

Trabajo Fin de Master

Análisis económico de alternativas al monocultivo de maíz (*Zea mays*) en regadíos del Valle del Ebro.

Economic analysis of alternatives to maize (*Zea mays*) monoculture in irrigated areas of the Ebro Valley.

Autor

Miguel Cancer Craver

Directores

María Asunción Usón Murillo

Luis Pardos Castillo

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2026

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Asunción Usón Murillo y al Dr. Luis Pardos Castillo, por enseñarme todo el proceso para llevar a cabo este TFM, por la paciencia, y por la ayuda en todo momento.

A los profesores de la Escuela Politécnica Superior de Huesca.

A mis compañeros y amigos de clase, que desde primero han sido un complemento necesario para poder acabar mis estudios, y que me acompañarán en mi vida profesional.

Y en especial a mi familia, que, sin su fuerza, su apoyo, sus consejos, su amor y su cariño no podría haber llegado hasta aquí.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Miguel Cancer Craver, con DNI 73023254W, declaro que el Trabajo Fin de Master que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Y para que conste, firmo este documento.



En Zaragoza, a 5 de enero de 2026

Fdo. Miguel Cancer Craver

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. El cultivo del maíz: su importancia en España y Aragón.	14
1.2. Sistemas de cultivo del maíz: monocultivo-diversificación.	19
1.3. Estudios ambientales en relación con la diversificación de cultivos con maíz... 22	
1.4. Estudios económicos	25
1.4.1. Análisis económico global de los sistemas de producción de maíz en España.	25
1.4.2. Análisis económico de la rotación del maíz con otros cultivos en el valle del Ebro	35
2. JUSTIFICACION	37
3. OBJETIVOS	38
4. MATERIALES Y METODOS.....	40
4.1. Descripción del ensayo experimental	40
4.2. Tratamientos.....	41
4.3. Precios de los inputs y outputs	44
4.3.1. Combustible.....	44
4.3.2. Coste de la maquinaria	44
4.3.3. Semillas.....	44
4.3.4. Fertilizantes.....	45
4.3.5. Fitosanitarios.....	45
4.3.6. Energía	45
4.3.7. Precio de venta de la semilla cosechada.....	45
4.4. Eficiencia de la fertilización	46
4.5. Análisis de sensibilidad	46
4.5.1. Ingresos.....	46
4.5.2. Coste de la maquinaria	47

4.5.3. Coste de la fertilización	47
4.5.4. Coste de la semilla de siembra	47
4.6. Análisis estadístico	47
5. RESULTADOS Y DISCUSION	48
5.1. Precios de los insumos y de los productos de venta.....	48
5.1.1. Gasoil	48
5.1.2. Energía aspersión	48
5.1.3. Fitosanitarios.....	48
5.1.4. Fertilizantes.....	49
5.1.5. Semilla	49
5.1.6. Precio de venta del grano producido	49
5.1.7. Rendimiento de las cosechas.....	50
5.2. Costes e ingresos en cada tratamiento.	50
5.2.1. Tratamiento 1: Barbecho-maíz ciclo largo.	50
5.2.2. Tratamiento 2. Cubierta vegetal (veza)-maíz ciclo largo.....	51
5.2.3. Tratamiento 3. Cebada-maíz ciclo corto.	53
5.2.4. Tratamiento 4. Guisante-Maíz ciclo corto.	54
5.3. Comparación entre tratamientos	56
5.3.1. Coste de labores.....	56
5.3.2. Coste de la energía.....	57
5.3.3. Coste de fitosanitarios.....	57
5.3.4. Coste de fertilizantes.....	58
5.3.5. Coste de semilla	59
5.3.6. Coste total.....	60
5.3.7. Ingresos totales.....	60
5.3.8. Beneficios totales.....	61
5.4. Eficiencia de la fertilización	62
5.5. Análisis de sensibilidad	63
5.5.1. Ingresos.....	63
5.5.2. Coste de la maquinaria.....	63
5.5.3. Coste de fertilización.....	64
5.5.4. Coste de semilla.	65

5.6. Discusión	67
5.6.1. Costes de fitosanitarios según tratamiento.	67
5.6.2. Costes de fertilizantes según tratamiento.	67
5.6.3. Monocultivo del maíz frente a dobles cultivos: aspectos económicos y ambientales.	70
6. CONCLUSIONES	74
7. BIBLIOGRAFIA.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Superficie cultivada y producción total de maíz grano en España (año 2023). Fuente: Elaboración propia a partir de MAPA (2025).	16
Tabla 2: Rendimiento medio de maíz en regadío en España (en Kg/ha.). Fuente: Elaboración propia a partir de ESRYCE (2025).	16
Tabla 3: Superficie, rendimiento y producción de maíz en Aragón (año 2022). Fuente: Elaboración propia a partir de MAPA (2024 a).	17
Tabla 4. Inputs aplicados al tratamiento 1: siembra de maíz cada año tras un periodo de barbecho invernal. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 5. Inputs aplicados al tratamiento 2: cultivo de maíz cada año con cubierta vegetal de veza durante el invierno. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 6: Inputs aplicados al tratamiento 3: cultivo de maíz de segunda cosecha tras un cultivo de cebada en invierno. Fuente: Elaboración propia.	42
Tabla 7: Inputs aplicados al tratamiento 3: cultivo de maíz de segunda cosecha tras un cultivo de guisante en invierno. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 8: Precios gasoil año 2019, 2020 y 2021. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 9: Precios energía aspersión los tres años del ensayo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 10: Precios de los fitosanitarios usados en el ensayo durante los tres años. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 11: Fertilizantes usados en el ensayo y precio de estos. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 12: Precios de los diferentes tipos de semilla usados en los tres años del ensayo. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 13: Precios de venta del grano producido en los tres años del ensayo en euros por cada 100 Kg. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 14: Rendimiento en kg/ha de los diferentes cultivos en los tres años del ensayo. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 15: Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 1 en los 3 años de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 16. Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 2 en los 3 años de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 17. Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 3 en los 3 años de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	53

Tabla 18: Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 4 en los 3 años de ensayo.
Fuente: Elaboración propia. 54

Tabla 19: Ingresos (€/ha) en cada tratamiento cada año de estudio. Hay diferencias significativas por el año de estudio (medias seguidas con letras X,Y,Z) y también por los tratamientos (letras A, B Y C). **Fuente:** Elaboración propia. 61

Tabla 20: Beneficios (€/ha) en cada tratamiento cada año de estudio. Hay diferencias significativas por el año de estudio (medias seguidas con letras X, Y, Z) y también por los tratamientos (letras A, B, C). **Fuente:** Elaboración propia. 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la producción de maíz (miles de t.) campañas 2011/2024 en la UE-27. Fuente: Gutiérrez, et al. (2025) a partir de datos de la Comisión Europea.	15
Figura 2. Superficie de cultivo de maíz por Comunidades Autónomas (Has). Años 2023 y 2024. Fuente: Red ARAX (2025). Datos suministrados por las Cooperativas Agroalimentarias.	16
Figura 3. Superficie de maíz en Aragón (ha) por provincias (año 2024). Fuente: Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agroalimentaria de Aragón).	17
Figura 4. Evolución de la superficie (ha) y rendimiento de maíz (t/ha) en España. Período 2019/2024. Fuente: Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de Cooperativas Agroalimentarias de noviembre de 2024.	18
Figura 5. Evolución de la superficie de maíz (Mil Has.) por provincias en Aragón. Periodo 2011-2024. Fuente: Red Arax (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agroalimentaria de Aragón).	18
Figura 6. Esquema del proyecto experimental. Fuente: Zugasti-López et al. (2024).	25
Figura 7. Comparación de rendimientos del maíz en España en relación con otros ámbitos geográficos. Periodo 1960-2020. Fuente: Gabriel et al. (2022).	26
Figura 8. evolución de la superficie cultivada de maíz en España (1900-2020). Fuente: Gabriel et al. (2022).	27
Figura 9. Evolución de los rendimientos de maíz en España (1900-2020). Fuente: Gabriel et al. (2022).	27
Figura 10. Evolucion de los precios de venta del maiz en España (campañas 2010/11 a 2024/25). Fuente: MAPA (s.f. a).	28
Figura 11. Variaciones porcentuales sobre la última cotización. Fuente: MAPA (s.f. a).	28
Figura 12. Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura. (España, periodo 2003-2018). Fuente: Gabriel et al. (2022) en base a los datos de ANFFE (2021).	30
Figura 13: Costes de producción según metodología Agribenchmark. Fuente: MAPA (2019), Anejo 1.	33
Figura 14. Superficie de maíz en Aragón (ha) por provincias declarado como 1º y 2º cultivo (año 2024). Fuente: Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agraria de Aragón) Gobierno de Aragón, enero 2025.	35

Figura 15. Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 1 (Barbecho. Maíz ciclo largo). Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 16. Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 2 (cubierta vegetal-maíz). Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 17: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 3 (cebada-maíz ciclo corto). Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 18: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 4 (guisante-maíz ciclo corto). Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 19: Costes de las labores de labranza en euros para los 4 tratamientos (media de los 3 años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 20: Coste de la energía en euros para los tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95%. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 21: Coste de los fitosanitarios en euros para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 22: Coste de los fertilizantes en euros para los 4 tratamientos (medio de los tres años de estudio). Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 23: Coste de los fertilizantes en euros para los 4 tratamientos (medio de los tres años de estudio). Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 24: Coste de los fertilizantes en euros para los 4 tratamientos (medio de los tres años de estudio). Fuente: Elaboración propia	60
Figura 25: Grafica explicativa de la eficiencia del uso del nitrógeno y de la respuesta económica al uso del nitrógeno. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 26: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio de venta del producto. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 27: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio de labores y gasoil. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 28: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio del fertilizante. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 29: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio del fertilizante. Fuente: Elaboración propia.	66

RESUMEN

La Política Agraria Común promueve la diversificación de cultivos por sus beneficios ambientales como el incremento de la biodiversidad, mejora del reciclado de nutrientes y reducción de emisiones, aunque hay poca información sobre el balance económico de estas propuestas.

Este trabajo pretende cuantificar la rentabilidad económica de alternativas al monocultivo de maíz: el uso de cubierta vegetal de veza y dos sistemas de doble cultivo: cebada o guisante con maíz de ciclo corto. Para ello, se realiza un análisis de costes e ingresos en cada situación durante 3 años.

Los costes de laboreo y energía para el riego suponen entre el 40 y el 50% de los totales, pero no se ven afectados por las alternativas analizadas. Sin embargo, conforme se aumenta la intensificación se incrementan significativamente los costes de fertilizantes, semillas y fitosanitarios.

Los ingresos aumentan significativamente con el doble cultivo de cebada y maíz, pero los beneficios se igualan en los dos dobles cultivos analizados. Desde el punto de vista de utilización de nutrientes, la eficiencia en el uso del nitrógeno es similar en todas las situaciones analizadas.

Finalmente, el análisis de tendencias muestra que, variando los costes hasta un incremento del 40%, estos resultados se mantienen.

Palabras clave: diversificación de cultivos, rentabilidad económica, análisis de tendencias.

ABSTRACT

The Common Agricultural Policy promotes crop diversification for its environmental benefits, such as increased biodiversity, improved nutrient recycling and reduced emissions, although there is little information on the economic balance of these proposals.

This study aims to quantify the economic profitability of alternatives to maize monoculture: the use of vetch cover crops and two double cropping systems: barley or peas with short-cycle maize. To this end, a cost and income analysis is carried out for each situation over a period of three years.

Tilling and irrigation energy costs account for between 40 and 50% of the totals, but are not affected by the alternatives analysed. However, as intensification increases, the costs of fertilisers, seeds and plant protection products increase significantly.

Income increases significantly with double cropping of barley and maize, but profits are equal in the two double crops analysed. From the point of view of nutrient use, nitrogen use efficiency is similar in all the situations analysed.

Finally, the trend analysis shows that, with costs varying up to a 40% increase, these results remain unchanged.

Keywords: crop diversification, economic profitability, tren análisis.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El cultivo del maíz: su importancia en España y Aragón.

El maíz es uno de los cereales más consumidos del mundo. Permite múltiples aplicaciones, es utilizado para la alimentación animal y humana y también se usa como materia prima en industrias de la transformación (almidón, aceite y otros productos alimenticios). Además, en los últimos años, sus residuos vegetales han sido usados como materia prima para generar calor y electricidad, o fermentados para producir biocombustible.

Ha experimentado un proceso de expansión y adaptación desde su origen en México (hace aproximadamente 9.000 años): primero al resto de América, después a Europa –tras el descubrimiento de América– y al resto del mundo. Las variedades modernas de maíz duro surgieron a mediados del siglo XIX, a causa de una hibridación espontánea entre una variedad de maíz tropical con una variedad local del norte de Estados Unidos, a partir de la cual han surgido muchas de las variedades cultivadas en la actualidad, especialmente en zonas templadas. La temperatura idónea para que se produzca la germinación de la semilla es de 15°C a 20°C. Las lluvias son esenciales durante el periodo de crecimiento, aunque si hay déficit de lluvias este cultivo exige unos 5mm al día de aportación de agua de riego. Requiere suelos profundos y ricos en materia orgánica (Fundación Institut Cerdà, 2021)

Desde principios del siglo XX, con el descubrimiento de los híbridos, la mejora vegetal en maíz permitió ir incrementando los rendimientos gracias a mazorcas más sólidas, con granos más grandes y seleccionadas para ser cultivadas a una mayor densidad. Respecto a la resistencia a plagas, es importante destacar la introducción de variedades de maíz transgénico Bt. En España el cultivo de maíz Bt se inició en 1998, desde que fue autorizado en la Unión Europea. Esta variante se cultiva principalmente en el Valle del Ebro, la zona española donde la plaga de taladro tiene una mayor incidencia.

En el mundo desarrollado el maíz se utiliza principalmente para alimento del ganado y producción de biocombustibles, pero en muchos países en desarrollo se consume sobre todo como alimento humano. Por lo general los pequeños agricultores, tanto en el África subsahariana como en América Latina, producen maíz como alimento para consumo familiar y para la venta en mercados de proximidad. Se calcula que el maíz junto al trigo y al arroz, representan el 42,5 % de todas las calorías de la dieta humana. La producción actual de maíz en el mundo, para la campaña 2023/24, alcanza los 1.235 millones de toneladas (FAOSTAT, s.f.). El crecimiento previsto por la FAO para la década 2020-29 era del 16%, estimando en el arranque del periodo que se alcanzaría la cifra de 1.315 millones de toneladas en 2029 (OECD/FAO, 2020).

La Unión Europea es la cuarta región del mundo en producción, tras Estados Unidos, China y Brasil, con 59,8 millones de toneladas en el año 2024. La versatilidad del maíz permite aprovechar no solamente las mazorcas y el grano del maíz –para alimentación humana y animal– sino la planta entera cuando se destinado a uso forrajero. En Europa, el maíz se usa principalmente en la alimentación animal, tanto en grano como en forraje. El maíz en grano se utiliza para la producción de pienso y el forrajero mayoritariamente para ensilar o para alimentar directamente al ganado con la planta verde. También se está iniciando el consumo humano de

maíz (palomitas, cereales, snaks) que en Europa era mucho menos significativo que en otras regiones del mundo.

La figura 1 detalla la evolución de la producción de maíz (Miles de t.) campañas 2011/2024 en los 27 países de la Unión Europea (UE-27)

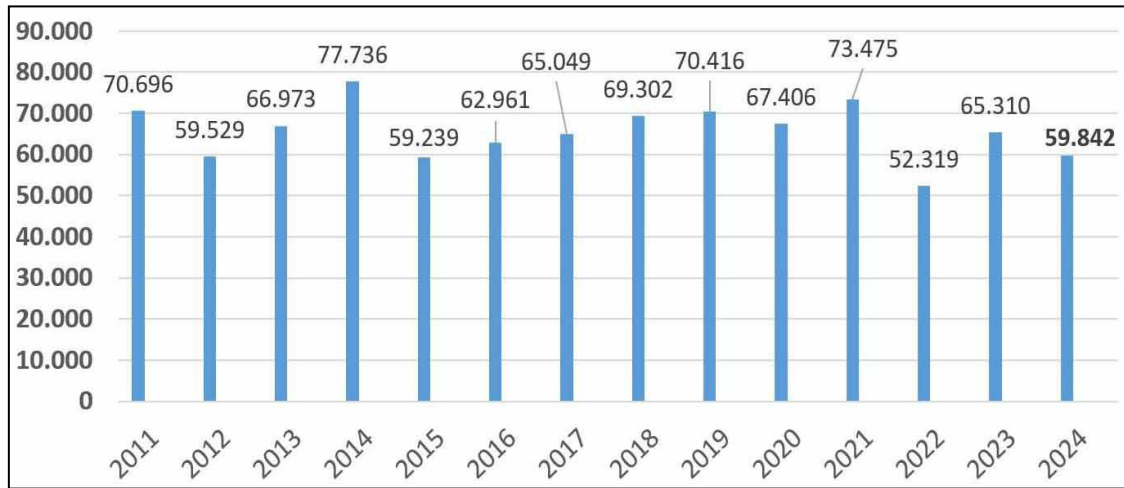


Figura 1. Evolución de la producción de maíz (miles de t.) campañas 2011/2024 en la UE-27. **Fuente:** Gutiérrez, et al. (2025) a partir de datos de la Comisión Europea.

En España el cultivo de maíz, en 2023, ocupó una superficie de 239.792 Has (MAPA 2025). La mayor parte de la superficie de maíz, 224.050 Has, se cultiva en regadío. También se cultiva el maíz sin necesidad de regadío en las regiones húmedas del Norte de España.

El cultivo del maíz se concentra fundamentalmente en Castilla y León, Aragón, Cataluña y Galicia. En su mayor parte el maíz en grano se destina a la producción de pienso (España lidera la producción de piensos compuestos de Europa). Sobre el total de materias primas para los piensos, el maíz en grano representa de media un 23% de los piensos compuestos en España, y el trigo y la cebada un 19% y 15% respectivamente (Fundación Institut Cerdà, 2021)

La figura 2 detalla la superficie de cultivo de maíz por Comunidades Autónomas (has) en los años 2023 y 2024.

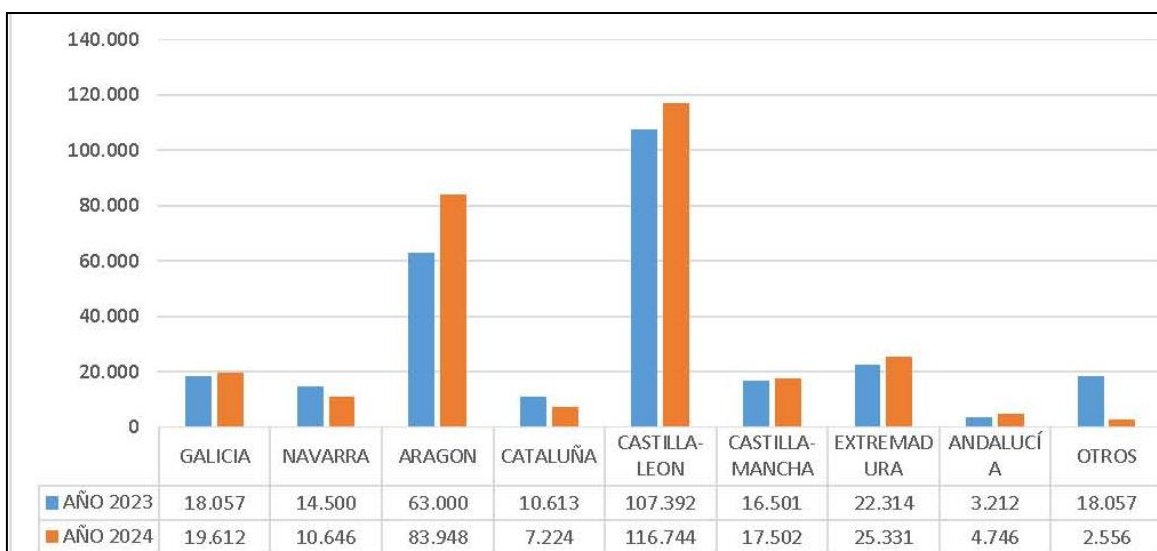


Figura 2: Superficie de cultivo de maíz por Comunidades Autónomas (Has). Años 2023 y 2024. **Fuente:** Red ARAX (2025). Datos suministrados por las Cooperativas Agroalimentarias

Para la superficie cultivada de maíz en España se utilizan las estadísticas más recientes del MAPA que presentan los datos del año 2023 (MAPA 2025)

Tabla 1: Superficie cultivada y producción total de maíz grano en España (año 2023). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MAPA (2025).

Secano (Has.)	Regadío (Has.)	Total (Has.)	Producción total (Tm.)
15.742	224.050	239.792	2.835.346

Para rendimiento del maíz en regadío se han consultado los datos de ESRYCE, encuesta de superficies y rendimientos de cultivos (ESRYCE, 2025)

Tabla 2: Rendimiento medio de maíz en regadío en España (en Kg/ha.). **Fuente:** Elaboración propia a partir de ESRYCE (2025).

Rendimiento medio 2024	Rendimiento medio 2023	Rendimiento medio 5 años	Rendimiento medio 10 años
13.481	13.334	13.246	12.838

En Aragón el cultivo de maíz ocupa una superficie de 85.057 Has. según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA 2024 a). Casi la totalidad de la superficie de maíz se cultiva en regadío (84.541 Has), tiene una presencia importante en los regadíos de Huesca (primera provincia productora de maíz dentro de Aragón) seguida de Zaragoza y mucha menor importancia en la provincia de Teruel. Comparando los datos con los del resto de CC.AA., Aragón es la segunda en superficie y producción, por detrás de Castilla León que tiene una superficie cultivada de 108.576 Has y una producción de 1.383.421 de Tm. Por detrás de Aragón, las

siguientes comunidades en cuanto a la superficie de maíz cultivada –a mucha distancia de las anteriores– son Castilla La Mancha, Galicia y Cataluña (MAPA, 2024 a)

El anuario de Estadística del MAPA del que proceden los datos a los que estamos haciendo referencia, presenta el análisis a escala provincial de superficie, rendimiento y producción. El último publicado es el de 2023 y en él los datos se refieren al año 2022 (MAPA, 2024 a)

Tabla 3: Superficie, rendimiento y producción de maíz en Aragón (año 2022). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MAPA (2024 a).

