se ha realizado con una matriz IO multiregional examinando el efecto sobre el PIB español por la factibilidad de datos y para que el análisis pueda ser replicable en otras zonas de media montaña. Sin embargo, se podría ajustar a la realidad de cada cuenca o subcuenca, si en un futuro se dispone de información económica en el ámbito a nivel regional actualizada.

## 5. Conclusiones

El objetivo principal de este informe es presentar la evaluación socioeconómica de las medidas de adaptación al cambio climático de las zonas marginales de la media montaña consideradas en el proyecto LIFE MIDMACC, como son la recuperación de pastos, la gestión forestal y la introducción y optimización del cultivo del viñedo. El documento se focaliza en aquellos aspectos que, a consecuencia del cambio climático, pueden tener un mayor impacto económico; específicamente, a efectos de una mayor disponibilidad de los recursos hídricos derivados de las medidas, la fijación de población en el territorio, y los incendios forestales.

Los resultados muestran que las medidas de gestión analizadas tienen potencial para aumentar estos servicios ecosistémicos y obtener un considerable retorno económico. En particular, los desbroces pueden contribuir notablemente a reducir la probabilidad de que haya un incendio forestal (entre un 67 y un 77% en la zona examinada, La Rioja), con una reducción de la superficie forestal quemada del 86,2%. Así, los costes privados evitados por hectárea quemada se pueden cifrar en torno a los 1.400€. En cuanto a la evolución de la población en zonas donde se han llevado a cabo desbroces respecto a zonas control (sin desbroces), y aunque la evidencia no está del todo clara, es perceptible un efecto sobre la fijación de población en el territorio ya que, respecto a las zonas control, existen desde ligeros incrementos de población hasta el cese histórico de la pérdida de habitantes.

Para generalizar los resultados obtenidos, en el informe se ha desarrollado un programa que permite determinar el nivel óptimo de la extensión de diferentes medidas de intervención con diferentes capacidades para reducir la propagación de los incendios forestales. Los resultados muestran que incluso con una tasa de extensión baja, el área quemada puede reducirse sustancialmente. A partir de la reducción de la superficie quemada, el programa calcula los beneficios y los combina con los costes de las medidas de intervención, obteniendo la extensión óptima de las distintas medidas de intervención.

Por otra parte, la gestión forestal también genera efectos positivos a través de una mayor disponibilidad de agua, que revierte en una mayor producción agraria y una mayor actividad en los distintos sectores económicos. Así, las medidas analizadas en Aísa (Aragón) contemplan aumentos modestos de VA de la orden de 51,29 a 199,16 €/ha intervenida en los escenarios de cambio climático, mientras que en el valle del Leza (La Rioja) y en la cuenca del Anyet (Cataluña) los beneficios son más notables y se sitúan sobre los 7.000 € y 4.500 €/ha intervenida de media en los diferentes escenarios considerados. Si sumamos estos beneficios a las pérdidas evitadas en incendios forestales, podemos considerar que las medidas de intervención son efectivas y proporcionan unos beneficios económicos que compensan los costes de la gestión.

En estas evaluaciones se ha comprobado la utilidad de los indicadores definidos. Su precisión depende de la disposición de datos de campo de las intervenciones. En este sentido, la generación de nueva información biológica y ecológica, como se hace en el proyecto LIFE MIDMACC, es clave para la obtención de resultados socioeconómicos más precisos, que permitirán mejorar el diseño de las políticas públicas de adaptación al cambio climático en el monte medio mediterráneo.