	Superficie (Has.)			Rendimiento (Kg/Ha)		Producción de grano (Tm.)
	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío	
Huesca	399	63.931	64.330	6.700	11.200	718.700
Teruel	-	1.916	1.916	-	9.229	19.024
Zaragoza	177	18.694	18.811	5.846	11.830	221.834
Aragón	516	84.541	85.057	6.506	11.311	959.558
España	17.169	297.123	314.292	6.087	11.732	3.590.260

La figura 3 detalla la superficie de maíz en Aragón (ha) por provincias (año 2024)

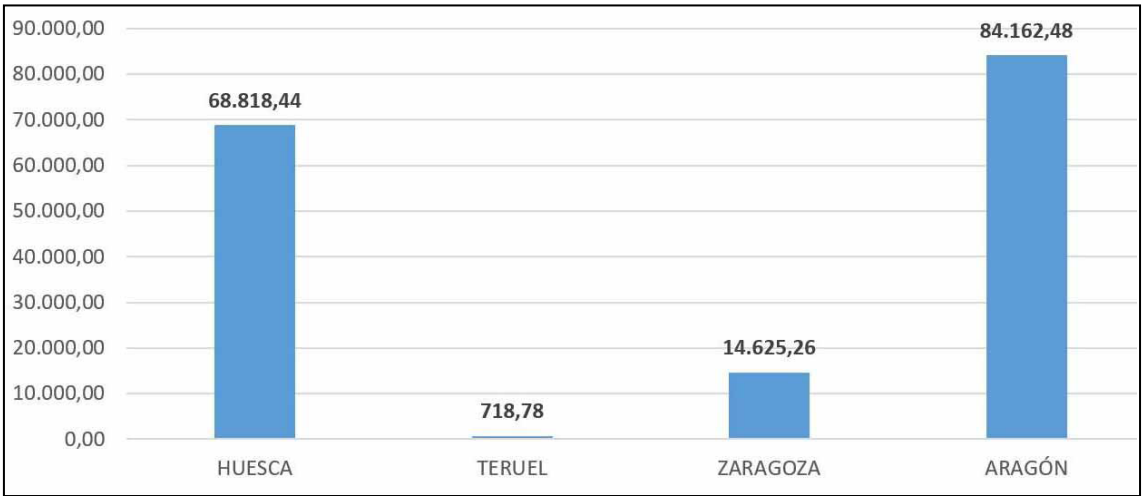


Figura 3: Superficie de maíz en Aragón (ha) por provincias (año 2024). **Fuente:** Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agroalimentaria de Aragón)

La figura 4 detalla la evolución de la superficie (ha) y rendimiento de maíz (t/ha) en España en el período entre 2019 y 2024.

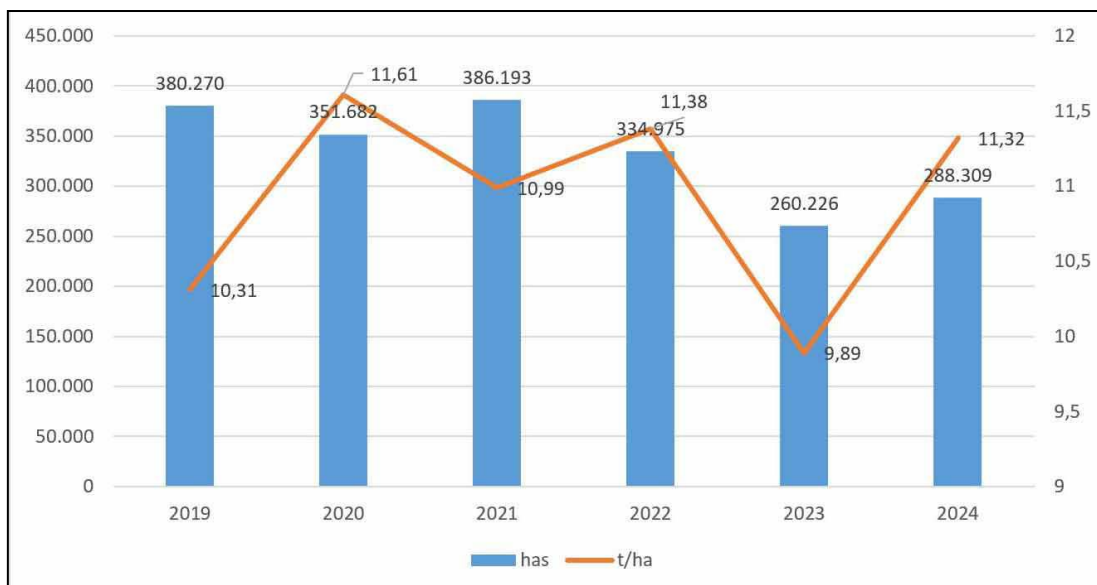


Figura 4: Evolución de la superficie (ha) y rendimiento de maíz (t/ha) en España. Período 2019/2024. **Fuente:** Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de Cooperativas Agroalimentarias de noviembre de 2024.

En cuanto a la evolución de la superficie cultivada de maíz en Aragón en el gráfico siguiente podemos observar una superficie estabilizada por encima de las 75.000 has en los últimos 10 años, a excepción del año 2023, en el que se puede apreciar un descenso muy significativo respecto de la serie histórica 2000/24 debido a la sequía que afectó al conjunto de la superficie nacional.

La figura 5 detalla la evolución de la superficie de maíz (Mil Has.) por provincias en Aragón en el periodo entre 2011 y 2024.

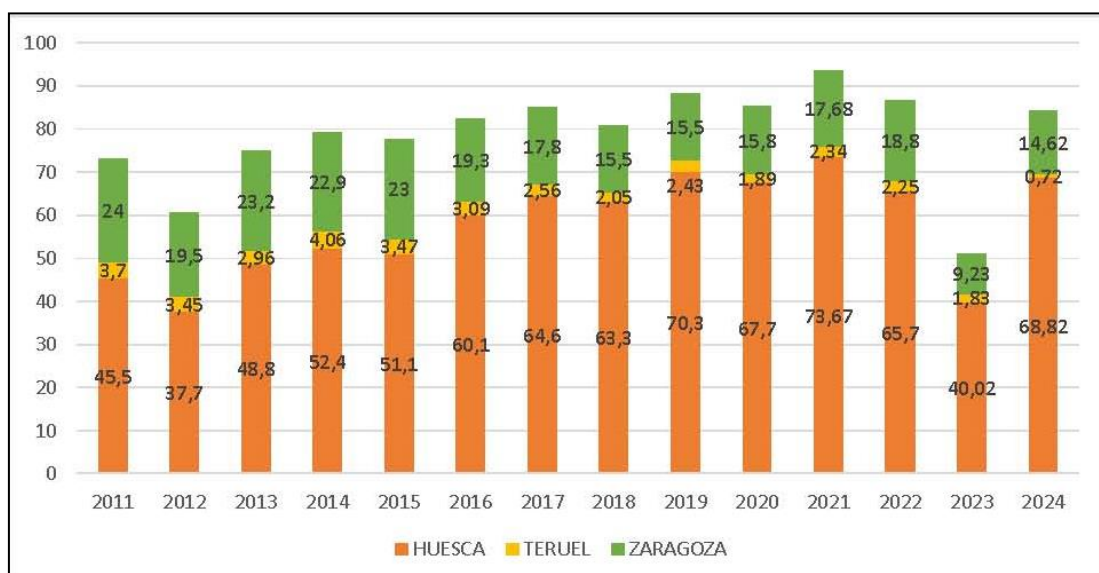


Figura 5: Evolución de la superficie de maíz (Mil Has.) por provincias en Aragón. Período 2011-2024. **Fuente:** Red Arax (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agroalimentaria de Aragón)

La campaña de primavera verano del año 2024 registró un importante aumento de siembra de maíz respecto a la del año anterior (un año muy seco y con muy malos resultados). Los buenos resultados de la campaña 2024 están relacionados sobre todo con el incremento de reservas hídricas y aumento del almacenamiento de agua en los embalses, principalmente en la margen izquierda del río Ebro y en la provincia de Huesca (Red ARAX, 2025).

1.2. Sistemas de cultivo del maíz: monocultivo-diversificación.

En el conjunto de la agricultura mundial los sistemas de monocultivo registraron un crecimiento exponencial asociado a la llamada Revolución Verde, especialmente entre 1960 y 1980. Fue un período de transformación en la agricultura mundial que se caracterizó por la introducción de nuevas tecnologías y prácticas que aumentaron significativamente la productividad agrícola. La intensificación se obtuvo en muchos casos a expensas de la degradación de la tierra, la salinización de zonas de regadío, la extracción excesiva de aguas subterráneas, el aumento de la resistencia a las plagas y daños en el medio ambiente en general, a través del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación por nitratos de las masas de agua. La FAO es actualmente muy crítica con estos sistemas, se ahí la preocupación por nuevos sistemas diversificados como el modelo “Ahorrar para crecer” impulsado por esta organización (FAO, 2015). Este modelo incorpora tres prácticas básicas en una agricultura de conservación respetuosa con el medioambiente. En primer lugar, se trata de limitar la alteración mecánica del suelo porque la preparación excesiva de la tierra con arados, gradas y azadas entierra la cubierta protectora del suelo, reduce la biota edáfica, provoca la rápida descomposición de la materia orgánica, agota la fertilidad de los suelos y degrada su estructura. En segundo lugar, se fomentan los cultivos de cobertura o cubiertas vegetales para reducir la erosión, aumentar la infiltración de agua, conservar la humedad del suelo, eliminar las malas hierbas y estimular la proliferación de biota edáfica que favorece la salud del suelo y el rendimiento de las cosechas. En tercer lugar, se mantiene la aportación de nutrientes de cultivos, se reducen las plagas y enfermedades y se refuerza la estabilidad global de los sistemas mediante el cultivo de un abanico más amplio de especies y variedades vegetales en asociaciones y rotaciones.

En el modelo “Ahorrar para crecer” se proponen sistemas de rotación y diversificación de cultivos frente al sistema de monocultivo. La diversificación de cultivos consiste en la siembra de varios cultivos diferentes, es decir, pertenecientes a distintas familias en las tierras de una misma explotación. Tiene el objetivo de evitar tanto el agotamiento del suelo como el control de las malas hierbas y la disminución de las plagas.

Este modelo recupera prácticas alternativas al monocultivo para mejorar la salud y la productividad del suelo: sistemas, ya conocidos y aplicados en culturas agrícolas tradicionales, como el cultivo de alternancia de leguminosas con maíz, que dan lugar a un aumento de la productividad de la tierra y son más sostenibles ambientalmente. Se estima que, a través de la fijación biológica del nitrógeno, las leguminosas añaden al suelo hasta 300 kg de nitrógeno por hectárea al año. Como ejemplos de buenas prácticas tradicionales se hace referencia a que en México los pequeños agricultores han desarrollado un sistema para el cultivo de frijoles fuera de la estación del maíz, que tiene como resultado un aumento significativo de los niveles de pH, materia orgánica y nitrógeno del suelo. A su vez, ello contribuye a que el cultivo siguiente de

maíz aumente su rendimiento un 25 %. También en Madagascar, el maíz plantado junto con un cultivo de cobertura de leguminosas, estimula la germinación de las semillas de *Striga*, eliminando luego con su sombra las malas hierbas (FAO, 2015).

La diversificación de cultivos tiene muchos beneficios. En primer lugar, desde el punto de vista económico, puede aumentar la productividad del sistema y disminuir los riesgos de mercado asociados a un solo cultivo. En segundo lugar, desde el punto de vista ambiental, la diversificación es beneficiosa para los suelos y además contribuye a reducir el uso de fitosanitarios, rompiendo el ciclo de las plagas y a reducir el uso de fertilizantes, implantando cultivos fijadores de nitrógeno.

En España el impulso definitivo hacia la diversificación de cultivos lo dio la reforma de la PAC en 2015 a partir de la cual entró en vigor el *Greening* o Pago Verde, una ayuda complementaria anual que concede la PAC a los agricultores que implementan prácticas respetuosas con el medio ambiente. Una de ellas es la diversificación de cultivos. En la PAC se consideran cultivos diferentes en la Diversificación de cultivos los siguientes (Agroptima, 2019; Real Decreto 919/2025):

- Los distintos géneros botánicos: por ejemplo, los cereales como la cebada, el trigo, el maíz o la avena, pertenecen a diferentes géneros botánicos y, por tanto, se consideran cultivos diferentes.

- La tierra en barbecho.

- La hierba u otros forrajes herbáceos.

- Cultivos de invierno y de primavera: por ejemplo, el trigo de invierno es diferente al de primavera. En este caso debe haber evidencias de la distinta estacionalidad de los cultivos.

- Cultivos mixtos en hilera si cada cultivo representa al menos el 25% de la superficie.

La PAC actualmente en vigor -2023-2027- introdujo como novedad la figura de los ecorregímenes. Los ecorregímenes establecen una remuneración a las explotaciones que desarrollen prácticas agrícolas o ganaderas beneficiosas para el clima y el medio ambiente (Vida rural, 2023).

Los objetivos medioambientales principales que persiguen los ecorregímenes se traducen en: a) una agricultura baja en carbono que mejore la estructura de los suelos, reduzca la erosión y la desertificación, aumente el contenido de carbono y reduzca las emisiones; y b) una agroecología que favorezca la biodiversidad, los paisajes y la conservación y la calidad de los recursos naturales.

En total, la PAC establece nueve ecorregímenes teniendo en cuenta los beneficios sobre el clima y el medio ambiente que se persiguen, en los ámbitos de la Agricultura de Carbono o la Agroecología.

-El ámbito de la Agricultura de Carbono engloba todas las prácticas que ayudan a incorporar carbono en el suelo y a evitar que el carbono presente en el suelo se volatilice. Por ejemplo, el pastoreo extensivo, la agricultura de conservación, la siembra directa o las cubiertas vegetales en cultivos leñosos.

-El ámbito de la Agroecología engloba las prácticas que favorecen los márgenes de biodiversidad tanto en pastos como en tierras de cultivo. En estas se promueven las rotaciones y la siembra directa en secano y en regadío. Por rotación se entiende la alternancia anual de cultivos (dentro de un mismo año agrológico). En la PAC se indica que las tierras sembradas de leguminosa no podrán ir seguidas en la rotación de cultivos por tierras en barbecho.

En España la práctica del doble cultivo no es nueva, ha estado presente desde hace muchos años, pero con objetivos finales distintos a los que se les están dando hoy en día. Lo más frecuente era encontrar sistemas de doble cultivo donde el aprovechamiento final de uno o de los dos cultivos era forraje. Esta práctica era habitual en zonas donde el cultivo solía tener una conexión con la ganadería, que era donde se daba el aprovechamiento del forraje. Con el aprovechamiento forrajero de uno o de los dos cultivos se pueden adelantar las cosechas varias semanas o meses, lo que permite introducir más fácilmente dos cultivos en un año, lo que supone un aumento de la productividad de las parcelas (Lloveras, 1987).

En relación con el cultivo del maíz en España (y en el Valle del Ebro) se está impulsando la práctica de la rotación de cultivos frente al sistema de monocultivo. Y ya no solo como complemento al aprovechamiento forrajero en explotaciones mixtas, sino también en explotaciones exclusivamente agrícolas que ven en el doble cultivo una oportunidad de intensificar la producción de sus parcelas.

Tradicionalmente en el valle del Ebro el cultivo principal en regadío ha sido el maíz seguido por un periodo de barbecho invernal, pero la tendencia creciente es que buena parte de la superficie destinada a la producción de grano de maíz en monocultivo está cambiando hacia sistemas que introducen dos cultivos en un año, siendo las combinaciones de cebada-maíz y maíz-leguminosas las más frecuentes. La modernización de regadíos, la mejora de la maquinaria y la introducción de variedades de maíz de ciclos más cortos, son factores que favorecen la realización de dobles cosechas en el mismo año.

Actualmente, los altos costes de producción del maíz sumados a los bajos precios de venta están motivando el cambio de este sistema de cultivo tradicional hacia sistemas con mayores rendimientos económicos. En este sentido, son numerosos los trabajos que han puesto de manifiesto la mejora de rendimientos que trae consigo la diversificación de cultivos (Gil, 2013; Maresma et al., 2016; Fernández-Ortega, 2024).

En la misma dirección apuntan los resultados de un proyecto (LegSpiens, 2023) que ha trabajado experimentalmente en la rotación de cultivos con leguminosas en tres zonas –Duero, Ebro y Centro–. De las trece experiencias presentadas en el informe del grupo LegSpiens tras dos años de trabajo de investigación, algunas corresponden a dobles cultivos con maíz en la zona del Valle

del Ebro –una con maíz-soja y otra con maíz-alubia–. Este estudio indica que la soja puede integrarse fácilmente en los actuales monocultivos de maíz, dando lugar a distintos beneficios agronómicos y ambientales entre los que se destacan unas menores necesidades de nitrógeno y agua de riego, una mayor productividad del cultivo siguiente, la diversificación de materias activas para el control de malas hierbas del maíz, etc. Respecto a la alubia en rotación con el maíz, el estudio concluye que sí puede fijar una parte del nitrógeno que necesita el maíz, aunque en menor cantidad que otras leguminosas.

1.3. Estudios ambientales en relación con la diversificación de cultivos con maíz.

La intensificación de la producción agrícola, basada en el monocultivo y altos niveles de insumos externos, ha influido negativamente en la biodiversidad de los ecosistemas. En particular ha disminuido la diversidad genética de los cultivos, ha acelerado la erosión del suelo y ha dificultado la fijación biológica del nitrógeno.

Los objetivos medioambientales ligados a la actividad agraria preocupan en todos los niveles desde la escala global a la local. En la Unión Europea, dentro del Pacto Verde Europeo podemos citar como ejemplo la estrategia *De la granja a la mesa* (Comisión Europea, 2019) que tiene como objetivo impulsar la evolución de la agricultura de la UE hacia un modelo más sostenible para poder contribuir al logro de la neutralidad climática de aquí a 2050. Para ello la Unión Europea ha establecido algunos objetivos concretos y cuantificables que se deberían alcanzar para 2030, por ejemplo, la reducción en un 50% del uso de los fitosanitarios, en un 20% del uso de fertilizantes, así como la disminución de pérdidas de nutrientes un 50% sin alterar la fertilidad del suelo.

El cambio climático ya está afectando –y previsiblemente afectará más en el futuro– al cultivo del maíz. A nivel de temperatura, se calcula que por cada grado que suba la temperatura media global, se producirán unas pérdidas de rendimiento de un 4% en maíz (Zhao et al., 2018). En este aspecto, los incrementos de temperatura afectarán de forma más directa al maíz cultivado en secano. Pero también el maíz cultivado en regadío se verá afectado por la disponibilidad de agua en el futuro, debido a mayores episodios de sequía y al aumento de la evapotranspiración que se producirá por la combinación de disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas, tal y como indican las previsiones de cambio climático; por tanto, habrá menor disponibilidad de agua para los cultivos y aumentos en los costes del riego.

Por eso muchas iniciativas de I+D en el sector del maíz –igual que en otros cultivos– van orientadas a la creación de semillas mejor adaptado a las futuras condiciones climáticas, de manera que el descenso en lluvias y la subida de temperaturas no afecte a su rendimiento. Se estima que un 70% de las iniciativas de innovación del sector obtentor identificadas en relación con el maíz van encaminadas hacia la adaptación y compensación de los efectos del cambio climático (Fundación Instituto Cerdà, 2021).

La agricultura es la actividad económica que produce mayores emisiones de N_2O . En concreto, el uso de fertilizantes nitrogenados está asociado a la producción y emisión de N_2O , uno de los

principales gases de efecto invernadero. Debido a su alto potencial de calentamiento global, 298 veces mayor que el del CO₂, el N₂O es responsable del 15 % del calentamiento global. En el caso del maíz, muchas investigaciones se han orientado a determinar los beneficios ambientales del uso de leguminosas como cultivos de cobertura o en rotaciones con el maíz. La diversificación de cultivos, maíz-leguminosas, frente al maíz en monocultivo, puede ser una estrategia clave para disminuir el N₂O al reducir las necesidades de fertilización de N de los cultivos posteriores debido a la fijación de N atmosférico por parte de las leguminosas. Desde el punto de vista medioambiental, en el caso de la rotación con leguminosas, se consigue la reducción de la lixiviación del N fijado por estas especies al ser consumido por el cultivo posterior. También tiene un impacto importante en la erosión reduciendo la pérdida de suelo y nitratos por lixiviación al verse aumentada la materia orgánica y reducirse los periodos de suelo desnudo como en el caso del monocultivo. Sin embargo, en algunos escenarios, las emisiones serían menores en el período cultivado con leguminosas, pero podrían ser mayores en el período posterior al crecimiento, lo que ilustra la importancia de realizar cuantificaciones a escala rotacional y para diferentes áreas de cultivo (Fernández-Ortega et al., 2023).

La otra dirección en la que este tipo de sistemas diversificados contribuye a la reducción del cambio climático es mediante el secuestro de C: el doble cultivo, con dos momentos de aporte de residuos de cultivo al año, han demostrado en determinadas experiencias, ser positivo en términos de aumento del contenido del C orgánico del suelo.

En el Valle del Ebro, la especialización en los sistemas extensivos de regadío va asociada a la pérdida de diversidad y a una alta dependencia de fertilizantes de síntesis. En concreto, el monocultivo de maíz en regadío en esta zona es uno de los sistemas más demandantes de fertilizantes nitrogenados. De ahí que, desde el punto de vista medioambiental, la alternativa de la diversificación de cultivos frente a los sistemas de monocultivo de maíz en el Valle del Ebro, resulte muy adecuada tal y como han puesto de manifiesto diferentes estudios. La alternativa al monocultivo también se está viendo reflejada de manera creciente en las prácticas agronómicas concretas de muchos agricultores de esa zona.

Sobre la demanda de fertilizantes nitrogenados en el monocultivo del maíz en los regadíos del Valle del Ebro se han realizado bastantes estudios (Isla y Quílez, 2011; Martínez de la Cuesta et al., 2015). Los relativos a la alternancia de maíz con otros cultivos son actualmente muy abundantes. Algunos trabajos recientes se han centrado en cómo el aumento de la diversidad de cultivos, incluyendo los cultivos de cobertura de invierno y el doble cultivo en sistemas basados en maíz, afectan a las emisiones de GEI en condiciones mediterráneas de riego por aspersión.

Por ejemplo, el estudio llevado a cabo en los terrenos de la Estación Experimental Aula Dei (EEAD-CSIC) en la provincia de Zaragoza durante 2019 y 2020 (Franco-Luesma et al., 2022) avala la tesis de que la diversificación de cultivos afecta a las emisiones de N₂O del suelo, señalando, en concreto, que en los sistemas de maíz de regadío en el valle del Ebro es importante tener en cuenta rotación con leguminosas porque la liberación de N permite ajustar las dosis de fertilizantes.

Otro estudio para el valle del Ebro, en este caso en la zona de Agramunt en Lérida (Fernández-Ortega et al., 2023), presenta las conclusiones de los trabajos de campo de un periodo de tres años –de 2019 a 2021– comparando el monocultivo del maíz con el doble cultivo maíz-leguminosas. En él se concluye que, dado que el monocultivo es el sistema en el que se aplican las mayores cantidades de fertilizante mineral, en él se produce un mayor N acumulado. La combinación de sistemas de doble cultivo junto con la siembra directa y las tasas de fertilización media, produce un factor de emisión del 0,44 %, muy inferior al 1 % recomendado actualmente por el IPCC. Este trabajo señala la ventaja de utilizar sistemas de doble cultivo combinados con un enfoque de labranza cero y tasas ajustadas de fertilización con N.

Entre los estudios que, desde un punto de vista ambiental, avanzan en la propuesta de alternativas al monocultivo de maíz en los regadíos del Valle del Ebro vamos a hacer hincapié en el reciente proyecto de investigación (Zugasti-López et al., 2024) –en el que se inscribe este trabajo– cuyos ensayos sobre rotación de cultivos se desarrollaron en las parcelas de la Estación Experimental de Aula Dei en Montañana (Zaragoza) durante un periodo de dos años (2020 y 2021).

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la intensificación, mediante la diversificación de cultivos, sobre las emisiones de N_2O en condiciones mediterráneas. Hay que tener en cuenta que la fertilización nitrogenada está estrechamente relacionada con las emisiones de óxido nitroso (N_2O) que tiene un potencial de calentamiento global 265 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2). En concreto, en esta investigación se evaluó el impacto de la diversificación del monocultivo de maíz sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, tanto las directas como las indirectas asociadas a los manejos e insumos (fertilizantes y pesticidas) requeridos por los distintos cultivos. El objetivo final era evaluar el potencial de calentamiento global (*global warming potential, GWP*) asociado a sistemas con distinto grado de diversificación en el valle del Ebro. La hipótesis de partida era que la diversificación frente al sistema de monocultivo de maíz puede contribuir a la optimización en el uso de los insumos y la reducción de los impactos negativos sobre el medio ambiente.

La diversificación se realizó con dos sistemas de doble cultivo: maíz de ciclo corto con cebada y con guisante; y dos sistemas con monocultivo: maíz de ciclo largo con barbecho invernal o con cultivo cubierta de veza. Los sistemas se manejaron mediante laboreo convencional y en riego por aspersión, incluyendo la aplicación de herbicidas y fungicidas según necesidades. El esquema del proyecto experimental de este trabajo se muestra en la figura 6.

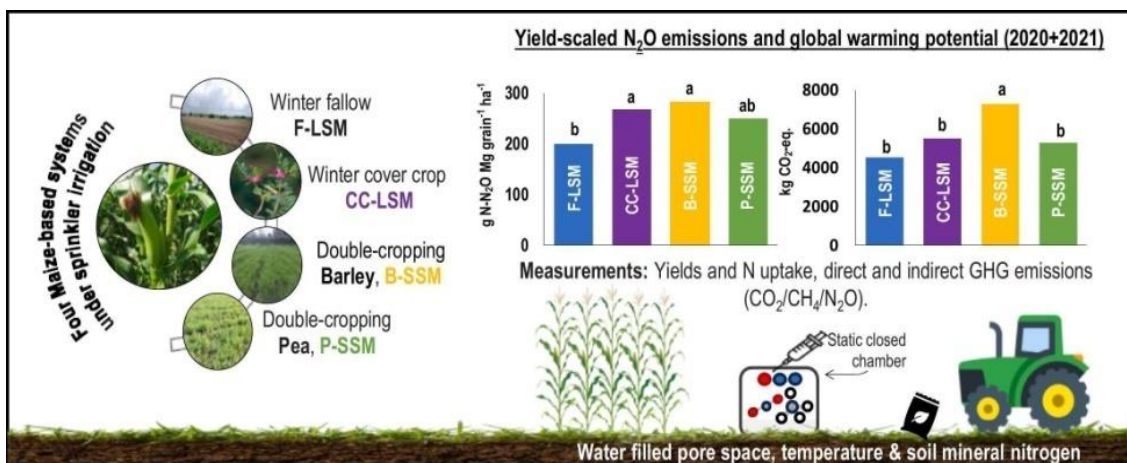


Figura 6: Esquema del proyecto experimental. **Fuente:** Zugasti-López et al. (2024)

Los resultados de esta investigación han establecido –en línea con bastantes estudios previos– que la fertilización nitrogenada es el principal factor impulsor de las emisiones de N_2O . Por sistemas, se han observado los siguientes parámetros:

-Las emisiones asociadas a la producción de los fertilizantes fueron menores en los sistemas con leguminosas (un 63% menores en maíz-veza y un 31% menores en maíz con guisante).

-Las emisiones asociadas al riego (energía para bombeo) sólo fueron un 8 % mayores en los sistemas de doble cultivo que en los de monocultivo, probablemente debido a la mayor eficiencia del uso del agua en los primeros.

-En cuanto a las emisiones directas, el doble cultivo maíz-cebada presentó el mayor potencial de calentamiento global-GWP (7320 $kg\ CO_2eq\ ha^{-1}$), seguido del doble cultivo maíz-veza (5512 $kg\ CO_2eq\ ha^{-1}$) y del doble cultivo guisante-maíz (5287 $kg\ CO_2eq\ ha^{-1}$) con resultados similares al sistema de monocultivo.

Como conclusión, la introducción de leguminosas como doble cultivo mantiene emisiones directas similares a las de monocultivo de maíz con barbecho invernal; pero las leguminosas sí que reducen las emisiones indirectas derivadas de la producción de fertilizantes porque la dosis de fertilizante puede ser reducida en la práctica del doble cultivo maíz-guisante.

Aunque el sistema maíz-cebada fue el más productivo, su alta demanda de fertilizante incrementó las emisiones directas de N_2O en un 79%, 35%, y 30% sobre las emitidas por el sistema de maíz- barbecho, maíz-guisante y maíz-veza respectivamente. Por último, los sistemas de doble cultivo apenas requieren un ligero incremento de la energía para el riego comparados con los sistemas de monocultivo.

1.4. Estudios económicos

1.4.1. Análisis económico global de los sistemas de producción de maíz en España.

Para un análisis económico global de la producción de maíz en España interesa contemplar dos aspectos, la evolución de la producción en nuestro país y la situación de la producción española frente a la producción mundial. Hemos seguido para ello el estudio comparativo de Gabriel et al. (2022).

Tanto la superficie cultivada a nivel mundial como el rendimiento medio por hectárea han aumentado durante las últimas décadas en todo el mundo: los rendimientos medios mundiales pasaron de 1,942 kg de grano por ha en 1961 a 5.715 en 2018. El rendimiento medio en España es actualmente uno de los más altos del mundo (11.919.6 kg de grano al 14% por ha)

La figura 7 detalla la comparación de rendimientos del maíz en España en relación con otros ámbitos geográficos para el periodo entre 1960 y 2020.

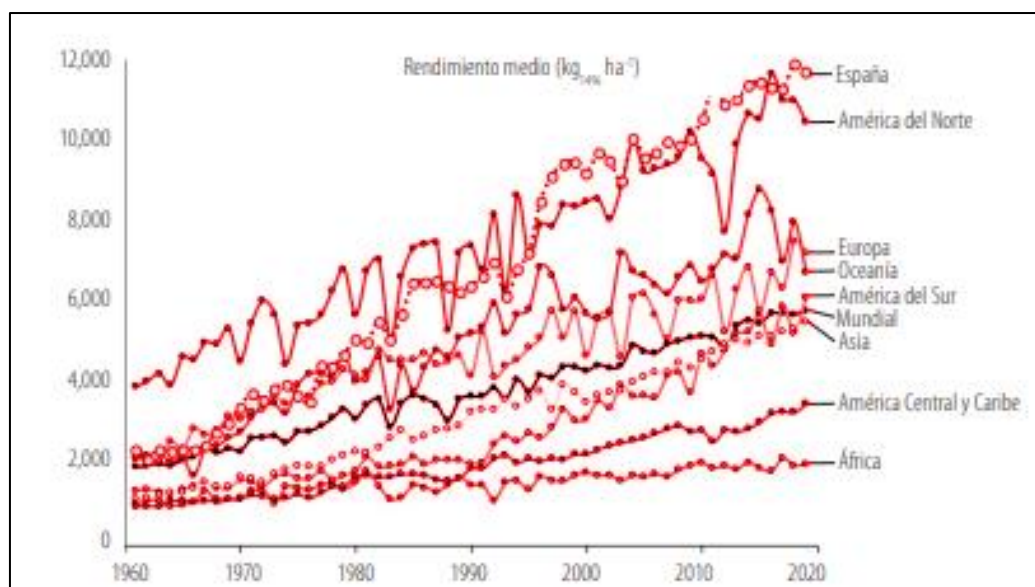


Figura 7: Comparación de rendimientos del maíz en España en relación con otros ámbitos geográficos. Periodo 1960-2020. **Fuente:** Gabriel et al. (2022)

Respecto a España en la gráfica anterior podemos observar la siguiente evolución:

-Desde 1900 a 1960, los rendimientos medios del maíz no sufrieron variaciones importantes más allá de las fluctuaciones debidas al clima.

-En 1960, los rendimientos obtenidos en España fueron ya muy similares a los obtenidos de media mundial (~2.000 kg de grano al 14% por ha), en la misma línea de los kilogramos obtenidos de media en Europa o en América del Sur, y muy por debajo de los ~4.000 kg obtenidos en América del Norte.

-Durante los siguientes 20 años, el aumento en rendimiento fue similar en estas 4 regiones (América del Norte y del Sur, Europa y España). Este incremento fue debido a la mejora de productos fertilizantes y fitosanitarios, así como por la aparición de los nuevos híbridos en el campo. Por ejemplo, en España, se pasó de solo un 45% de la superficie de maíz sembrada con semilla híbrida en 1964 a un 80% en 1984, y hasta un 98% en 1998.

-A partir de 1980, la producción en España creció a un ritmo acelerado, mayor que el resto del mundo, sobre todo entre 1990 y 1995. Estos grandes aumentos vinieron de la mano de la generalización del cultivo de maíz en regadío. Analizando los datos de superficie de maíz regada en 1964, se puede ver como solo el 40% de la superficie cultivada con maíz tenía riego. Sin embargo, en 1984 ya estaba regada el 70% de la superficie, hasta que, en 1998, coincidiendo con la gran tasa de aumento observada en los rendimientos, ya se alcanzaba el 92%.

La figura 8 detalla la evolución de la superficie cultivada de maíz en España (1900-2020).

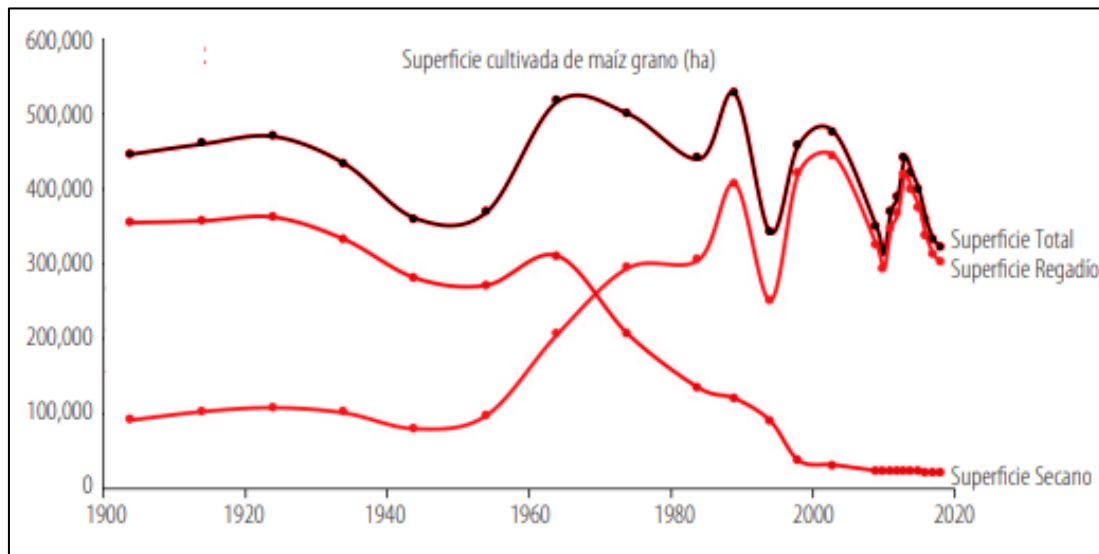


Figura 8: evolución de la superficie cultivada de maíz en España (1900-2020). **Fuente:** Gabriel et al. (2022)

La figura 9 detalla la evolución de los rendimientos de maíz en España (1900-2020)

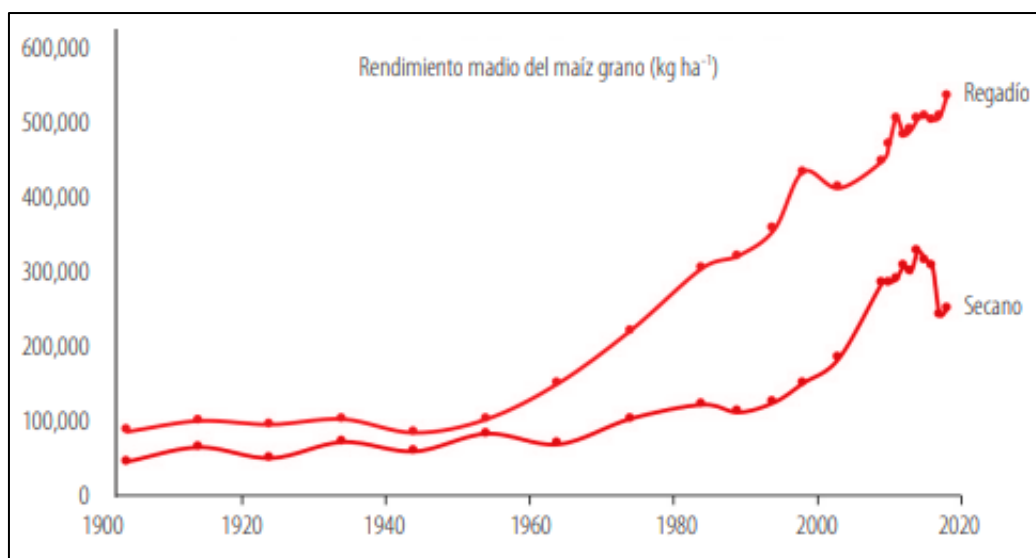


Figura 9: Evolución de los rendimientos de maíz en España (1900-2020). **Fuente:** Gabriel et al. (2022)

Solo entre Huesca y León se concentra un tercio de la superficie total cultivada en España (si se añaden las de Lérida, representan casi la mitad). En cualquier caso, la mayor parte de la producción de maíz se concentra entre las regiones húmedas del norte y en los regadíos del centro y del valle del Ebro; en general las regiones situadas en el este y el sur de España (el arco mediterráneo) son testimoniales en cuanto a la superficie destinada al cultivo del maíz, ya que en estas zonas se suele destinar el agua de riego a cultivos de mayor rentabilidad económica como las frutas y hortalizas.

La figura 10 detalla la evolución de los precios de venta del maíz en España (campañas 2010/11 a 2024/25).

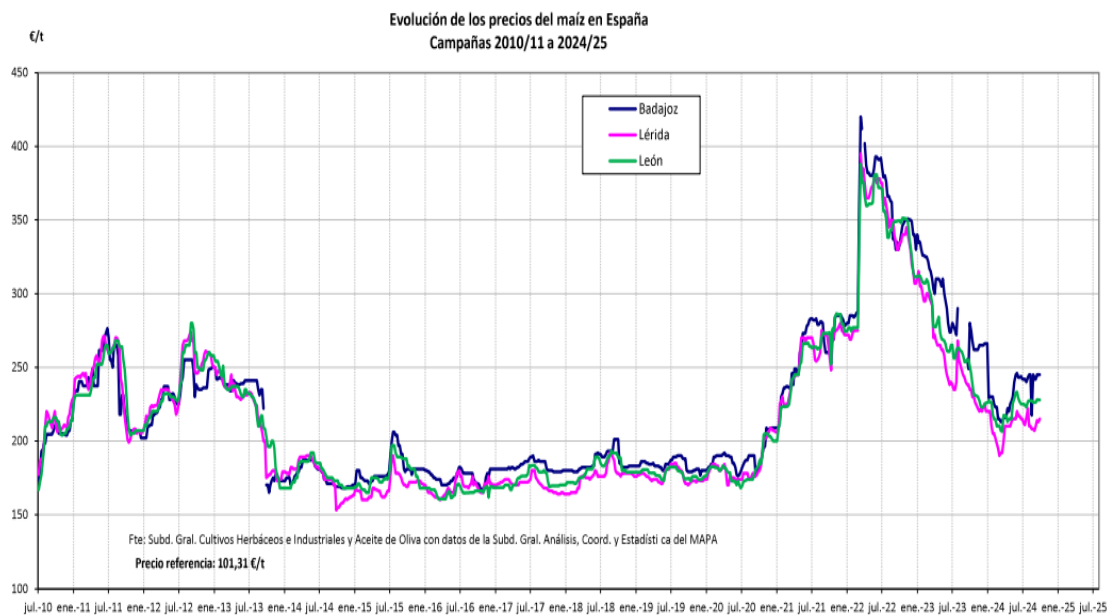


Figura 10: evolución de los precios de venta del maíz en España (campañas 2010/11 a 2024/25). **Fuente:** MAPA (s.f. a)

La figura 11 detalla las variaciones porcentuales sobre la última cotización.

	MUNDIALES						UNIÓN EUROPEA			ESPAÑA		
	Maíz USA Gulf 3YC	Maíz Argentina (Upriver)	Maíz Brasil (Paraná)	Ucrania	Sorgo Gulf (Mississippi)	Sorgo Argentina (Up River)	Francia (Burdeos)	Italia (Bolonja)	Portugal (Llaoos)	Badajoz	Lérida	León
Última cotización €/t	192	185	193	192	221	154	209	224	227	245	215	228
% s/inicio campaña	↑ +14	↑ +11	↑ +12	↑ +11	↑ +2	↓ -21	↓ -2	↑ +2	↑ +7	↑ +1	↑ +1	↑ +1
% s/mes anterior	↑ +14	↑ +5	↑ +5	↑ +7	↓ -3	↓ -6	↑ +3	↑ +2	↑ +1	↑ +1	↑ +4	↑ +1
% s/semana anterior	↑ +4	↑ +6	↑ +5	↑ +2	↑ +4	↓ -2	↑ +3	↑ +0	↑ +3	↑ +0	↑ +1	↑ +0
% s/año anterior	↑ +4	↓ -21	↓ -10	n/c	↓ -14	↓ -44	↑ +1	↑ +3	↓ -5	↓ -13	↓ -9	↓ -9

Figura 11: Variaciones porcentuales sobre la última cotización. **Fuente:** MAPA (s.f. a)

Gabriel et al. (2022) analizan las indicaciones sobre los diferentes factores que inciden en la producción del maíz: agua, nutrientes y semillas.

Sobre el manejo del agua los autores indican que, como el agua es uno de los factores limitantes para la producción de maíz, cuanto más eficiente sea el sistema de riego (tanto en la forma de aplicar el agua como en el lugar y los momentos en los que se aplica) mayor es el potencial para regar más superficie. Por otro lado, está la opción de evitar que el agua que ya existe en el suelo se pierda. Una parte importante del agua del suelo se pierde por evaporación directa, sin ningún tipo de efecto positivo para el cultivo, sobre todo durante las fases en las que el maíz aún no cubre el suelo; por tanto, contar con acolchados artificiales o vegetales que eviten esta evaporación directa (o que incluso protejan del viento y disminuyan la temperatura del suelo) pueden marcar la diferencia entre unos rendimientos económicamente sostenibles o no. Otra parte importante de las pérdidas de agua de los suelos se producen por drenaje y/o escorrentía por lo que se busca ajustar el riego para evitar estos eventos de drenaje y el lixiviado de nutrientes asociado a él. Otra forma de mejorar la disponibilidad de agua sería utilizando la estructura natural del suelo para aumentar la capacidad de retención de agua; para ello, técnicas como el no laboreo, potenciar el desarrollo de raíces todo el año (mediante el empleo de rotaciones y cubiertas vegetales) y el aumento de la materia orgánica del suelo, son herramientas clave.