## 6. Referencias

- Agencia Catalana del Agua. (2022). *Projecte Life Climark 2018/2022. Gestió forestal i experiències en el monitoreig de l'aigua blava al bosc de Marimon (La Llacuna)*.
- de Cáceres, M., Cervera, T., Baiges, T., Borràs, G., Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Munné, A., & Manzano, A. (2022). Chapter 2. In T. Cervera, T. Baiges, X. Rabascall, & et al. (Eds.), *Metodologia de càlcul de l'impacte de la gestió forestal en els serveis ecosistèmics: carboni, aigua i biodiversitat*. Centre de la Propietat Forestal, Santa Perpètua de Mogoda. 61pp.
- De Cáceres, M., Martínez-Vilalta, J., Coll, L., Llorens, P., Casals, P., Poyatos, R., Pausas, J. G., & Brotons, L. (2015). Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.06.012>
- Freire-González, J., Decker, C., & Hall, J. (2018). A Linear Programming Approach to Water Allocation during a Drought. *Water*, 10(4), 363. <https://doi.org/10.3390/w10040363>
- García-Hernandez, J. A., & Brouwer, R. (2020). A multiregional input–output optimization model to assess impacts of water supply disruptions under climate change on the Great Lakes economy. *Economic Systems Research*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/09535314.2020.1805414>
- García-Ruiz, J. M., Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Álvarez-Farizo, B. (2020). Rewilding and restoring cultural landscapes in Mediterranean mountains: Opportunities and challenges. *Land Use Policy*, 99(June), 104850. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104850>
- Ghosh, A. (1958). Input-Output Approach in an Allocation System. *Economica*, 25(97), 58. <https://doi.org/10.2307/2550694>
- Khorchani, M., Nadal-Romero, E., Lasanta, T., & Tague, C. (2021). Effects of vegetation succession and shrub clearing after land abandonment on the hydrological dynamics in the Central Spanish Pyrenees. *CATENA*, 204(2021), 105374. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105374>
- Lasanta, T., Cortijos-López, M., Errea, M. P., Khorchani, M., & Nadal-Romero, E. (2022). An environmental management experience to control wildfires in the mid-mountain mediterranean area: Shrub clearing to generate mosaic landscapes. *Land Use Policy*, 118(April). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106147>
- Leontief, W. W. (1941). *The Structure of the American Economy, 1919-29*.
- Martin-Ortega, J., González-Eguino, M., & Markandya, A. (2012). The costs of drought: the 2007/2008 case of Barcelona. *Water Policy*, 14(3), 539–560. <https://doi.org/10.2166/wp.2011.121>
- Molinero, F.; Garcia, A.; Cascos, C.; Baraja, E.; Guerra, J. (2008). La percepción local de los incendios forestales y sus motivaciones en Castilla y León. *Ería. Revista Cuatimestral de Geografía*, 76, 213–229.
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T., & Cerdà, A. (2018). Integrating Extensive Livestock and Soil Conservation Policies in Mediterranean Mountain Areas for Recovery of Abandoned Lands in the Central Spanish Pyrenees. A Long-Term Research Assessment. *Land Degradation & Development*, 29(2), 262–273. <https://doi.org/10.1002/ldr.2542>
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T., & García-Ruiz, J. M. (2013). Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: long-term results from an experimental station. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 346–355. <https://doi.org/10.1002/esp.3281>



- Proops, J. L. R. (1988). Energy intensities, input–output analysis and economic development. In M. Ciaschini (Ed.), *Input–Output Analysis: Current Developments*. Chapman & Hall.
- Roson, R. (2019). Economy-Wide Modeling of Water at Regional and Global Scales. In G. Wittwer (Ed.), *Economy-Wide Modeling of Water at Regional and Global Scales*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6101-2>
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Bruckner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J. H., Theurl, M. C., Plutzar, C., Kastner, T., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., ... Tukker, A. (2019). *EXIOBASE 3 (3.7) [Data set]* Zenodo. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.3583071>
- Tague, C. L., & Band, L. E. (2004). RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *Earth Interactions*, 8(19), 1–42. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2004\)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2004)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2)