Muy ligado al manejo del agua se encuentra el manejo de los nutrientes. Los nutrientes que el maíz necesita provienen principalmente de dos fuentes: los nutrientes que se aplican externamente en forma de fertilizantes orgánicos o inorgánicos y los nutrientes que el propio suelo suministra de manera natural. Sobre el manejo de la fertilización los autores indican que, ya que el aporte de fertilizantes externos permite suministrar al cultivo aquellos nutrientes que el suelo no es capaz de suministrar en cantidad suficiente para el correcto desarrollo del cultivo, es importante conocer bien qué y cuántos nutrientes aporta el suelo y qué nutrientes (macro y micro) son los más limitantes. El objetivo es evitar sobre-fertilizaciones que reducirían drásticamente la sostenibilidad económica y aumentarían el impacto medioambiental de una explotación.

La aplicación de un fertilizante adicional debe cumplir el principio de las 4 R's (por sus siglas en inglés) para que sea eficiente: cantidad correcta, momento correcto, fertilizante correcto y lugar correcto. Los autores señalan que, en el caso de España, no hay datos específicos del consumo de fertilizantes asociados únicamente a la producción de maíz.

Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura (España, periodo 2003-2018).

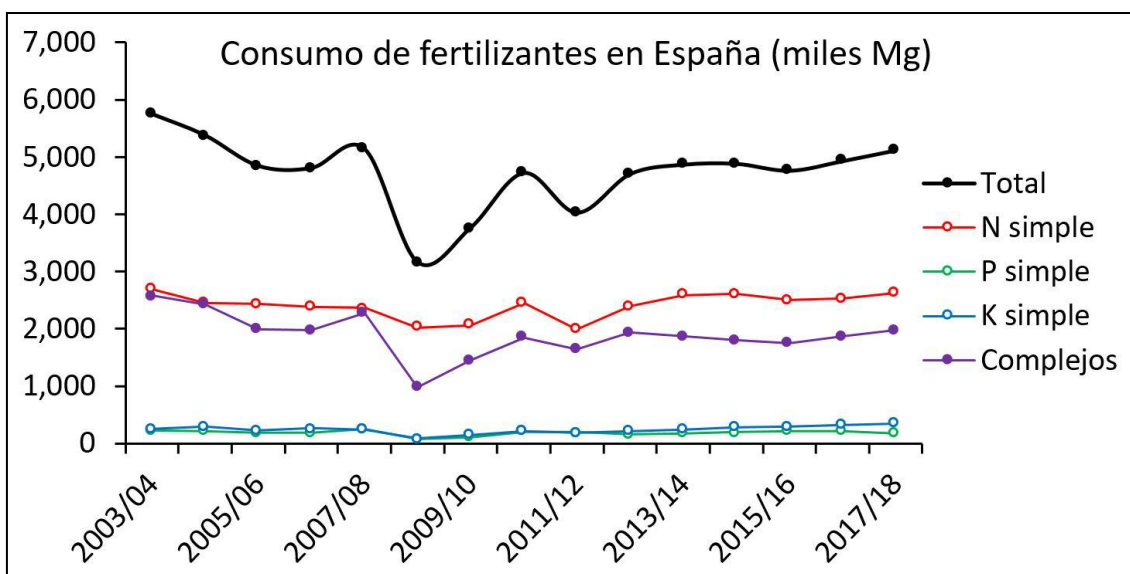


Figura 12: Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura. (España, periodo 2003-2018).

Fuente: Gabriel et al. (2022) en base a los datos de ANFFE (2021)

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes (ANFFE, 2021), ni el consumo total de fertilizantes ni la distribución del consumo por tipos de fertilizantes han sufrido grandes cambios en las últimas dos décadas. Afirman que las mayores variaciones interanuales se deben más al precio puntual de los propios fertilizantes que a cambios reales en las prácticas culturales de los agricultores.

Aunque, como se ha dicho, faltan datos específicos relacionados con el uso de tipos de fertilizantes en maíz, cabe hacer una referencia a la importancia que pueden tener en un futuro bastante inmediato los fertilizantes orgánicos. Más en un territorio, como es el caso de Aragón donde durante los últimos veinte años el sector ganadero, clave en el desarrollo económico de nuestra Comunidad Autónoma, ha incrementado el número de explotaciones ganaderas y ha modificado el sistema productivo pasando de un modelo extensivo a un modelo intensivo, lo que ha supuesto un notable incremento de censo ganadero y paralelamente de subproductos generados, destacando el estiércol (fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes). De hecho, el Gobierno de Aragón tiene regulada la gestión de estiércoles (mediante el Decreto 53/2019, de 26 de marzo) y entre sus objetivos se contempla realizar a partir de ellos una correcta fertilización de las parcelas agrícolas.

Un estudio de la Universidad pública de Navarra (Apesteguía et al., 2017) evaluó el rendimiento del maíz tras la aplicación de diferentes abonos orgánicos con el fin de calcular la cantidad de nitrógeno mineral que puede ser sustituida con la aplicación de abonos orgánicos (coeficiente de equivalencia del nitrógeno). El estudio concluye que el aporte de abono orgánico cubre, en la mayoría de los casos, las necesidades en fósforo y potasio del cultivo de maíz pero no las de nitrógeno por lo que habría que complementar con un abono nitrogenado mineral hasta completar las necesidades del cultivo.

Los Balances Nacionales de N y P que elabora el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación –datos de 2017– (MAPA, 2020) estiman unas pérdidas anuales medias de 83,9 kg N por ha, de

las cuales 25,5 son en forma gaseosa y 58,4 en forma de lixiviado o de escorrentía. En cuanto al P, las pérdidas anuales se estiman en 3,8 kg P/ha, sin contabilizar el P que queda inmovilizado en el suelo. Estos datos indican que, considerando el N y el P extraído por el maíz en el grano y la paja (en torno a los 14,89 kg N y 4,36 kg P por Mg grano al 14% y a los 1,00 kg N y 0.29 kg P por Mg de paja seca), la eficiencia en el uso de los fertilizantes puede aumentar aún enormemente.

Respecto a las semillas se señala que desde los años 60, existe una mejora muy importante en el potencial de rendimiento de los distintos híbridos frente a variedades tradicionales. Estos híbridos de calidad aseguran mejores tasas de germinación, lo que permite ajustar mejor la dosis de siembra. Por otro lado, garantizan una homogeneidad mayor entre plantas, lo que facilita el manejo integral de la parcela a la hora de realizar operaciones en campo como la aplicación de fitosanitarios, tratamientos mecánicos del suelo, o incluso, la cosecha. También se incluyen en los planes de mejora la mayor resistencia del cultivo frente a estreses bióticos (plagas y enfermedades) y abióticos (déficit o exceso hídrico y temperaturas demasiado altas o bajas). Las nuevas variedades aseguran mejores tasas de translocación de nutrientes de la planta al grano, así como un mayor tamaño de las mazorcas, con más granos y de mayor tamaño.

Cabe destacar también el potencial de las semillas transgénicas, de gran uso a nivel mundial, o incluso las variedades mejoradas por las novedosas técnicas de edición génica. Pero, en cualquier caso, en Europa actualmente no están permitidas, a excepción de algunas variedades del tipo Bt (con genes procedentes de *Bacillus thuringiensis* para la lucha contra de la plaga del taladro), estando su uso potencial muy limitado a regiones muy concretas de España (y otras regiones de Europa), como el Valle del Ebro, por la incidencia de esta plaga en esta zona.

Agrupando las técnicas anteriores se encuentra la agricultura de precisión, ya que trata de aplicar todos esos principios de eficiencia en el uso de agua, nutrientes, fitosanitarios y semilla, pero reduciendo la aplicación de estas técnicas a la escala de metros cuadrados en vez de a la escala de finca. Cada parcela o finca tiene variaciones intrínsecas en las propiedades del suelo, la fertilidad, el relieve, el microclima, entre otros, que hacen que los potenciales y las necesidades de cada zona sean distintas. Si se tiene la capacidad de identificar esa variabilidad, junto con la maquinaria adecuada, se puede ajustar la dosis de semilla, la dosis de fertilizante, el riego, los tratamientos fitosanitarios, etcétera, a cada una de esas zonas en vez de aplicar un valor medio para toda la parcela.

Sobre el futuro del maíz en España, Gabriel et al. (2022) señalan dos principales factores limitantes para el aumento de la superficie cultivada de maíz y su rendimiento: la disponibilidad de agua y la rentabilidad económica. Atendiendo al problema de la limitación de agua en una situación de cambio climático, donde el agua es cada vez un elemento más escaso para todos los ámbitos de la vida. En estas circunstancias, los cultivos con altas demandas de riego requieren ser muy eficientes a nivel económico y medioambiental.

Otra fuente de interés para la aproximación a un análisis económico global de la producción de maíz en España y avanzar en la comparativa con otras zonas, es el informe del Ministerio de

Agricultura, Pesca y Alimentación donde se analizan los costes del modelo de producción de la agricultura española en referencia a la de la UE y terceros países (MAPA, 2019).

En este informe se seleccionan varios cultivos (trigo blando, cebada, girasol, maíz y guisante; tanto en secano como en regadío) conforme a diferentes modelos de explotaciones típicas españolas y se presenta la estructura de sus costes de producción; además se realiza su comparación con una selección de explotaciones de otros países, tanto de la Unión Europea como de terceros países con relevancia en la producción de los cultivos analizados.

En este estudio se analizan los costes asociados a cada modelo de producción y la repercusión de los condicionantes del modelo de producción en los costes de diferentes sistemas productivos de España y se incluye la comparativa con los sistemas y los costes de otros países.

Como referencia se han utilizado los datos pertenecientes a la base de datos de la Red Cultivos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y el apoyo de Agri benchmark crops (organización sin ánimo de lucro de expertos en agricultura, diseñada para la comparación de diferentes sistemas de producción de cultivos a escala mundial) correspondientes al ejercicio económico del año 2017.

Para el análisis de las diferencias entre los costes asociados a los distintos sistemas productivos, en esta metodología se analizan los costes totales (diferenciando los costes efectivos, no efectivos y costes de oportunidad). También se analizan aspectos relacionados con la producción, diferentes insumos, tierra, mano de obra y operaciones, realizando un análisis agrupando distintos niveles de costes:

a) Costes totales.

b) Costes de producción: para analizar los costes de producción, se han considerado los costes directos, donde se desagregan los costes de regadío en caso de que existan, los costes de operaciones y los costes de la tierra tanto arrendada como en propiedad.

c) Insumos: Para representar los costes que suponen los insumos, se han tenido en cuenta los costes de las semillas, los fertilizantes y pesticidas (herbicidas, fungicidas, insecticidas y otros).

d) Operaciones: Para representar los costes que suponen las operaciones, se han considerado los costes de la mano de obra (familiar y asalariada), de los trabajos contratados, los costes de la maquinaria (mantenimiento y amortizaciones) y el consumo de energía.

La figura 13 detalla los costes de producción según metodología Agri benchmark.

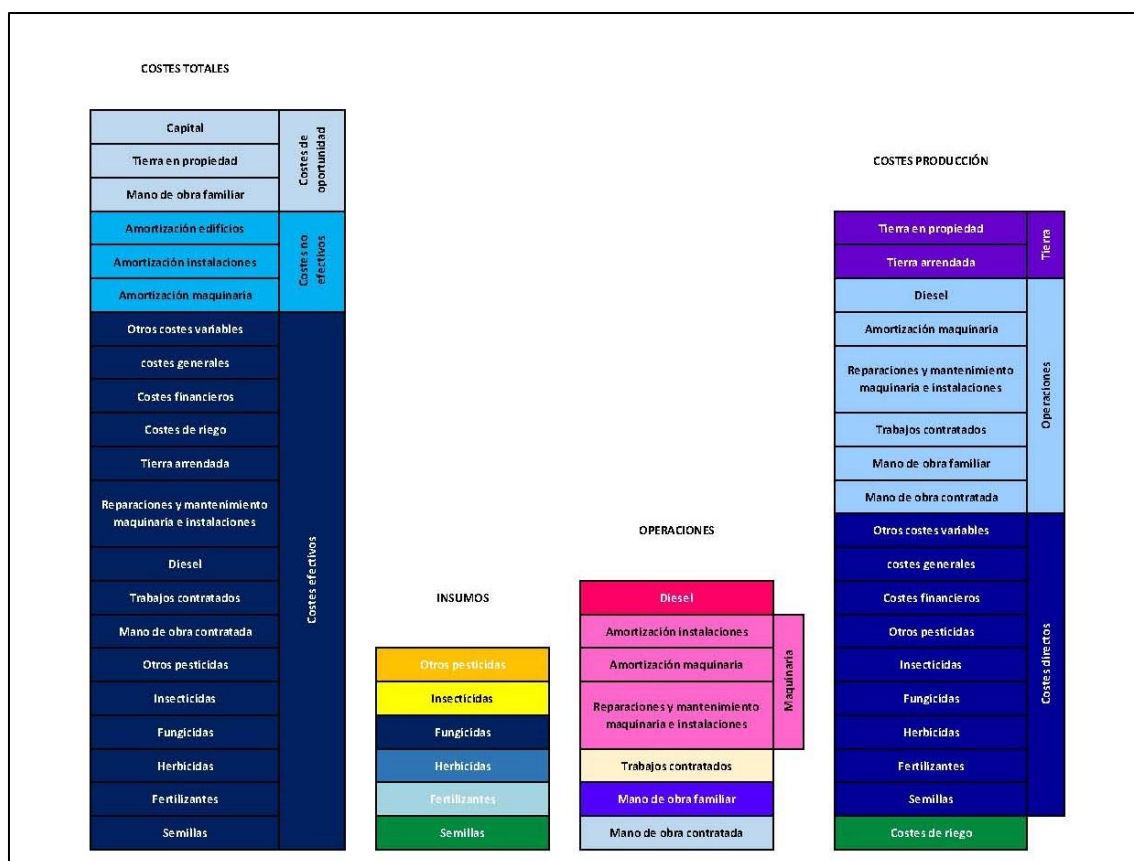


Figura 13: Costes de producción según metodología Agribenchmark. **Fuente:** MAPA (2019), Anejo 1.

Respecto del maíz entresacamos algunas conclusiones de este informe (MAPA, 2019, pp. 27-34):

-Los rendimientos de las explotaciones típicas españolas de producción de maíz grano en regadío durante 2017 fueron altos (>11 t/ha), en la línea de algunos modelos de Canadá, Francia, Rusia, USA y Vietnam.

-Los costes directos (incluyendo los costes de regadío) de los modelos españoles superaron los 70 €/t producida, en la misma línea que algunos modelos de República Checa, Hungría, Italia y otro de USA. Los costes directos de la mayoría de las explotaciones típicas internacionales se situaron entre los 30 y 70 €/t producida, mientras que modelos de Argentina, Rusia y Ucrania registraron costes inferiores. En relación con los costes de regadío. En España, este coste supuso entre 24 y 31 €/t producida, mientras que, en Francia, Italia o Vietnam, supuso entre 7 y 13 €/t producida. En cuanto a los costes que suponen los insumos (semillas, los fertilizantes y pesticidas) los modelos españoles registraron costes en la horquilla de 30 y 50 €/t producida, en la línea de la mayoría de países.

Un estudio monográfico sobre los aspectos económicos (también ambientales) relacionados con el cultivo del maíz en España en los últimos 30 años (Fundación Instituto Cerdà, 2021) realiza un exhaustivo análisis de este cultivo. El informe ha sido elaborado por el Instituto Cerdà para la Asociación Nacional de Obtentores Vegetales (Anove), que agrupa las empresas dedicadas a la investigación, desarrollo y explotación de nuevas variedades vegetales, por eso sus análisis están enfocados hacia la valoración y cuantificación de las aportaciones económicas, sociales y medioambientales que tiene la mejora vegetal del maíz en España (nuevas variedades de

semillas y plantas). Hay que tener en cuenta que desde los años 90 se han registrado más de 1000 nuevas variedades de maíz en la Unión Europea, y ello como resultado de los avances científicos y la inversión en I+D promovida en buena parte por el sector obtentor.

Para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos resultantes de la innovación vegetal en el estudio se contemplan como hipótesis dos escenarios: el escenario 1, más conservador, donde se considera que el 33% de las mejoras cuantificables se deben a este factor; y el escenario 2, que contempla una incidencia de más del 50%, considerando el promedio europeo. El informe repasa estudios anteriores de Estados Unidos y Canadá, la Unión Europea y otras zonas para establecer sus hipótesis. Hace hincapié en que el escenario 1 coincide con estimaciones anteriores del Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (IRTA) adscrito al Departamento de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Generalitat de Catalunya que atribuía a la introducción de nuevas variedades de maíz aproximadamente el 33% del aumento de los rendimientos de los últimos 30 años en Cataluña (IRTA, 2007).

El informe indica que, aunque no existen prácticamente estudios a nivel español relativos a la aportación de la mejora vegetal al incremento de los rendimientos de los cultivos, la coincidencia con los estudios del IRTA permiten sacar algunas conclusiones: el incremento de rendimientos en el maíz se explicaría entre por lo menos en un 33% por la actividad obtentora en el escenario conservador (Escenario 1 de los contemplados en el informe del Instituto Cerdà). Esta contribución podría ser, asimismo mucho más elevada, dado que las evidencias existentes en otros países europeos cifran la aportación de la mejora vegetal al incremento de los rendimientos de los últimos años en un 50% en el escenario promedio europeo (Escenario 2 de dicho informe)

El estudio de la fundación Instituto Cerdà (2021) también establece unas conclusiones de interés para la aproximación al estudio económico del maíz en España. Recoge datos de los principales insumos utilizados para el cultivo del maíz: fertilizantes, fitosanitarios, consumo hídrico y consumo de energía necesario para la producción.

El aumento registrado en términos de rendimiento ligado a la innovación (objeto de esta investigación del Instituto Cerdà) puede atribuirse a distintos factores:

a) Los avances en términos de selección genética, y por lo tanto a incrementos del potencial de rendimiento per se de las nuevas variedades, gracias una mejor adaptación a condiciones de estrés, a la calidad del grano o a otros hitos de los programas de mejora genética.

b) La mejora de los procesos y técnicas agrarias, en términos de fertilización, control de plagas/malas hierbas, trabajos del suelo o manejo del cultivo, entre otros.

c) La interacción de estos dos factores.

Aunque no resulta sencillo separar el efecto de estos factores, el informe concluye que la introducción de nuevas variedades vegetales, unida a una mejora en las tecnologías y el manejo del cultivo, ha incrementado la productividad en maíz en valores superiores al 320% en los últimos 50 años, y al 85% en los últimos 30. En 1965, la productividad media del maíz en España se situaba en 2,39 toneladas por hectárea, mientras que en 2018 se alcanzaron 11,92 toneladas

por hectárea. Si se considera el escenario conservador, se estima que el incremento de la productividad del maíz ha supuesto una producción acumulada adicional entre 1990 y 2018 de 11,3 millones de toneladas, un 10,5% de la producción en este periodo (la aportación promedio anual sería de 404.089 toneladas de maíz adicionales gracias a la mejora vegetal). Si se toma en cuenta el segundo escenario de los contemplados en el estudio, el incremento de productividad del maíz habría supuesto una producción acumulada adicional entre 1990 y 2018 de 17,1 millones de toneladas, un 16% de la producción en este periodo (la aportación anual sería de 612.257 toneladas de maíz adicionales gracias a la mejora vegetal). Según este estudio, la mejora vegetal del maíz ha permitido incrementar el valor agregado bruto (VAB) del cultivo del maíz en España, durante el periodo comprendido entre 1990 y 2017, en 2.742 millones de euros, lo que significa una aportación al VAB total anual en promedio de 101,6 millones de euros/año, siendo más elevada durante los últimos años del periodo.

1.4.2. Análisis económico de la rotación del maíz con otros cultivos en el valle del Ebro

Se analizan diferentes estudios que han demostrado que la rotación del maíz con otros cultivos aumenta los rendimientos, centrados específicamente en el valle del Ebro (regadíes de Huesca y Lérida fundamentalmente), aunque se apoyan en resultados experimentales en otros ámbitos geográficos que avalan sus conclusiones. Entre las posibles soluciones para aumentar la rentabilidad de la explotación agrícola estos estudios se centran en la intensificación del sistema de cultivo mediante el cultivo de dos cosechas en un solo año (doble cultivo).

En el Valle del Ebro la rotación anual del maíz con cereal de invierno o con leguminosas ha superado en los últimos años al monocultivo del maíz como podemos apreciar en el gráfico siguiente referido a las tres provincias aragonesas (Figura 14).

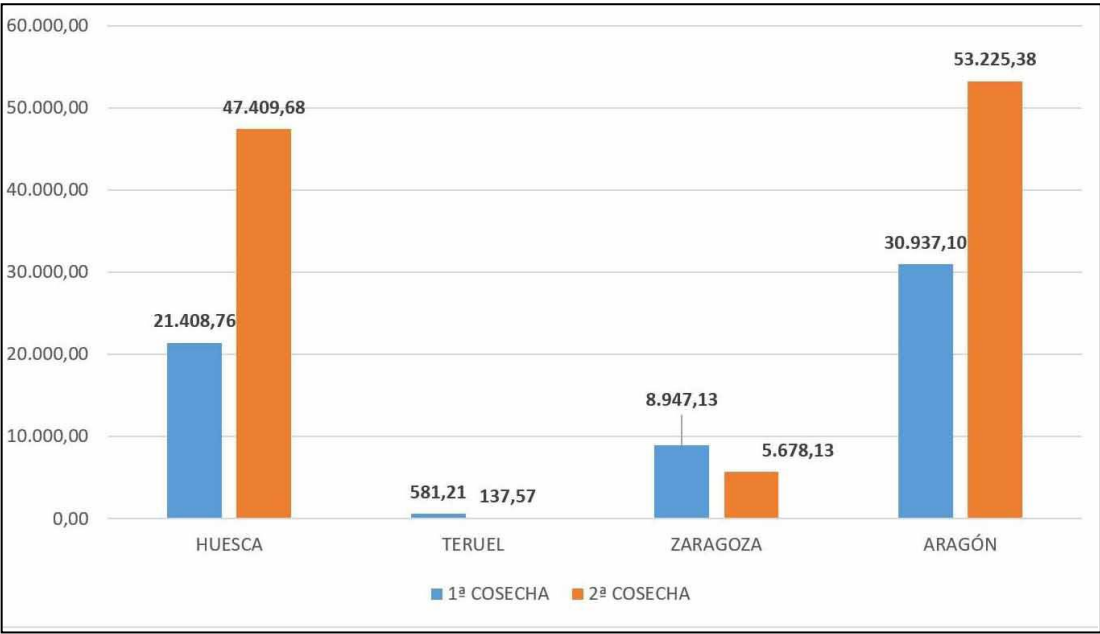


Figura 14: superficie de maíz en Aragón (ha) por provincias declarado como 1º y 2º cultivo (año 2024).
Fuente: Gutiérrez et al. (2025) a partir de datos de SINGEAR (Sistema Informático de Gestión Estadística Agraria de Aragón) Gobierno de Aragón, enero 2025.

Se entiende por maíz en segunda cosecha una rotación intensiva de doble cultivo anual en la que el maíz sigue a los cultivos de cebada, guisantes, forrajes u hortalizas, principalmente.

Según encuestas realizadas a productores y cooperativas, en un 29,5% de la superficie en los regadíos de las provincias de Huesca y Lérida ya se practicaba el doble cultivo maíz-cebada hace tres décadas (Salomó et al., 2016).

La alternativa de doble cultivo maíz-cebada puede incrementar el margen bruto de las explotaciones entre un 13-22% respecto al monocultivo del maíz (Gil, 2013). En este estudio se analizaban los aspectos económicos y ambientales de la rotación cebada-maíz rastrojero con fertilización de purín, riego por aspersión, mínimo laboreo y siembra directa y se comparan con el cultivo de maíz de ciclo largo (un solo cultivo anual). El estudio se apoyaba en análisis experimentales en regadíos del valle del Ebro realizados entre 2005 y 2012. El criterio de comparación para valorar la ventaja económica de la rotación de cebada con maíz rastrojero fue la diferencia, en márgenes anuales y en porcentaje, respecto al margen de maíz de ciclo largo (un solo cultivo anual) en la serie de ocho años (2005 a 2012). Todos años fue ventajosa la rotación-cebada maíz rastrojero en más de un 13 % (valor mínimo de la serie); en cuatro de los ocho años lo fue en más del 22%.

Frente a la necesidad de compatibilizar la rentabilidad económica y la protección del medio ambiente, Isla y Quílez (2006) ya planteaban la posibilidad de reducir los gastos de cultivo para incrementar los rendimientos buscando, además, alternativas más sostenibles. Señalaban el fertilizante nitrogenado como uno de los gastos más importantes del cultivo del maíz (con los precios de aquel momento, el gasto de los fertilizantes nitrogenados podía suponer en torno a 150-180 euros por hectárea). Los autores de este estudio decían que habría que replantear la tendencia a sobre fertilizar con nitrógeno el cultivo del maíz.

2. JUSTIFICACION

El presente trabajo Fin de Máster se realiza en el contexto de un proyecto de investigación desarrollado en el CITA (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón) con la Escuela Politécnica Superior de Huesca.

En las últimas décadas, la mayoría de los agro-sistemas se han sometido a un proceso de simplificación y especialización que, combinado con un uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y otros insumos, ha permitido aumentar los rendimientos.

En el Valle del Ebro, el monocultivo de maíz en regadío es uno de los sistemas más demandantes de fertilizantes nitrogenados. Ello condiciona la necesidad de reducir las emisiones de gases y, al mismo tiempo, aumentar los rendimientos del cultivo para satisfacer las demandas del mercado y la rentabilidad de la actividad agraria. Adicionalmente, los sistemas de monocultivo están disminuyendo la diversidad de cultivos.

La diversificación de cultivos en los sistemas de monocultivo de maíz en el Valle del Ebro puede lograrse mediante la sustitución del barbecho invernal por cultivos de cobertura, pero también mediante el uso del doble cultivo, que implica la introducción de un segundo cultivo comercial en la misma temporada de crecimiento. Además, ambas prácticas están incluidas dentro de los Eco-regímenes de la nueva PAC 2023-2027 que implica la puesta en marcha de prácticas medioambientales que promuevan la mitigación de los efectos adversos de la especialización e intensificación de la agricultura en zonas altamente productivas.

Los beneficios ambientales de estos manejos han sido objeto de análisis y el interés de este trabajo está en relación con la valoración económica de estas alternativas de manejo. El análisis detallado de estos manejos, teniendo en cuenta todos los costes implicados, no se ha realizado hasta el momento por lo que la justificación de este trabajo es completar el balance económico de las 4 alternativas de manejo teniendo en cuenta tanto los costes del momento actual como posibles fluctuaciones.

3. OBJETIVOS

Los objetivos generales de este Trabajo Fin de Máster (TFM) son:

- Cuantificar la rentabilidad de las diferentes alternativas al monocultivo de maíz de regadío del Valle del Ebro.
- Realizar un análisis de sensibilidad para analizar la rentabilidad frente a variaciones en los precios tanto de los inputs como de los outputs del sistema.

Como objetivos específicos se contemplan:

- Analizar los costes de cada modalidad.
- Determinar el manejo de cultivo más adecuado para cada una de ellas (monocultivo frente a sistemas diversificados).
- Cuantificar la eficiencia económica del uso de fertilizantes nitrogenados.

Por otro lado, se pretende el logro de algunos de los objetivos citados en la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible, creados por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015. En concreto:

ODS 2: lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.

Los principios específicos del ODS 2 asociados a este trabajo son los siguientes:

- . Optimización de la producción cuantificando la rentabilidad de las alternativas al monocultivo del maíz.
- . Intensificación sostenible de los sistemas de cultivo del maíz, determinando los manejos más adecuados para cada alternativa planteada.

ODS 12: garantizar modalidades de consumo y producción sostenible.

Los principios específicos del ODS 12 asociados a este trabajo son los siguientes:

- . Frenar una sobreexplotación de recursos analizando técnicamente las alternativas al cultivo intensivo del maíz.
- . Potenciar prácticas con el menor impacto negativo sobre la biodiversidad mediante el empleo de cultivos mejorantes como las leguminosas tanto en rotación con maíz de ciclo corto como de ciclo largo.

ODS 13: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Los principios específicos del ODS 13 asociados a este trabajo son los siguientes:

- . Minimizar el efecto de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero cuantificando la eficiencia del uso de fertilizantes nitrogenados en cada alternativa planteada.

- . Disminución de los requerimientos energéticos de los inputs utilizados en cada modalidad de cultivo.

ODS 15: promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación y detener y revertir la degradación de las tierras.

Los principios específicos del ODS 15 asociados a este trabajo son los siguientes:

- . Reducir la degradación de los suelos por una sobreexplotación asociada a los monocultivos.

- . Contribuir a una mayor riqueza biológica de los suelos mediante el uso de especies vegetales capaces de fijar nitrógeno atmosférico en el suelo.

4. MATERIALES Y METODOS.

4.1. Descripción del ensayo experimental

Este trabajo se realiza en el contexto de un proyecto de investigación desarrollado en el CITA (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón) con la Escuela Politécnica Superior de Huesca cuyo objetivo era evaluar el efecto de la intensificación en agro sistemas de regadío del valle del Ebro sobre las emisiones de N_2O , centrado en el cultivo del maíz y cuya descripción detallada se encuentra en Zugasti-López et al.(2024).

Frente al monocultivo del maíz en los regadíos del Valle del Ebro, la diversificación contempla la sustitución del barbecho invernal por cultivos de cobertura (como la veza), pero también el uso del doble cultivo, que implica la introducción de un segundo cultivo comercial en la misma temporada de crecimiento. Ambas prácticas están incluidas dentro de los Eco-regímenes de la nueva PAC 2023-2027.

El experimento se llevó en la Estación Experimental Aula Dei situada en el Valle del Ebro, en Montañana (Zaragoza) a 221 m altitud. Esta zona tiene un clima mediterráneo continental, con una temperatura media anual de 14,1° C, 298 mm de precipitación y una evapotranspiración (ET_o) del cultivo de referencia de hierba de 1243 mm. El suelo es franco arcilloso clasificado como Typic Xerofluvent (Soil Survey Staff, 2014).

En el proyecto se ensayaron cuatro sistemas de cultivo de maíz, dos de doble cultivo y dos de monocultivo:

- Monocultivo de maíz de ciclo largo después de un periodo de barbecho invernal tradicional (B-MCL)
- Monocultivo de maíz de ciclo largo después de un cultivo leguminoso de cobertura invernal de veza (CC-MCL)
- Doble cultivo de rotación anual de maíz de ciclo corto tras un cereal de invierno, cebada (C-MCC)
- Doble cultivo de rotación anual del maíz de ciclo corto tras una leguminosa, guisante (G-MCC)

Cada parcela experimental se delimitó con cuatro aspersores (18 × 18 m) en un campo equipado con un sistema de riego por aspersión de configuración sólida. El diseño experimental fue completamente aleatorizado con tres repeticiones por sistema. El cultivo se manejó mediante laboreo convencional.

Los resultados de este proyecto han permitido avanzar cuáles son los beneficios ambientales de estos manejos. El interés del presente trabajo está en relación con la valoración económica de estas cuatro alternativas de manejo. Tal y como se ha señalado en los objetivos, se pretende cuantificar la rentabilidad de las diferentes alternativas al monocultivo de maíz de regadío del Valle del Ebro; también se tratará de analizar la rentabilidad frente a variaciones en los precios tanto de los inputs como de los outputs del sistema mediante un análisis de sensibilidad.

4.2. Tratamientos

La variable dependiente de este trabajo ha sido la rotación realizada (4 tratamientos teniendo como cultivo principal el maíz) durante un periodo de tres años (2019, 2020 y 2021). El primero es el tratamiento barbecho con maíz, el segundo es el tratamiento de cubierta vegetal (veza) con maíz, el tercero es cebada con maíz y el cuarto guisante en verde con maíz.

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se reflejan todos los inputs aplicados a cada tratamiento en cada año de cultivo: labores con maquinaria, fertilización, fitosanitarios, energía y semillas.

Tabla 4. Inputs aplicados al tratamiento 1: siembra de maíz cada año tras un periodo de barbecho invernal. **Fuente:** Elaboración propia.

Barbecho-Maíz.	Labores realizadas (maquinaria)	Fertilización	Fitosanitarios	Riego (mm) / Energía (kWh)	Semilla
2019	-Rodillo. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora monograno. -Pulverizador hidráulico. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 L. -N32 fertirriego. 82 L.	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego.	-mm recibidos: 634. KWH: 1284	89500 semillas. Maíz transgénico
2020	-Subsolador. -Grada de discos. -Rodillo. -Abonadora centrífuga. -Sembradora monograno. -Pulverizador hidráulico. -Rotocultor-grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (Picadora).	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego 82 l.	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego	-mm recibidos: 553.6. KWH: 1122.	89500 semillas. Maíz transgénico.
2021	-Grada de discos. -Subsolador -Rodillo -Abonadora centrífuga -Rotocultor-Grada accionada. -Sembradora monograno. -Pulverizador hidráulico. -Cosechadora de maíz. -Otros (Picadora)	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 82 l.	-Belem. Riego. -Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico.	-mm recibidos: 552.5. KWH: 1119.	-89500 semillas. Maíz transgénico.

Tabla 5: Inputs aplicados al tratamiento 2: cultivo de maíz cada año con cubierta vegetal de veza durante el invierno. **Fuente:** Elaboración propia.

Cubierta vegetal	Labores realizadas (maquinaria)	Fertilización	Fitosanitarios	Precio energía	Precio semilla
------------------	---------------------------------	---------------	----------------	----------------	----------------

(veza) - Maíz					
2019	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 32 l.	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego.	-mm recibidos: 672. KWH: 1361.	-89500 semillas. Maíz transgénico -100 kg semillas. Veza sativa.
2020	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 32 l.	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego	-mm recibidos: 563. KWH: 1141.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -100 kg semillas. Veza sativa.
2021	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15 abonadora. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 32 l.	-Belem. Riego. -Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico.	-mm recibidos: 591.8. KWH: 1199.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -100 kg semillas. Veza sativa.

Tabla 6: Inputs aplicados al tratamiento 3: cultivo de maíz de segunda cosecha tras un cultivo de cebada en invierno. **Fuente:** Elaboración propia.

Cebada - Maíz	Labores realizadas (maquinaria)	Fertilización	Fitosanitarios	Precio energía	Precio semilla
2019	-Abonadora centrífuga. -Sembradora de siembra directa. -Pulverizador hidráulico. -Abonadora centrífuga. -Pulverizador hidráulico. -Cosechadora de cereal. -Rotocultor-grada accionada. -Grada de discos. -Sembradora monograno. -Cosechadora de maíz-	-NPK 8-15-15. 500 kg. -NAC 27%. 400 kg. -NPK 8-15-15. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 100 l	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego.	-mm recibidos: 672. KWH: 1361.	-89500 semillas. Maíz transgénico -200 kg semillas. Cebada.

2020	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15. 500 kg. -NAC 27%. 400 kg. -NPK 8-15-15. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 100 l.	-Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico. -Karate zeon. Riego	-mm recibidos: 563. KWH: 1141.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -200 kg semillas. Cebada.
2021	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK 8-15-15. 500 kg. -NAC 27%. 400 kg. -NPK 8-15-15. 850 kg. -N32 fertirriego. 100 l. -N32 fertirriego. 100 l.	-Belem. Riego. -Pirextra. Pulverizador hidráulico. -Elumis. Pulverizador hidráulico.	-mm recibidos: 591.8. KWH: 1199.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -200 kg semillas. Cebada.

Tabla 7: Inputs aplicados al tratamiento 3: cultivo de maíz de segunda cosecha tras un cultivo de guisante en invierno. **Fuente:** Elaboración propia.

Guisante - Maíz	Labores realizadas (maquinaria)	Fertilización	Fitosanitarios	Precio energía	Precio semilla
2019	-Abonadora centrífuga. -Sembradora de siembra directa. -Pulverizador hidráulico. -Abonadora centrífuga. -Pulverizador hidráulico. -Cosechadora de cereal. -Rotocultor-grada accionada. -Grada de discos. -Sembradora monograno. -Cosechadora de maíz-	-NPK. Abonadora centrífuga. 500 kg. -NPK. Abonadora centrífuga. 850 kg. -N32. Fertirrigación. 100 l. -N32. Fertirrigación. 100 l.	-Stomp. Pulverizador hidráulico. -Prosaro. Pulverizador hidráulico. -Cubix. Riego. -Karate Zeon. Riego.	-mm recibidos: 732. KWH: 1483.	-89500 semillas. Maíz transgénico -200 kg semillas. Guisante.

2020	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK. Abonadora centrífuga -NPK. Abonadora centrífuga -N32. Fertirrigación. 100 l. -N32. Fertirrigación. 100 l.	-Stomp. Pulverizador hidráulico. -Prosaro. Pulverizador hidráulico. -Cubix. Riego. -Karate Zeon. Riego.	-mm recibidos: 556.5. KWH: 1127.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -200 kg semillas. Guisante.
2021	-Subsolador. -Grada de discos. -Abonadora centrífuga. -Sembradora chorrillo. -Rodillo. -Pulverizador hidráulico. -Sembradora monograno. -Rotocultor-Grada accionada. -Cosechadora de maíz. -Otros (picadora).	-NPK. Abonadora centrífuga -NPK. Abonadora centrífuga -N32. Fertirrigación. 100 l. -N32. Fertirrigación. 100 l.	-Assistan. Pulverizador hidráulico. -Basagran (bentazona 48%). Pulverizador hidráulico. -Ortiva (azoxistrobin 25%). Pulverizador hidráulico. -Cubix. Pulverizador hidráulico.	-mm recibidos: 646. KWH: 1309.	-89500 semillas. Maíz transgénico. -200 kg semillas. Guisante.

4.3. Precios de los inputs y outputs

Se detallan las fuentes de donde se han obtenido los precios de todos los inputs: combustible, coste de la maquinaria, semillas, fertilizantes, fitosanitarios y energía de aspersión usada para el riego.

4.3.1. Combustible

El Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (s. f.) publica en su web la variación del precio del combustible lo largo del tiempo, para este estudio se ha tomado un valor medio del precio del combustible en cada año de estudio (2019, 2020 y 2021).

4.3.2. Coste de la maquinaria

Para asignar el precio correspondiente a cada apero, se han utilizado las tablas Excel del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, s. f. b). En esta Web se han buscado todos los aperos utilizados en este trabajo. Estas tablas están muy completas y permiten elegir cualquier equipo, por ejemplo, pulverizador de barras suspendido y, para cada uno, se puede seleccionar anchura del apero, capacidad del depósito, peso del apero (vacío), caudal de la bomba, presión del líquido, etc. A partir de todos estos datos, y con el coste del gasóleo al que se ha hecho referencia en el apartado anterior, obtenemos el coste de utilización de cada equipo, tanto en euros/hora como en euros/hectárea. Una vez se ha hecho el cálculo para cada apero, se traslada a una tabla de resultados para poder hacer una cuantificación final para cada labor en los cuatro tratamientos y en los 3 años del ensayo.

4.3.3. Semillas

Para las cuatro semillas utilizadas en los diferentes tratamientos: maíz transgénico, cebada, veza, y guisante se ha obtenido el precio de la Cooperativa Virgen de la Corona de Almudévar (comunicación personal), que nos han proporcionado todos los datos referidos a estas semillas según su catálogo de venta.

4.3.4. Fertilizantes

Respecto al precio de los fertilizantes, los datos proceden de la publicación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación sobre Índices y Precios Pagados Agrarios, que describe los precios de cada fertilizante en cada mes y para cada año, por lo que, en estos tres años de ensayo se ha buscado en las publicaciones donde están los datos de 2019 a 2021 (MAPA, 2024 b)

De la página web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, se han descargado unas tablas Excel, con los precios pagados por los agricultores en euros por 100 kg sin IVA.

4.3.5. Fitosanitarios

Para el precio de los fitosanitarios no contamos con una web como la del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación que refleje todos los precios mes a mes y año a año, ya que cada producto fitosanitario es comercializado por una marca que lo vende a un precio diferente. Por esta razón, se ha necesitado la ayuda de la Cooperativa Virgen de la Corona de Almudévar, donde nos han dicho los precios de los productos usados para este proyecto: Karate Zeon, Belem, Stompaqua, Prosaro, Cubix.

El precio de otros productos que ellos no comercializaban ni usaban para sus socios, se ha sacado de páginas web de empresas en las que se comercializan dichos productos:

Elumis. Recuperado de <https://burgossalaverry.es/fitosanitarios/168-elumis.html>

Karate Zeon 1 L. Recuperado de https://agrizon.com/products/karate-zeon-1-lt?srsltid=AfmBOortm7ysZpCv0b8kVs_-R8tzBCv_wXnhTSnzyMsew5Nk8m4LuFhd.

4.3.6. Energía

El precio de la energía utilizada en el riego por aspersión lo hemos obtenido de la página web Datosmacro (s. f.). Sabiendo el coste horario de la energía y el volumen de riego aplicado por unidad de superficie (mm) obtenemos el coste en euros que cuesta este proceso.

4.3.7. Precio de venta de la semilla cosechada

El precio de la semilla cosechada se ha obtenido de la página del ministerio del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (MAPA, s. f. a) que registra los precios pagados de todos los cereales cultivados en España durante los años de nuestro trabajo: 2019, 2020 y 2021.

Una vez con los precios y con la producción de los años podemos calcular el precio final que obtenemos en nuestras parcelas.

4.4. Eficiencia de la fertilización

Se calcula la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) de cada tratamiento durante los 3 años del estudio según la ecuación 1.

$$EUN = \frac{Kg \text{ grano cosechado}}{Kg \text{ N aplicado}} \text{ [Ecuación 1]}$$

Siendo:

EUN: eficiencia en el uso del nitrógeno (kg grano/kg N aportado)

Kg grano cosechado (kg/ha): cosecha de maíz en monocultivo y suma de las cosechas en los dobles cultivos

Kg N aplicado (kg N/ha): unidades de nitrógeno aportadas al maíz en monocultivo y suma de las unidades de N aportadas a los dos cultivos en los dobles cultivos.

Para la cuantificación económica de la respuesta a la fertilización se calcula la respuesta económica al uso del nitrógeno (REUN) para cada año como el cociente entre los ingresos obtenidos (€/ha) y el coste de los fertilizantes nitrogenados aplicados durante el año (€/ha) según la ecuación 2.

$$REUN = \frac{Ingresos \text{ obtenidos}}{Coste \text{ N aplicado}} \text{ [Ecuación 2]}$$

Siendo:

REUN: respuesta económica al uso del nitrógeno (ingresos en €/gasto en N €)

Ingresos obtenidos (€/ha): ingresos por la cosecha de maíz en monocultivo y suma de los ingresos de las dos cosechas en los dobles cultivos

Coste N aplicado (€/ha): coste los fertilizantes nitrogenados aportados a cada tratamiento cada año.

4.5. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica utilizada para comprender cómo los cambios en los supuestos o variables clave de un modelo afectan sus resultados. Sirve para evaluar el impacto de las variaciones (como un aumento en los costes o una bajada en las ventas) en los resultados de un proyecto, ayudando en la toma de decisiones informadas y en la gestión de riesgos.

En nuestro caso hemos hecho un análisis de sensibilidad con variaciones del precio de los siguientes factores: ingresos, gasoil, fertilizantes y coste de la semilla de siembra.

4.5.1. Ingresos

El primer factor que se ha analizado es el de ingresos suponiendo un decremento o incremento de los ingresos por disminución o aumento del precio de venta de los productos.

Se ha contemplado una bajada del 10% en los ingresos y unas subidas del 10%, 20%, 40% y 80% aplicado a los cuatro tratamientos de este ensayo.

4.5.2. Coste de la maquinaria

En segundo lugar, se ha analizado una variación en los costes por decremento o incremento del precio del gasoil.

Se ha contemplado una bajada del 10% en el precio del gasoil y unas subidas del 10%, 20%, 40% y 80% y se ha aplicado a los cuatro tratamientos de este ensayo.

4.5.3. Coste de la fertilización

En tercer lugar, se ha analizado una variación en los costes por decremento o incremento del precio de los fertilizantes minerales.