## Anexo 1

```

ini* := ext = Join[ $\frac{\text{Range@50}}{100.}$ ]; eff =  $\frac{\text{Range@11} - 1}{10.}$ ; risk = Monitor[

Table[{{eff[[i]], ext[[n]], Mean@Table[bar1 = RandomVariate[BernoulliDistribution[ext[[n]],
|media |tabla |variable aleatoria |distribución Bernoulli
100]; bar2 = Flatten@Position[bar1, 1];
|aplana |posición
β = {Append[bar2, 101], Append[ConstantArray[eff[[i]], Length@bar2], 1]}^T;
|añade |añade |arreglo constante |longitud
Total@Table[(β[[j,1]] - 1) β[[j,2]]  $\prod_{k=1}^{j-1} (1 - \beta[[k,2]])$ , {j, Length@β}], 999}],
|total |tabla |longitud
{n, Length@ext}, {i, Length@eff}], {i, n}];
|longitud |longitud

ini* := a = Floor@Prepend[100 - risk[[All,All,3]], 100 eff]^T;
|entero· |añade al principio
b = Prepend[a, Prepend[Floor[100 ext], "extension/efficiency"]];
|añade al pri· |añade al· |entero inferior
b^T // TableForm (* share saved from fire *)
|forma de tabla

```

## Anexo 2

El modelo input-output multiregional utilizado para el análisis económico considera todos los intercambios intermedios entre industrias, así como las demandas finales de los países y sectores (consumo, inversión, gasto público y exportaciones) y parte de una variación del modelo de Leontief (1941), específicamente, utiliza la aproximación propuesta por Ghosh (1958).

El modelo de Leontief (1941) permite analizar los impactos de los cambios en la demanda final sobre la producción de cada sector. Se representa la producción de la economía mundial formada por  $i$  sectores y  $r$  países como

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z}\mathbf{e} + \mathbf{y}\mathbf{e} \quad [1]$$

donde  $\mathbf{x} = (x_i^r)$  es la matriz  $rx_i$  que denota el valor de la producción en un período determinado. Sus elementos,  $x_i^r$ , representan la producción total de la industria  $i$  en la región  $r$ ,  $\mathbf{y} = (y_i^{rs})$  es la matriz de demandas finales, donde  $y_i^{rs}$  es la demanda final de productos de la industria  $i$  en la región  $r$  realizada por la región  $s$ , y  $[z_{ij}^{rs}]$  es la matriz multiregional de intermedios. Los elementos  $z_{ij}^{rs}$  corresponden al volumen del input del sector  $i$  del país  $r$  que se utiliza en la producción del producto  $j$  en el país  $s$  y  $\mathbf{e}$  es un vector unitario. Las figuras 22 y 23 presentan un esquema del modelo IO uniregional y multiregional, respectivamente.

Si definimos los coeficientes técnicos como  $\mathbf{A} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1}$ , donde sus elementos  $A_{ij}^{rs}$  se interpretan como el valor de los inputs del sector  $i$  en la región  $r$  necesarios por cada euro de producción del sector  $j$  en la región  $s$ , y  $\hat{\mathbf{x}}$  representa la matriz de producción diagonalizada, la ecuación [1] se puede expresar como la función inversa de Leontief,  $\mathbf{L} = [L_{ij}^{rs}]$ :

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{y} \leftrightarrow \mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{L}\mathbf{y}$$

donde cada componente de  $\mathbf{L}$ ,  $L_{ij}^{rs}$ , indica la producción del sector  $i$  del país  $r$  incorporada directa e indirectamente en cada unidad de la demanda final de la industria  $j$  del país  $s$ .

Cuando queremos relacionar los cambios en los factores productivos de cada sector con la producción del mismo sector y de los demás sectores, podemos utilizar el modelo de Ghosh (1958). Este modelo está basado en los mismos datos que el modelo anterior, pero cambia la perspectiva rotando la forma en que se analiza la tabla de filas en columnas, y relacionando la producción bruta sectorial con las materias primas, es decir, con una unidad de valor que entra en el sistema interindustrial. Por eso se conoce como modelo IO con enfoque de oferta.