Se ha contemplado una bajada del 10% en el precio del fertilizante y unas subidas del 10%, 20%, 40% y 80% y se ha aplicado a los cuatro tratamientos de este ensayo.

4.5.4. Coste de la semilla de siembra

Finalmente, aunque hay una fuerte correlación entre el precio de la cosecha y el de la semilla de siembra, dado que los distintos tratamientos consideran la siembra de distintos cultivos, se ha analizado una variación en los costes por decremento o incremento del precio de la semilla de siembra de manera global en todos los cultivos.

Se ha contemplado una bajada del 10% en el precio de la semilla de siembra y unas subidas del 10%, 20%, 40% y 80% y se ha aplicado a los cuatro tratamientos de este ensayo.

4.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se ha realizado con el programa SPSS V.29.0 (20) En función de los datos, el análisis de los resultados se ha dividido en tres partes diferentes.

- En la primera parte, se han analizado de manera descriptiva los resultados de los gastos de las diferentes variables del proyecto para los 4 tratamientos y durante los 3 años del ensayo.
- En la segunda parte, se ha realizado un ANOVA de un factor (tratamiento) para las variables: costes maquinaria, costes fertilizantes, costes energía y costes fitosanitarios
- En la tercera parte, se ha realizado un ANOVA de dos factores (tratamiento y año) para las variables Ingresos totales y Beneficios totales (ingresos-gastos).

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Precios de los insumos y de los productos de venta

Para una mejor comprensión y discusión del balance económico se detallan los costes de gasoil, energía de aspersión, fitosanitarios, fertilizantes y semilla para cada año de trabajo.

5.1.1. Gasoil

En la tabla 8 se presenta el precio del gasoil en los tres años del ensayo.

Tabla 8: Precios gasoil año 2019, 2020 y 2021. **Fuente:** Elaboración propia.

Gasoil	
2019	0,72 €/L
2020	0,87 €/L
2021	1,23 €/L

5.1.2. Energía aspersión

En la tabla 9 se presentan los datos relacionados con la energía de aspersión los tres años del ensayo.

Tabla 9: Precios energía aspersión los tres años del ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

Energía de aspersión	
2019	0,2403 €/kwh
2020	0,2323 €/kwh
2021	0,232 €/kwh

5.1.3. Fitosanitarios

En la tabla 10 se presentan los datos relacionados con los diferentes fitosanitarios usados en los tres años del ensayo. Observamos alguna diferencia y algunos años donde algunos productos no se han usado. Estas diferencias pueden ser debidas a plagas o a distintas enfermedades que explican que se haya optado por usar unos productos u otros. Por otra parte, el precio de algunos productos que es el mismo los tres años, ya que no ha habido variaciones en las fuentes utilizadas

Tabla 10: Precios de los fitosanitarios usados en el ensayo durante los tres años. **Fuente:** Elaboración propia.

FITOSANITARIOS	AÑO		
	2019	2020	2021
PIREXTRA	9,36 €/L	9,36 €/L	9,36 €/L
ELUMIS	32,9 €/L	32,9 €/L	32,9 €/L
KARATE ZEON	76,59€/L	80,38 €/L	80,38 €/L
BELEM	-	-	4,32 €/KG
STOMP AQUA	-	12 €/L	12 €/L
PROSARO	18,60 €/L	20 €/L	-
CUBIX	25,30 €/L	24,90 €/L	15,80 €/L

ASSISTAN	-	-	26,40 €/L
BASAGRAN (BENTAZONA 48 %)	-	-	34,20 €/L
ORTIVA (AZOXISTROBIN 25 %)	-	-	17,90 €/L

5.1.4. Fertilizantes

En la tabla 11 se presentan los datos relacionados con los diferentes fertilizantes usados en los tres años del ensayo.

Tabla 11: Fertilizantes usados en el ensayo y precio de estos. **Fuente:** Elaboración propia.

FERTILIZANTES	AÑO		
	2019	2020	2021
NPK 8-15-15	25,82 €/Kg	28,82 €/Kg	29,82 €/Kg
N32 FERTIRRIEGO	24,19 €/Kg	26,12 €/Kg	33,22 €/Kg
NAC 27%	25,40 €/Kg	22,22 €/Kg	25,48 €/Kg

5.1.5. Semilla

En la tabla 12 se presentan los datos relacionados con los diferentes tipos de semillas usados en los tres años del ensayo.

Tabla 12: Precios de los diferentes tipos de semilla usados en los tres años del ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

SEMILLA	AÑO		
	2019	2020	2021
Maíz ciclo corto	167 €/saco*	178 €/saco*	159 €/saco*
Veza	530€/1000 kg	530€/1000 kg	530€/1000 kg
Maíz ciclo largo	271 €/saco*	271 €/saco*	271 €/saco*
Guisante	530 €/1000 kg	530 €/1000 kg	530 €/1000 kg

* Saco de 50.000 semillas

5.1.6. Precio de venta del grano producido

En la tabla 13 se presentan los datos relacionados con el precio de venta del grano producido en los tres años del ensayo.

Tabla 13: Precios de venta del grano producido en los tres años del ensayo en euros por cada 100 Kg. **Fuente:** Elaboración propia.

TRATAMIENTO	CULTIVO	2019	2020	2021
B_MCL	Maíz	17,43	19,06	27,2
CC_MCL	Maíz	17,43	19,06	27,2
C_MCC	Cebada	17,39	7697	7842
C_MCC	Maíz	17,43	19,06	27,2
G_MCC	Guisante	25,88	27,11	28,37
G_MCC	Maíz	17,43	19,06	27,2

5.1.7. Rendimiento de las cosechas

En la tabla 14 se presentan los datos relacionados con los rendimientos de las cosechas de los diferentes tratamientos y cultivos en los tres años del ensayo en Kg.

Tabla 14: Rendimiento en kg/ha de los diferentes cultivos en los tres años del ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

TRATAMIENTO	CULTIVO	2019	2020	2021
B_MCL	Maíz	15754	15706	15785
CC_MCL	Maíz	15740	15918	16519
C_MCC	Cebada	10729	7697	7842
C_MCC	Maíz	13831	12363	12207
G_MCC	Guisante	5572	4211	4377
G_MCC	Maíz	14760	12738	12030

5.2. Costes e ingresos en cada tratamiento.

Antes de realizar el análisis estadístico, se detallen de manera descriptiva los resultados de costes e ingresos de cada tratamiento realizado.

5.2.1. Tratamiento 1: Barbecho-maíz ciclo largo.

En la tabla 15 se presentan los resultados del estudio económico realizado sobre el primer tratamiento de nuestro estudio, Barbecho-maíz ciclo largo, durante las campañas 2019, 2020 y 2021, considerando los principales costes directos asociados al proceso productivo, así como el rendimiento económico obtenido en cada uno de los años analizados.

Para ello se han tenido en cuenta los costes de labores, energía para la aspersión, productos fitosanitarios, fertilizantes y semilla, así como el rendimiento final obtenido.

Tabla 15: Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 1 en los 3 años de ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

	COSTES TOTALES 2019		COSTES TOTALES 2020		COSTES TOTALES 2021
LABORES	455.13	LABORES	469.79	LABORES	508.94
ENERGIA	308.54	ENERGIA	260.64	ENERGIA	259.94
ASPERSION		ASPERSION		ASPERSION	
FITOSANITARIOS	167.17	FITOSANITARIOS	167.17	FITOSANITARIOS	138.63
FERTILIZANTES	263.49	FERTILIZANTES	301	FERTILIZANTES	313.93
SEMILLA	298.93	SEMILLA	318.62	SEMILLA	284.61
Total gastos	1493.26	Total gastos	1517.22	Total gastos	1506.05
INGRESOS	2745.92	INGRESOS	2993.56	INGRESOS	4293.52
Beneficio	1252.66	Beneficio	1476.34	Beneficio	2787.47

La tabla 15 muestra todos los resultados obtenidos del primer tratamiento en los tres años, según se ha especificado en los párrafos anteriores.

De manera general, los resultados muestran que el coste total de producción se ha mantenido relativamente estable a lo largo del periodo de estudio, con valores de 1.493,26 € en 2019, 1.517,22 € en 2020 y 1.506,05 € en 2021. No obstante, se observa un ligero incremento en determinados insumos, especialmente en el coste de las labores y de los fertilizantes, que alcanzan su valor más elevado en 2021. Dado que la variación interanual es pequeña, se representa en la Figura 15 el porcentaje de gasto que supone cada insumo para el tratamiento 1.

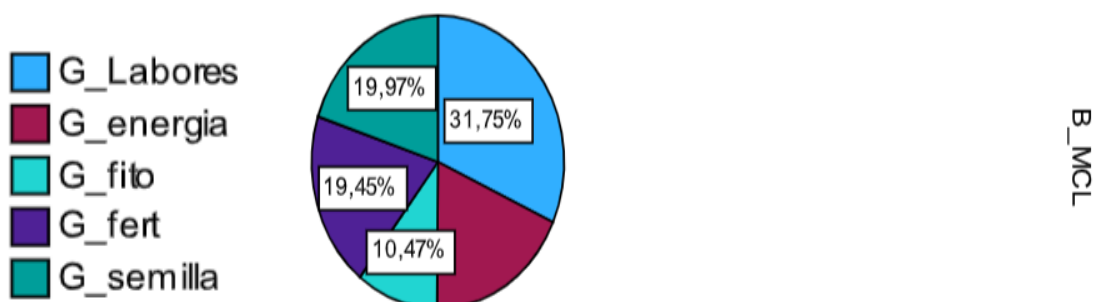


Figura 15: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 1 (Barbecho. Maíz ciclo largo). **Fuente:** Elaboración propia.

En contraste con esta estabilidad en los costes, el rendimiento económico del cultivo presenta una evolución creciente, pasando de 2.745,92 € en 2019 a 2.993,56 € en 2020, y experimentando un incremento mucho más acusado en 2021, con un valor de 4.293,52 €. Esto se traduce en un beneficio neto –diferencia entre rendimiento y costes– de 1.252,66 € en 2019, 1.476,34 € en 2020 y 2.787,47 € en 2021, evidenciando una mejora notable de la rentabilidad del cultivo en el último año del periodo analizado.

Estos resultados ponen de manifiesto que, a pesar del ligero incremento de los costes de producción, la rentabilidad del cultivo de maíz ha mejorado progresivamente, especialmente en 2021, lo que pone de relieve la importancia de factores como la optimización de los insumos y la mejora de las condiciones agronómicas.

5.2.2. Tratamiento 2. Cubierta vegetal (veza)-maíz ciclo largo.

En la tabla 16 se presentan los resultados del estudio económico realizado sobre el segundo tratamiento de nuestro estudio, Cubierta vegetal (veza)-maíz ciclo largo, durante las campañas 2019, 2020 y 2021.

Tabla 16. Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 2 en los 3 años de ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

	COSTES TOTALES 2019		COSTES TOTALES 2020		COSTES TOTALES 2021
LABORES	621.63	LABORES	641.77	LABORES	723.97
ENERGIA		ENERGIA		ENERGIA	
ASPERION	327.04	ASPERION	265.05	ASPERION	278.52

FITOSANITARIOS	167.17	FITOSANITARIOS	167.17	FITOSANITARIOS	138.63
FERTILIZANTES	251.4	FERTILIZANTES	287.94	FERTILIZANTES	297.32
SEMILLA	351.93	SEMILLA	371.62	SEMILLA	337.61
Total gastos	1719.17	Total gastos	1733.55	Total gastos	1776.05
INGRESOS	2743.48	INGRESOS	3033.97	INGRESOS	4493.16
Beneficio	1024.31	Beneficio	1300.42	Beneficio	2717.11

El coste total de producción del segundo tratamiento muestra un ligero incremento progresivo a lo largo del periodo de estudio, pasando de 1.719,17 € en 2019 a 1.733,55 € en 2020, y alcanzando los 1.776,05 € en 2021. Este aumento está principalmente relacionado con el incremento en los costes asociados a las labores agrícolas, que pasan de 621,63 € en 2019 a 723,97 € en 2021, así como con el aumento del gasto en fertilizantes, que se incrementa desde 251,40 € en 2019 hasta 297,32 € en 2021. Por tanto, se observa una mayor inversión en insumos a medida que avanza el periodo analizado. Dado que la variación interanual es pequeña, se representa en la Figura 16 el porcentaje de gasto que supone cada insumo para el tratamiento 2.

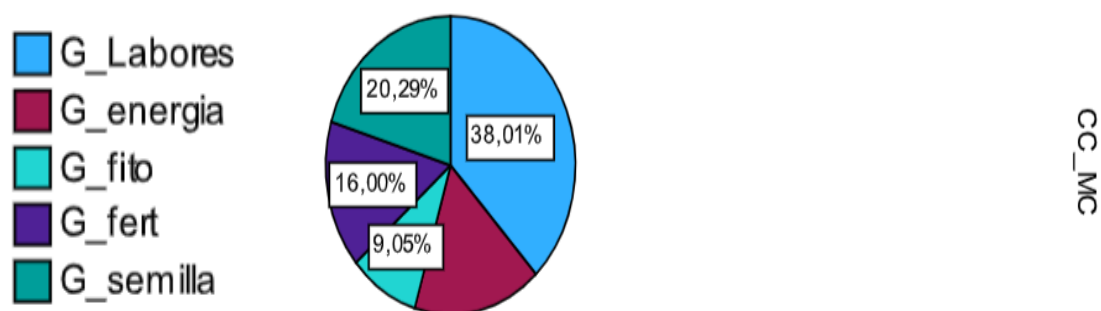


Figura 16: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 2 (cubierta vegetal-maíz).
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de este incremento de los costes de producción, el rendimiento económico del cultivo presenta una tendencia marcadamente ascendente, especialmente notable en el último año del estudio. En concreto, los ingresos generados pasan de 2.743,48 € en 2019 a 3.033,97 € en 2020, alcanzando un valor máximo de 4.493,16 € en 2021. Este aumento supone un incremento de más de 1.400 € respecto a 2020, lo que pone de manifiesto una mejora sustancial en el comportamiento productivo y/o comercial del cultivo durante ese año.

Como consecuencia directa de esta evolución, el beneficio neto del tratamiento experimenta un incremento muy significativo, pasando de 1.024,31 € en 2019 a 1.300,42 € en 2020, hasta alcanzar los 2.717,11 € en 2021. Este último valor más que duplica el beneficio obtenido en el año anterior, a pesar de que 2021 es el año en el que los costes totales resultan más elevados.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el aumento de la rentabilidad observado en 2021 no está asociado a una reducción de los costes de producción, sino a un incremento considerable de los ingresos generados por el cultivo. Este incremento puede estar relacionado con una mayor producción, una mejora del precio de venta del maíz en dicho año, o una combinación de ambos factores. Por tanto, el segundo tratamiento evidencia que un mayor nivel de inversión en labores e insumos puede ir acompañado de un retorno económico significativamente superior cuando las condiciones productivas y de mercado son favorables.

5.2.3. Tratamiento 3. Cebada-maíz ciclo corto.

En el periodo analizado se observa una evolución diferenciada tanto en los costes como en el rendimiento económico final, lo que permite hacer un resumen de los datos obtenidos. Se presentan en la tabla 17 los resultados del estudio económico realizado sobre el tercer tratamiento de nuestro estudio, Cebada-maíz ciclo corto, durante las campañas 2019, 2020 y 2021.

Tabla 17. Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 3 en los 3 años de ensayo.
Fuente: Elaboración propia.

	COSTES TOTALES 2019		COSTES TOTALES 2020		COSTES TOTALES 2021
LABORES	487.904	LABORES	501.896	LABORES	700.635
ENERGIA	355.88	ENERGIA	269	ENERGIA	308.72
ASPERION	188.44	ASPERION	192.55	ASPERION	201.42
FITOSANITARIOS	498.55	FITOSANITARIOS	543.69	FITOSANITARIOS	596.41
FERTILIZANTES	545.09	FERTILIZANTES	545.09	FERTILIZANTES	545.09
SEMILLA	2075.864	SEMILLA	2052.226	SEMILLA	2352.275
Total gastos	4276.51	Total gastos	3521.7	Total gastos	4965.55
INGRESOS	2200.646	INGRESOS	1469.474	INGRESOS	2613.275
Beneficio		Beneficio		Beneficio	

En 2019, el coste total de producción ascendió a 2.075,86 €, siendo los conceptos más relevantes la semilla (545,09 €) y los fertilizantes (498,55 €) seguidos de las labores (487,90 €). La energía de aspersión y los fitosanitarios tuvieron un peso menor dentro de la estructura de costes. El rendimiento económico obtenido alcanzó los 4.276,51 €, lo que generó un beneficio de 2.200,65 €. Este resultado refleja un buen equilibrio entre los insumos y producción obtenida. Dado que la variación interanual es pequeña, se representa en la Figura 17 el porcentaje de gasto que supone cada insumo para el tratamiento 3.

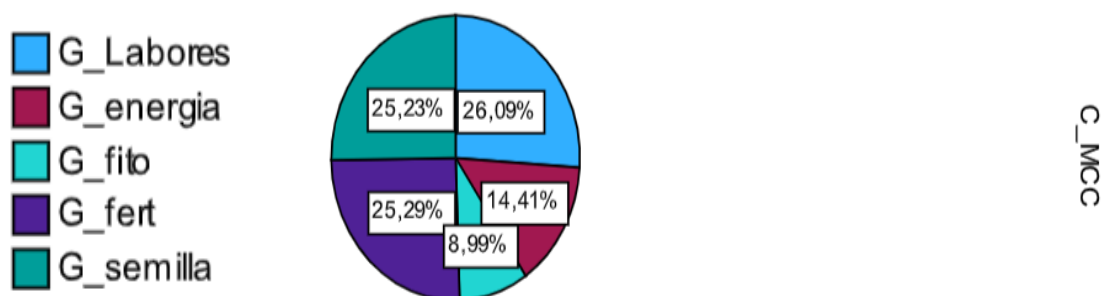


Figura 17: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 3 (cebada-maíz ciclo corto).
Fuente: Elaboración propia.

En 2020, aunque el coste total se redujo ligeramente hasta los 2.052,23 €, el rendimiento económico descendió hasta los 3.521,70 €. Esta caída del rendimiento provocó una reducción del beneficio neto, que se situó en 1.469,47 €, es decir, un descenso significativo respecto al año

anterior. Esta disminución no se explica principalmente por un incremento de los costes, que incluso se mantuvieron contenidos, sino que apunta a una menor producción, peores condiciones agronómicas o un descenso en el precio del maíz y cebada durante ese año.

En 2021 se produjo un cambio de tendencia importante. El coste total aumentó hasta los 2.352,28 €, debido principalmente al incremento en labores (700,64 €), fertilizantes (596,41 €) y energía de aspersión (308,72 €), lo que indica una mayor intensidad en el manejo del cultivo. Sin embargo, este incremento de inversión se vio ampliamente compensado por un fuerte aumento del rendimiento económico, que alcanzó los 4.965,55 €. Como consecuencia, el beneficio neto se elevó hasta los 2.613,28 €, siendo el valor más alto del periodo estudiado.

El fuerte incremento del rendimiento económico en 2021 puede atribuirse a una combinación de factores:

- Mayor inversión en insumos clave, especialmente en fertilización y labores, que probablemente mejoró la productividad del cultivo.

- Posibles mejores condiciones climáticas y agronómicas respecto a 2020.

- Probable aumento del precio del maíz y cebada en el mercado en 2021, lo que incrementó los ingresos.

Por tanto, puede concluirse que, aunque 2021 fue el año con mayor coste de producción, también fue el más eficiente desde el punto de vista económico, presentando la mejor relación entre inversión y retorno.

Por contra, 2020 fue el año menos favorable, dado que, incluso con unos costes similares a 2019, el menor rendimiento redujo considerablemente la rentabilidad final del cultivo.

5.2.4. Tratamiento 4. Guisante-Maíz ciclo corto.

En la tabla 18 se presentan los resultados del estudio económico realizado sobre el cuarto tratamiento de nuestro estudio, guisante-maíz ciclo corto, durante las campañas 2019, 2020 y 2021.

Tabla 18: Costes por insumos, ingresos y beneficio para el tratamiento 4 en los 3 años de ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

	COSTES TOTALES 2019		COSTES TOTALES 2020		COSTES TOTALES 2021
LABORES	479.86	LABORES	494.23	LABORES	692.32
ENERGIA	356.35	ENERGIA	261.8	ENERGIA	304.8
ASPERSION		ASPERSION		ASPERSION	
FITOSANITARIOS	188.44	FITOSANITARIOS	192.55	FITOSANITARIOS	201.42

FERTILIZANTES	396.95	FERTILIZANTES	454.81	FERTILIZANTES	469.01
SEMILLA	591.09	SEMILLA	591.09	SEMILLA	591.09
Total gastos	2012.69	Total gastos	1994.48	Total gastos	2258.64
INGRESOS	4014.69	INGRESOS	3569.46	INGRESOS	4513.91
Beneficio	2002	Beneficio	1574.98	Beneficio	2255.27

Durante el período estudiado, los gastos en labores fueron de 479,86€ en 2019, aumentando ligeramente a 494,23€ en 2020 y experimentando un salto significativo hasta 692,32€ en 2021.

Este aumento puede atribuirse a una mayor intensidad de trabajo o al uso adicional de maquinaria, siendo el factor que más creció durante los tres años. Por su parte, la energía destinada a la aspersión descendió de 356,35€ en 2019 a 261,80€ en 2020, para luego recuperarse parcialmente hasta 304,80€ en 2021. Esta variación podría reflejar un uso más eficiente del riego en 2020 y un aumento en 2021 debido a mayores necesidades de irrigación.

Dado que la variación interanual es pequeña, se representa en la figura 18 el porcentaje de gasto que supone cada insumo para el tratamiento 4.

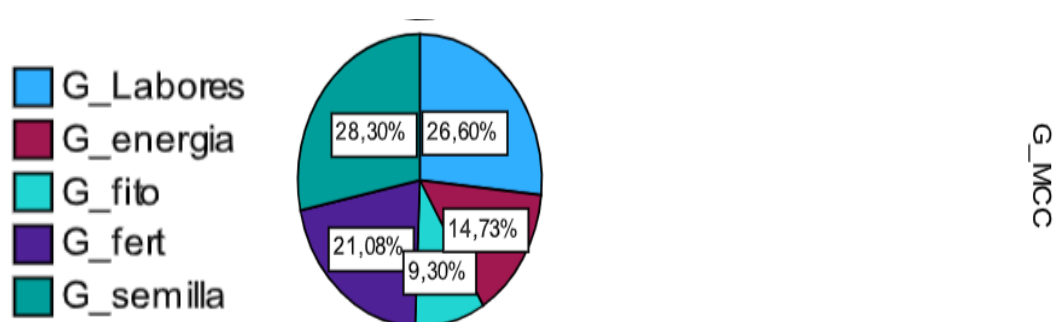


Figura 18: Porcentaje de gasto que supone cada insumo en el Tratamiento 4 (guisante-maíz ciclo corto).
Fuente: Elaboración propia.

El gasto en fitosanitarios mostró incrementos sostenidos, pasando de 188,44€ en 2019 a 192,55€ en 2020 y 201,42€ en 2021, lo que sugiere un manejo estable de plagas y enfermedades. Los fertilizantes, en cambio, tuvieron un aumento notable de 396,95€ en 2019 a 454,81€ en 2020, seguido de un incremento más moderado –hasta 469,01€– en 2021, posiblemente reflejando ajustes en las dosis para compensar el rendimiento o incrementos en los precios de los insumos. La semilla permaneció constante, en 591,09€, durante los tres años. Como resultado, el total de costes pasó de 2012,69€ en 2019 a 1994,48€ en 2020, mostrando una leve reducción, y aumentó significativamente hasta 2258,64€ en 2021, impulsado principalmente por los gastos en labores y fertilizantes.

El rendimiento del cultivo presenta una tendencia que explica gran parte de la variación en los ingresos. En 2019, el rendimiento alcanzó 4014,69€, generando un ingreso total de 2002€, mientras que en 2020 cayó a 3569,46€, con un ingreso de 1574,98€. Esta caída evidencia que, a pesar de la ligera reducción de costes en 2020, la disminución del rendimiento afectó de manera significativa la rentabilidad, probablemente debido a factores externos. En 2021, el rendimiento

se recuperó hasta 4513,91€, superando incluso los niveles de 2019 y generando un ingreso total de 2255,27€. Este aumento permitió mejorar la rentabilidad.

En términos generales, los años analizados muestran que las variables estudiadas de mayor impacto en los costes son labores y fertilizantes, mientras que la energía para aspersión y los fitosanitarios presentan variaciones más moderadas. El comportamiento de 2020 evidencia cómo una disminución en el rendimiento puede afectar de manera crítica la rentabilidad, mientras que el año 2021 demuestra que el aumento de producción puede compensar incrementos en costes y generar beneficios superiores.

5.3. Comparación entre tratamientos

Para comparar el comportamiento de los diferentes insumos en cada tipo de tratamiento se ha realizado un ANOVA de un factor para cada uno de los insumos.

5.3.1. Coste de labores

Los resultados del coste de las labores se muestran en la Figura 19; el gasto en labores no muestra diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

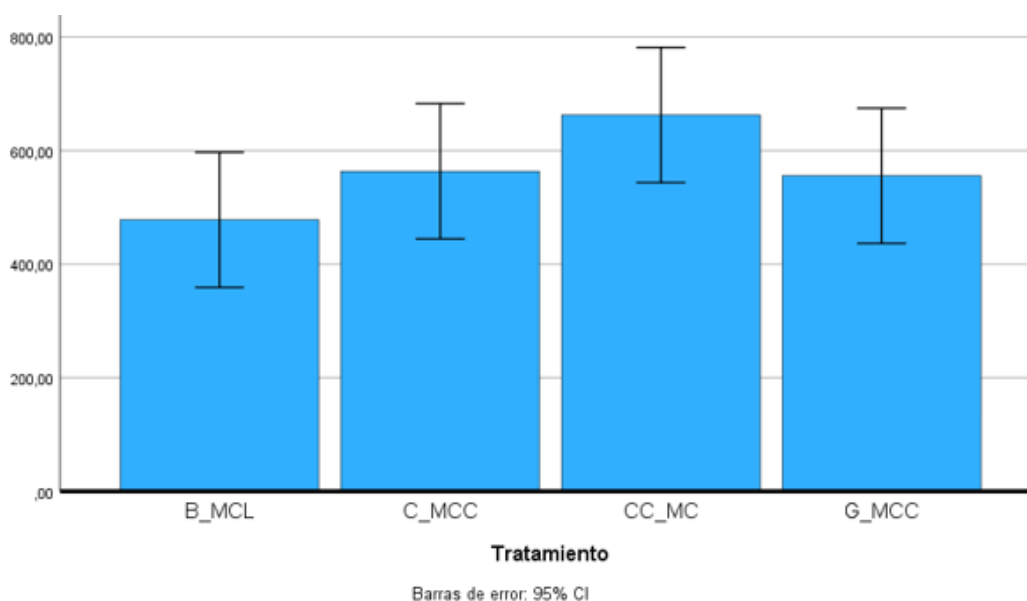


Figura 19: Costes de las labores de labranza en euros para los 4 tratamientos (media de los 3 años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. **Fuente:** Elaboración propia.

Los costes medios de las labores fueron de aproximadamente 565 € ha⁻¹, oscilando entre los 477,95 € ha⁻¹ del tratamiento con barbecho (B_MCL) y los 662,46 € ha⁻¹ del tratamiento con cubierta vegetal (CC_MC). Los tratamientos G_MCC y C_MCC presentaron valores intermedios (555,47 y 563,48 € ha⁻¹, respectivamente).

La elevada variabilidad de los resultados no permite detectar diferencias significativas entre los tratamientos, a pesar de que en los tratamientos con dos siembras se realizan más labores.

5.3.2. Coste de la energía

Los resultados del coste de la energía se muestran en la Figura 20 y no se detectan diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

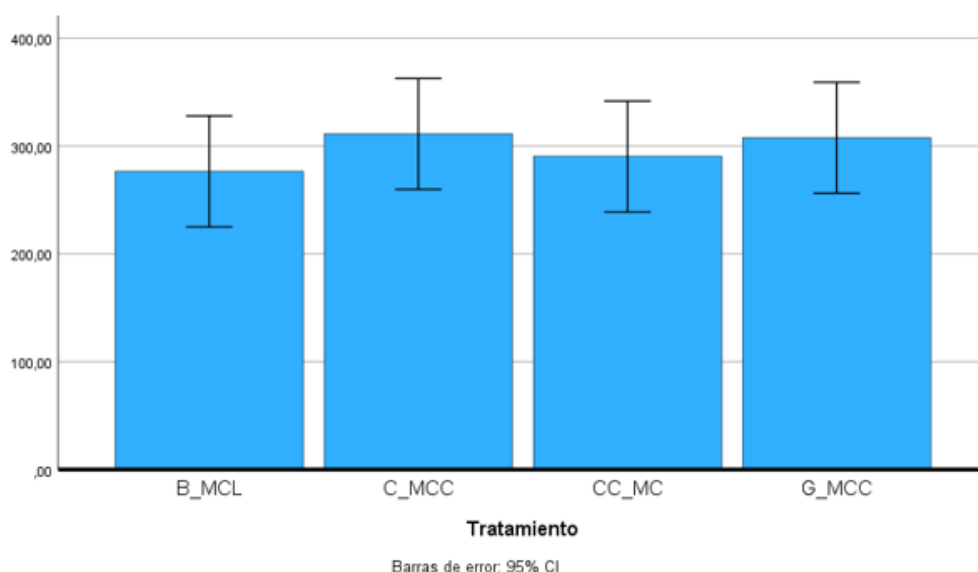


Figura 20: Coste de la energía en € para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. **Fuente:** Elaboración propia.

Los costes energéticos medios fueron de aproximadamente 296 € ha⁻¹, con valores comprendidos entre los 276,37 € ha⁻¹ del tratamiento con barbecho (B_MCL) y los 311,20 € ha⁻¹ del tratamiento C_MCC. Los tratamientos CC_MC y G_MCC presentaron valores intermedios (290,20 y 307,65 € ha⁻¹, respectivamente). No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,697$), por lo que todos los sistemas de manejo pueden considerarse energéticamente equivalentes dentro del rango analizado.

5.3.3. Coste de fitosanitarios

Los resultados del coste de los fitosanitarios se muestran en la Figura 21, con diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

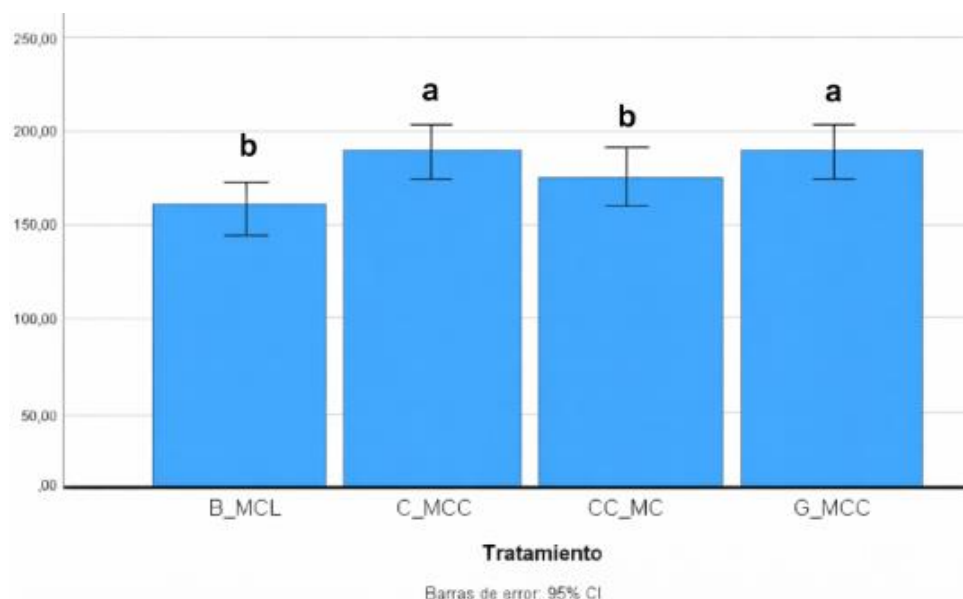


Figura 21: Coste de los fitosanitarios en € para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. Barras que no comparten letra presentan diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). **Fuente:** Elaboración propia.

Los tratamientos C_MCC y G_MCC mostraron valores significativamente superiores a los observados en B_MCL y CC_MC, que no difirieron entre sí. Este patrón indica un mayor uso de fitosanitarios en los tratamientos con doble cultivo frente a los de cultivo simple.

Los costes medios en el uso de productos fitosanitarios fueron de alrededor de 176 € ha⁻¹, con valores comprendidos entre los 157,66 € ha⁻¹ registrados en los tratamientos con barbecho (B_MCL) y cubierta vegetal (CC_MC) y los 194,14 € ha⁻¹ observados en los tratamientos con cebada(C_MCC) y guisante (G_MCC).

5.3.4. Coste de fertilizantes

Los resultados del coste de los fertilizantes se muestran en la figura22, con diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

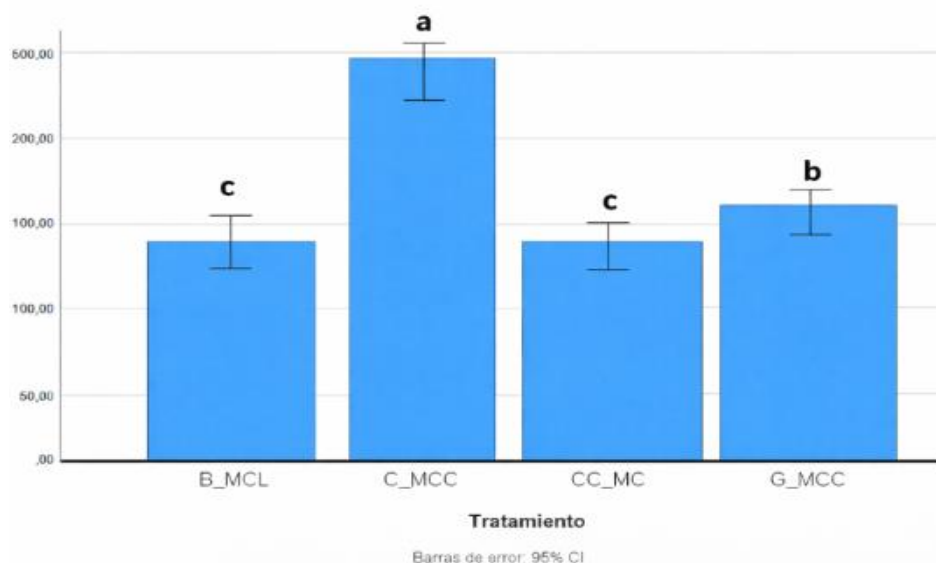


Figura 22: Coste de los fertilizantes en € para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. Barras que no comparten letra presentan diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). **Fuente:** Elaboración propia.

La figura 22 muestra diferencias claras en el gasto en fertilizantes entre tratamientos. Los tratamientos con doble cultivo (C_MCC y G_MCC) presentan valores significativamente superiores a los observados en los tratamientos de cultivo simple (B_MCL y CC_MC). En particular, C_MCC alcanza el mayor gasto medio, mientras que CC_MC y B_MCL registran los valores más bajos. La representación gráfica pone de manifiesto un incremento progresivo del gasto en fertilización asociado a una mayor intensificación del sistema productivo.

5.3.5. Coste de semilla

Los resultados del coste de la semilla se muestran en la Figura 23, con diferencias significativas entre tratamientos.

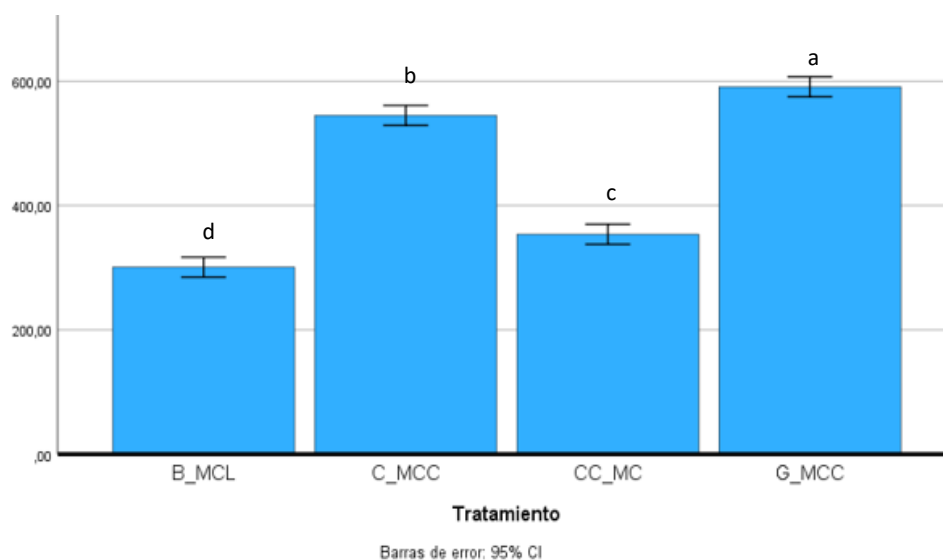


Figura 23: Coste de las semillas en € para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. Barras que no comparten letra presentan diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). **Fuente:** Elaboración propia.

La Figura 23 muestra una diferenciación clara entre tratamientos en el gasto en semilla. El tratamiento B_MCL presenta el menor gasto, seguido de CC_MC, mientras que los tratamientos con doble cultivo (C_MCC y G_MCC) registran valores superiores. En particular, G_MCC alcanza el mayor gasto medio en semilla.

5.3.6. Coste total

Los costes totales se muestran en la Figura 24.

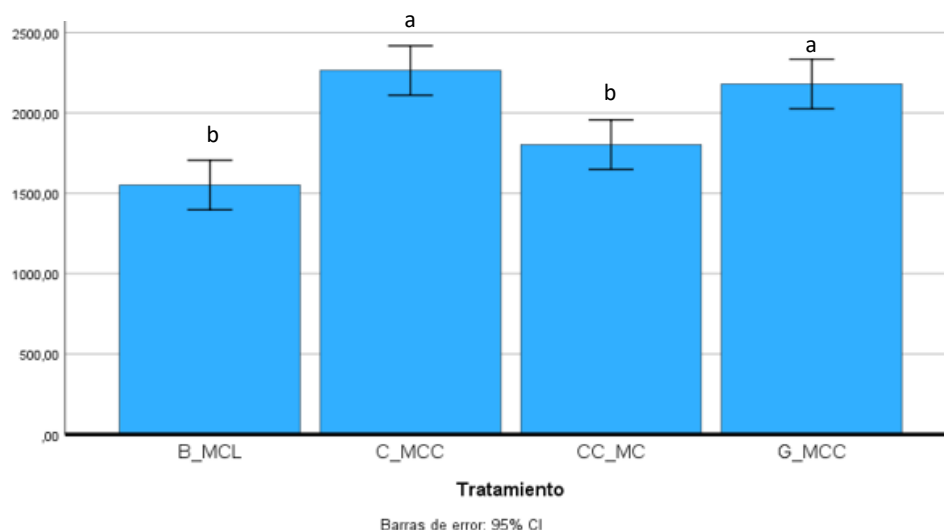


Figura 24: Costes totales en € para los 4 tratamientos (media de los tres años de estudio). Las barras representan la media y los intervalos de confianza al 95 %. Barras que no comparten letra presentan diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). **Fuente:** Elaboración propia.

El gasto total presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Los tratamientos B_MCL y CC_MC conformaron un grupo homogéneo con los valores más bajos, mientras que G_MCC y C_MCC integraron un segundo grupo con gastos totales significativamente superiores.

5.3.7. Ingresos totales

Para los ingresos totales se realiza un ANOVA de dos factores (Tratamiento y año) cuyos resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Ingresos (€/ha) en cada tratamiento cada año de estudio. Hay diferencias significativas por el año de estudio (medias seguidas con letras X, Y, Z) y también por los tratamientos (letras A, B Y C). **Fuente:** Elaboración propia.

	AÑOS DE ESTUDIO			
Tratamientos	2019	2020	2021	MEDIA AÑOS
B_MCL	2746,00±79,92	2993,47±161,98	4293,49±134,82	3344,32±728,67 C
C_MCC	4276,44±106,29	3521,67±120,97	5185,22±219,78	4327,78±734,12 A
CC_MCL	2743,52±67,88	3034,04±159,66	4493,17±187,94	3423,58±822,01 C
G_MCC	4014,67±42,24	3569,46±248,12	4764,25±139,06	4116,13±542,33 B
Media Tratamientos	3445,16±740,86 Y	3279,66±317,69 Z	4684,03±379,23 X	

Los ingresos (€/ha) estuvieron significativamente influenciados tanto por el año de estudio como por el tratamiento aplicado (Tabla 19). En cuanto al efecto del año, se observaron diferencias significativas entre los tres periodos evaluados, registrándose los mayores ingresos en 2021, valores intermedios en 2019 y los menores ingresos en 2020.

Respecto al efecto de los tratamientos, C_MCC presentó la media de ingresos más elevada, diferenciándose significativamente del resto de tratamientos. G_MCC mostró valores ligeramente inferiores, aunque también significativamente mayores que los tratamientos B_MCL y CC_MCL, los cuales no presentaron diferencias significativas entre sí y registraron los ingresos más bajos.

Asimismo, el análisis reveló una interacción significativa entre el año y el tratamiento. En los tratamientos con doble cultivo (C_MCC y G_MCC) se observó una disminución de los ingresos en 2020 respecto a 2019, mientras que en los tratamientos con un solo cultivo anual (B_MCL y CC_MCL) los ingresos fueron mayores en 2020 que en 2019, evidenciando una respuesta diferencial de los tratamientos según el año de estudio.

5.3.8. Beneficios totales

Los beneficios totales (diferencia entre ingresos totales y gastos totales) se muestran en la tabla 20.

Tabla 20: Beneficios (€/ha) en cada tratamiento cada año de estudio. Hay diferencias significativas por el año de estudio (medias seguidas con letras X, Y, Z) y también por los tratamientos (letras A, B, C).

Fuente: Elaboración propia.

	Años de estudio			
Tratamientos	2019	2020	2021	MEDIA AÑOS
B_MCL	1243,50 ± 79,92	1413,05 ± 161,98	2721,53 ± 134,82	1792,70 ± 709,49 BC
C_MCC	2097,52 ± 106,29	1355,33 ± 120,97	2738,53 ± 219,78	2063,80 ± 614,76 A
CC_MCL	1003,02 ± 67,88	1224,23 ± 159,66	2634,60 ± 187,94	1620,62 ± 777,09 C
G_MCC	1920,12 ± 42,24	1479,51 ± 248,12	2407,30 ± 139,06	1935,64 ± 426,86 AB
Media Tratamientos	1566,04 ± 480,03 Z	1368,03 ± 181,34 Y	2625,49 ± 202,57 X	

Al considerar la media de los tratamientos, se observa una variación marcada del beneficio entre años, con los valores más elevados en 2021, mientras que 2019 presentó valores intermedios y 2020 los menores beneficios. Este patrón refleja un efecto temporal claro, ligado a las

variaciones en el precio de venta de las cosechas, con una mejora general del beneficio en la última campaña evaluada.