En vez de dividir cada columna de la matriz de intermedios  $\mathbf{Z}$  por la producción del sector asociado a la columna en cuestión, se dividen las filas de  $\mathbf{Z}$  por la producción asociada a ellas, obteniendo la matriz de coeficientes de asignación  $\mathbf{B} = \hat{\mathbf{x}}^{-1}\mathbf{Z}$ , donde sus elementos  $b_{ij}^{rs}$  representan la distribución del output del sector  $i$  del país  $r$  en los sectores  $j$  del país  $s$  que compran inputs de  $i$ . De esta forma,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{e}'\mathbf{Z} + \mathbf{e}'\mathbf{v}',$$

con  $\mathbf{v}' = [v_1, \dots, v_n]$ , donde los elementos de  $\mathbf{v}'$  corresponden al valor añadido de cada uno de los sectores económicos. Substituyendo  $\mathbf{Z}$  por su valor  $\mathbf{Z} = \hat{\mathbf{x}}\mathbf{B}$ , y dado que  $\mathbf{e}'\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}'$  obtenemos

$$\mathbf{x}' = \mathbf{e}'\hat{\mathbf{x}}\mathbf{B} + \mathbf{e}\mathbf{v}' = \mathbf{x}'\mathbf{B} + \mathbf{v}'$$

Con esto,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{v}'(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{v}'\mathbf{G}$$



donde  $\mathbf{G} = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}$ . La matriz  $\mathbf{G}$  se conoce como matriz inversa del output, y sus elementos  $g_{ij}^{rs}$  se pueden interpretar como el valor total de la producción que se produce en el sector  $j$  del país  $s$  por unidad de insumo primario en el sector  $i$  en el país  $r$ .

A partir de este modelo se puede encontrar el impacto que un cambio en el valor añadido causa al resto de la economía, es decir, a la producción intermedia y final. Estos cambios vendrían definidos por

$$\Delta \mathbf{x}' = (\Delta \mathbf{v}') \mathbf{G}$$

	Industria 1	...	Industria j	...	Industria n	Demanda final	Output total
Industria 1	$z_{11}$					$y_1$	$x_1$
...							
Industria i			$z_{ij}$			$y_i$	$x_i$
...							
Industria n					$z_{nn}$	$y_n$	$x_n$
Valor agregado	$v_1$		$v_i$		$v_n$		
Output total	$x_1$		$x_i$		$x_n$		

Figura 22. Esquema de un modelo Input-Output

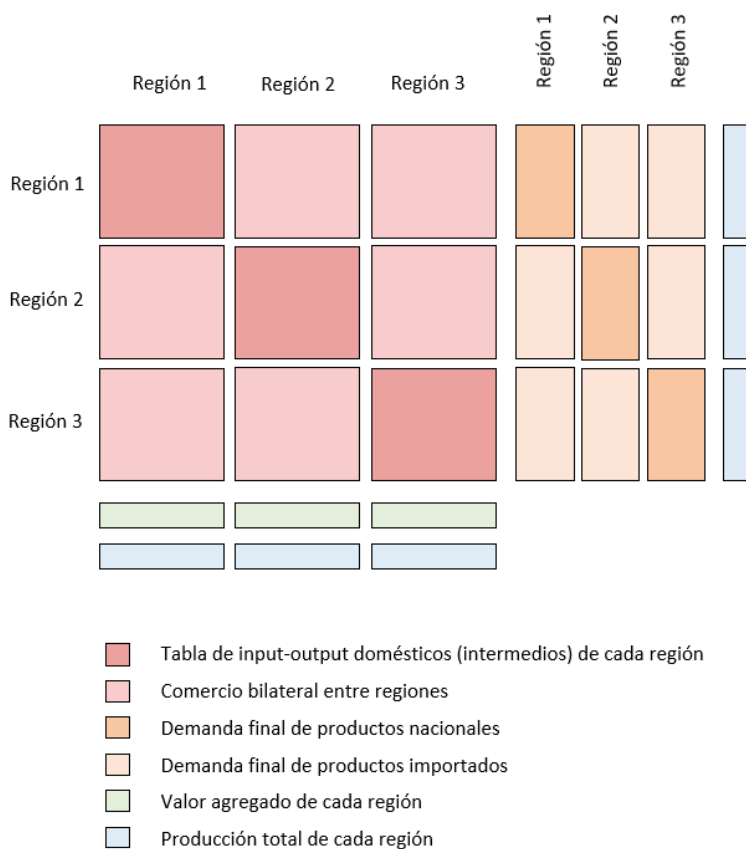


Figura 23. Esquema de un modelo Input-Output multiregional con 3 regiones