En cuanto al efecto del tratamiento, C_MCC presentó el mayor beneficio medio interanual, diferenciándose significativamente de los tratamientos con solo maíz, pero sin llegar a diferenciarse significativamente del doble cultivo con guisante (G_MCC). Este último tratamiento (G_MCC) comparte grupo homogéneo con B_MCL, mientras que difiere significativamente del tratamiento con cubierta vegetal (CC_MCL).. El tratamiento B_MCL presentó valores intermedios, sin diferenciarse claramente de los tratamientos adyacentes

La evolución del beneficio entre años difirió según el tratamiento. En general, todos los tratamientos alcanzaron sus mayores valores en 2021, mientras que 2020 mostró una reducción del beneficio respecto a 2019 en C_MCC y G_MCC. Por el contrario, en B_MCL y CC_MCL se observó un ligero incremento del beneficio en 2020 respecto a 2019, evidenciando una respuesta diferencial de los tratamientos según el año de estudio.

5.4. Eficiencia de la fertilización

Los resultados de eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) y de la respuesta económica al uso del nitrógeno (REUN) se muestran en la Figura 25, no se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos ($p>0,05$)

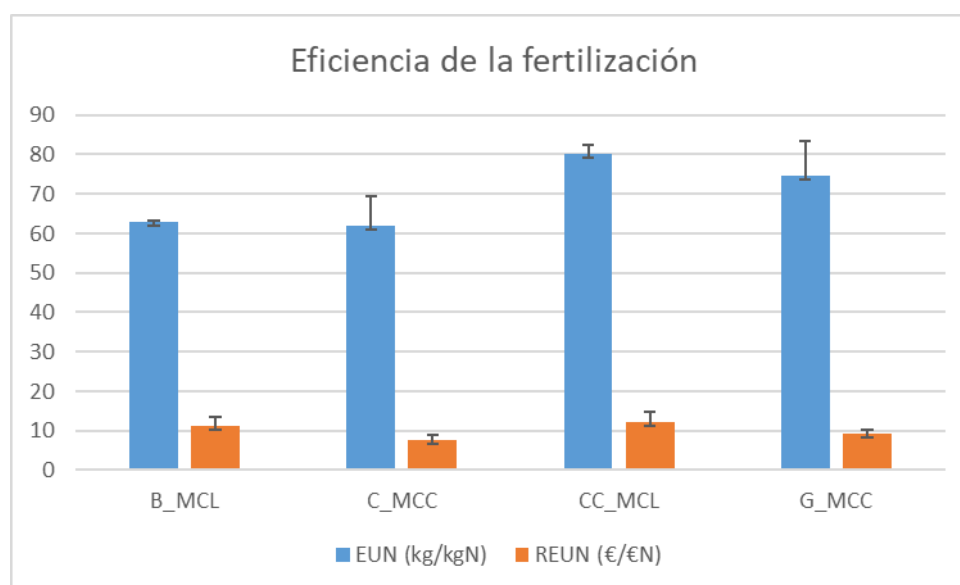


Figura 25: Grafica explicativa de la eficiencia del uso del nitrógeno y de la respuesta económica al uso del nitrógeno. **Fuente:** Elaboración propia.

Los valores de eficiencia del uso del nitrógeno oscilan entre 57 (tratamiento C-MCC, año 2020) y 85 (tratamiento G-MCC, año 2019) kg de grano cosechado por cada kg de nitrógeno aplicado, pero la variabilidad de los resultados enmascara las diferencias entre tratamientos.

Respecto a la respuesta económica al uso del nitrógeno, los valores oscilan entre 6,5 (tratamiento C-MCC, año 2020) y 15,1 (tratamiento CC-MCL, año 2021) euros ingresados respecto a los euros gastados en fertilización.

5.5. Análisis de sensibilidad

En este apartado se realiza un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta disminuciones e incrementos tanto de los costes como del precio de venta del producto. Se han contemplado los siguientes escenarios respecto a la situación real: bajada del 10% y subidas del 10%, 20%, 40% y 80%.

5.5.1. Ingresos

El primer factor que se ha analizado es el de ingresos suponiendo un decremento o incremento de los ingresos por disminución o aumento del precio de venta de los productos.

Se ha contemplado una bajada del 10% en los ingresos y unas subidas del 10%, 20%, 40% y 80%. Los resultados se presentan en la Figura 26.

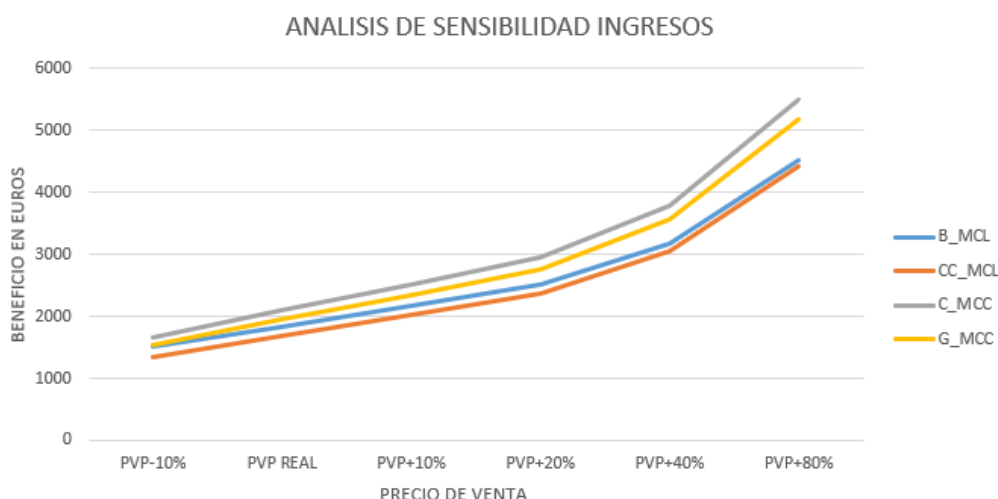


Figura 26: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio de venta del producto. **Fuente:** Elaboración propia.

Evidentemente, el incremento del precio de venta supone un incremento de los beneficios, pero esta relación no afecta a todos los tratamientos por igual. La alternativa C_MCC alcanza los valores más elevados en el conjunto de escenarios analizados, por lo que se configura como la opción más rentable, especialmente bajo hipótesis optimistas (B+40F y B+80F). Le sigue G_MCC, cuyo comportamiento se mantiene estable y cercano a C_MCC en todos los escenarios.

Las pequeñas diferencias entre el tratamiento con barbecho (más beneficioso en la situación real) con el tratamiento con cubierta vegetal, se eliminan conforme aumenta el precio de venta del producto.

Todas las alternativas mantienen rentabilidad positiva incluso ante una reducción del beneficio del 10%.

5.5.2. Coste de la maquinaria.

En segundo lugar, se ha analizado una variación en los costes por decremento o incremento del precio del gasoil.

Los resultados representados en la Figura 27 muestran una tendencia claramente decreciente en todos los casos: a medida que el coste del gasóleo aumenta, el beneficio económico se reduce proporcionalmente. Esto confirma que el gasóleo es un componente significativo dentro de los costes operativos, con capacidad para afectar de forma relevante a la rentabilidad final del sistema.

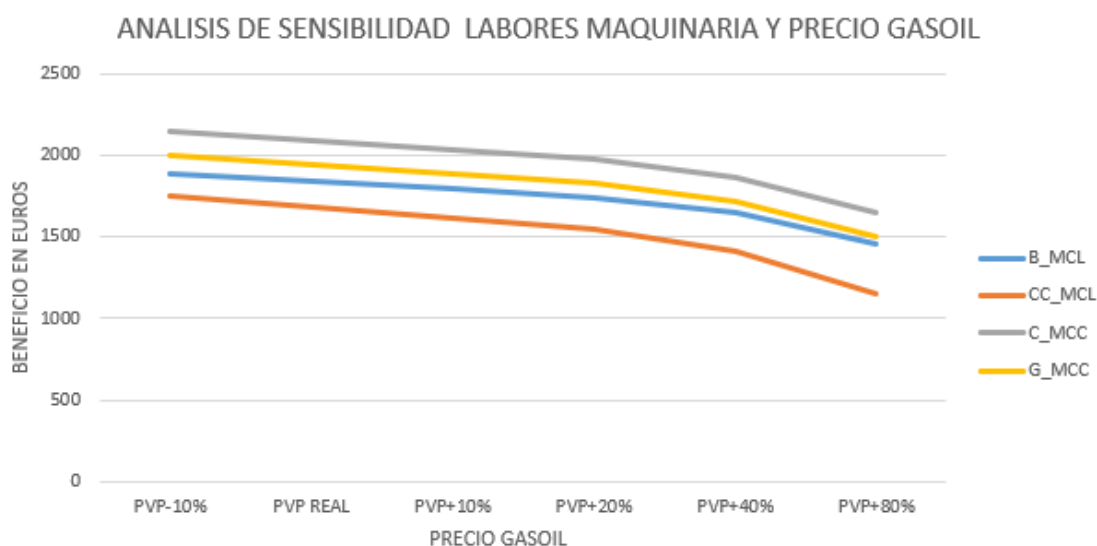


Figura 27: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio de labores y gasoil. **Fuente:** Elaboración propia.

La alternativa C_MCC continúa siendo la opción con mejores resultados económicos a lo largo de todos los escenarios considerados, seguida por G_MCC, mientras que B_MCL y CC_MCL presentan beneficios más reducidos, especialmente cuando el coste del gasóleo aumenta significativamente.

La alternativa CC_MCL es la que experimenta una mayor pérdida relativa en los escenarios más desfavorables (B+40F y B+80F), lo que indica que su estructura de costes es más dependiente del consumo de gasóleo respecto del resto.

En conclusión, el coste del gasóleo presenta un efecto negativo directo y proporcional sobre el beneficio del sistema. Las cuatro alternativas se mantienen económicamente viables incluso con fuertes incrementos del coste. C_MCC vuelve a posicionarse como la alternativa de mayor rentabilidad en todo el rango analizado. La alternativa CC_MCL se identifica como la más sensible al aumento del gasóleo, debido a una estructura de costes con mayor peso en este insumo.

5.5.3. Coste de fertilización.

En tercer lugar, se analiza la influencia del coste del fertilizante sobre la rentabilidad económica del cultivo, considerando la misma estructura económica empleada en los análisis previos. Se definieron diferentes escenarios de sensibilidad variando dicho coste desde una disminución del

10% (B-10F) hasta un incremento del 80% (B+80F), manteniendo constantes el resto de las variables productivas y económicas.

Tal y como se observa en la figura 28, el incremento del coste del fertilizante provoca una reducción progresiva del beneficio, siguiendo una tendencia decreciente en las cuatro alternativas evaluadas. Esto evidencia que el fertilizante es un insumo con peso relevante en los costes totales del sistema productivo.

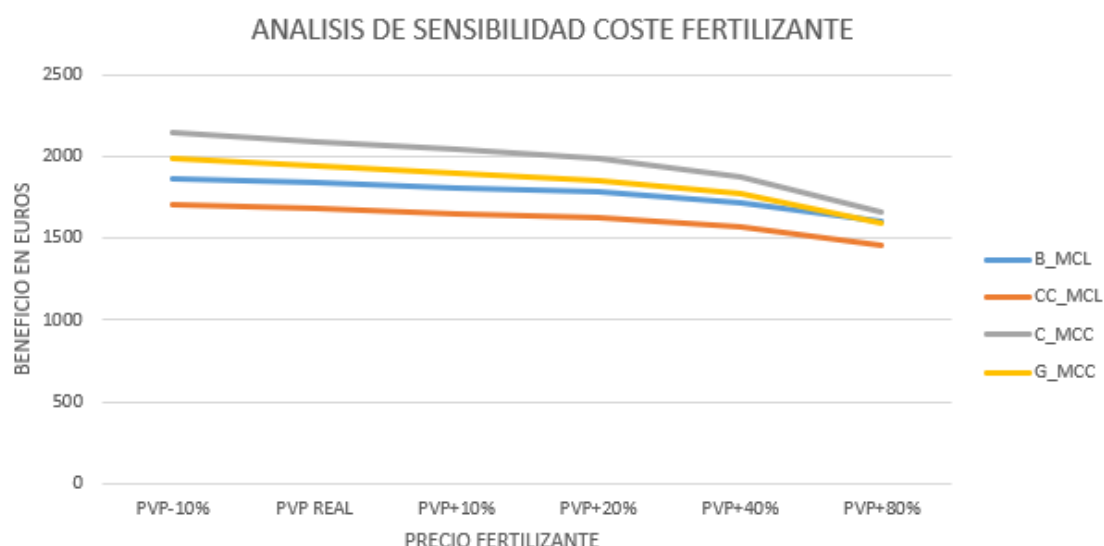


Figura 28: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio del fertilizante. **Fuente:** Elaboración propia.

Sin embargo, incluso en los escenarios más desfavorables (B+40F y B+80F), las cuatro alternativas mantienen beneficios positivos, lo que confirma una alta estabilidad económica frente a la variación de costes de este insumo.

La alternativa C_MCC mantiene los valores más elevados en la mayoría de los escenarios, consolidándose como la opción de mayor rentabilidad económica. G_MCC muestra un comportamiento igualmente favorable y con menor dispersión, situándose como alternativa competitiva. B_MCL y CC_MCL presentan beneficios inferiores en todo el rango analizado, destacando que CC_MCL vuelve a ser la más afectada en términos relativos cuando los costes son elevados.

En conclusión, el aumento del coste del fertilizante provoca una reducción directa del beneficio, aunque con un impacto menos acusado que otros parámetros analizados. La rentabilidad permanece positiva en todos los escenarios, lo que refuerza la economía del sistema. C_MCC continúa siendo la alternativa con mejor desempeño, seguida de G_MCC. La alternativa CC_MCL muestra mayor sensibilidad relativa al coste del fertilizante, lo que sugiere la necesidad de una gestión más eficiente de este insumo en su estructura productiva.

5.5.4. Coste de semilla.

El análisis de sensibilidad del coste de semilla muestra unos resultados que evidencian cómo un incremento en el coste de la semilla provoca una reducción moderada y progresiva del

beneficio. La tendencia decreciente observada es uniforme en las cuatro alternativas, lo que confirma que el coste de semilla constituye un componente relevante en el coste total de producción.

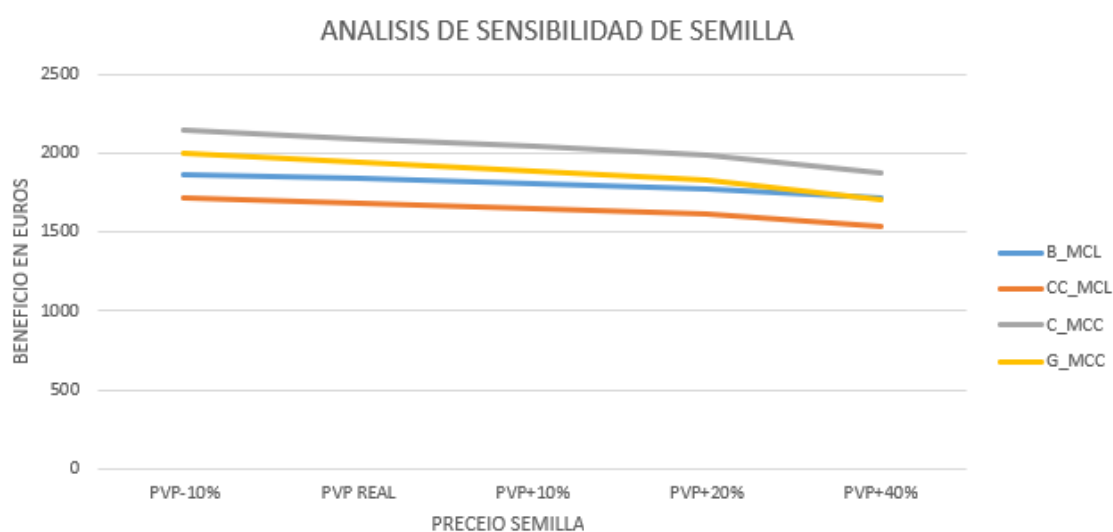


Figura 29: Beneficio de la explotación para cada tratamiento, teniendo en cuenta variaciones (del -10% al 80%) del precio del fertilizante. **Fuente:** Elaboración propia.

No obstante, en comparación con otros parámetros analizados previamente, el impacto del coste de semilla sobre la rentabilidad es relativamente limitado, mostrando un descenso reducido incluso en el escenario más desfavorable (B+40%).

De forma coherente con los análisis previos: C_MCC mantiene los valores más elevados en todo el rango de escenarios, consolidándose como la alternativa más rentable; G_MCC presenta un comportamiento cercano al de C_MCC, con menor dispersión entre escenarios; B_MCL y CC_MCL registran beneficios inferiores, destacando CC_MCL como la alternativa con mayor sensibilidad relativa ante este incremento de coste.

Las diferencias entre alternativas son menores que en los análisis de beneficio o gasóleo, lo que confirma que este parámetro no afecta de forma sustancial al posicionamiento económico relativo de las alternativas evaluadas.

Todas las opciones mantienen beneficios positivos incluso con aumentos del 40% en el coste de semilla, lo que refleja una alta estabilidad económica del sistema productivo frente a esta variación. Esto sugiere que una gestión eficiente de este insumo puede contribuir a la optimización del margen económico sin comprometer la viabilidad del cultivo.

El coste de la semilla tiene un impacto moderado sobre los resultados económicos. La alternativa C_MCC sigue siendo la más ventajosa económicamente, con G_MCC como alternativa sólida y estable. La estructura de costes de CC_MCL es la más vulnerable a incrementos del precio de semilla.

5.6. Discusión

Los resultados presentados reflejan incrementos de costes en las dobles cosechas frente a los cultivos únicos debidos al aumento de insumos aplicados, principalmente fertilizantes y semillas, pero también se incrementa el uso de fitosanitarios. En las otras partidas (laboreo y energía para el riego) no se observa ese aumento significativo de costes. Estos mayores costes se traducen en mayores ingresos en las dobles cosechas, especialmente en la combinación cebada-maíz, pero al analizar el beneficio neto, los beneficios del doble cultivo con leguminosa no difieren de la doble cosecha de cereales. Los análisis de sensibilidad han mostrado que son necesarios cambios drásticos en los costes de los insumos (incrementos superiores al 40%) para que alguna de estas tendencias varíe ligeramente. Se discute el gasto en fitosanitarios y en fertilizantes, así como el enfoque global al conjugar este análisis económico con los efectos ambientales de las alternativas.

5.6.1. Costes de fitosanitarios según tratamiento.

Con relación al gasto en fitosanitarios, los resultados de nuestro estudio indican que los tratamientos C_MCC y G_MCC presentan valores superiores a los observados en B_MCL y CC_MC que son prácticamente idénticos, lo que significa que los tratamientos con doble cultivo usan más fitosanitarios que los de cultivo simple.

En España no se disponen de datos a nivel nacional sobre el consumo de fitosanitarios por tipo de cultivo. No obstante, los Estudios de costes y rentas de las explotaciones agrarias (ECLA, s.f.) realizados de 2010 a 2015 recogen datos sobre gasto de fitosanitarios por hectárea en cultivos de maíz para las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Castilla La Mancha y Extremadura. Los datos disponibles del ECLA y del MAPA referidos al consumo de este insumo permiten afirmar que se ha producido una reducción de su consumo (principalmente fungicidas), tanto por hectárea, como por kg de maíz producido en el periodo analizado. A partir de los escasos datos disponibles, un estudio monográfico sobre los aspectos económicos y ambientales relacionados con el cultivo del maíz en España en los últimos 30 años (Fundación Instituto Cerdà, 2021) estima que la actividad obtentora permitió ahorrar entre 2011 y 2015 en el cultivo del maíz un total 614.280kgde fitosanitarios. Según los cuestionarios realizados, más de la mitad de las iniciativas desarrolladas actualmente en la mejora vegetal de este cultivo (un 53%) van encaminadas a este objetivo.

Según el informe específico de análisis de costes de modelos productivos de cultivos de herbáceos (MAPA, 2019), los costes fitosanitarios en este estudio superan a los costes estimados en explotaciones en España (inferiores a 0,010 €/kg de maíz producido) y son más similares a los de las explotaciones intensivas de otros países como USA, Italia o Brasil.

5.6.2. Costes de fertilizantes según tratamiento.

Continuando con los datos del informe anteriormente citado (MAPA, 2019) los costes de fertilización en este estudio (0,022 €/kg granos producido) ya se encuentran dentro de la horquilla de las explotaciones en España (0,015-0,025) y de otros países con modelos de

producción similares tanto europeos (Francia, Hungría, Polonia, Ucrania) como americanos (Brasil, Canadá y USA)

En nuestro estudio también se han observado diferencias importantes en el gasto en fertilizantes; son los tratamientos con doble cultivo (C_MCC y G_MCC) los que presentan valores significativamente superiores a los observados en los tratamientos de cultivo simple (B_MCL y CC_MC). Cabe destacar que el tratamiento C_MCC alcanza el mayor gasto medio: 488,55 € (2019), 543,69 (2020), 596,41 (2021). El porcentaje de gasto que supone este insumo para este tratamiento es del 25,29%, frente al 21,08% para el tratamiento G_MCC. Para los tratamientos B_MCL y CC_MC el gasto en fertilizantes supone el 19,45% y el 16% respectivamente.

El citado informe de la fundación Cerdà se hace eco algunos estudios europeos que indican que el consumo de fertilizantes para la agricultura ha ido disminuyendo de forma sostenida en las regiones mediterráneas. Aunque según datos del Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2020) para el total de la agricultura española, la tendencia en el consumo de fertilizantes se ha mantenido estable desde el 1990. Igual que en el caso de los fitosanitarios, tampoco para los fertilizantes hay datos en España a nivel nacional sobre el consumo de fertilizantes por tipo de cultivo. Los estudios del ECREA (2010-2015), citados en párrafos anteriores, recogen datos sobre gasto de fertilizantes por hectárea en cultivos de maíz para las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Castilla La Mancha y Extremadura. El informe de la fundación Cerdà recoge los análisis económicos de los sistemas de producción en Navarra donde se reflejan los datos de gasto de fertilizantes por hectárea en dicha comunidad autónoma. Teniendo en cuenta el gasto por hectárea y kg de fertilizante –según las estadísticas del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2020) –en este informe se calculó el consumo aproximado de fertilizante por hectárea cultivada de maíz –unos 250 kg/ha– así como del uso de fertilizantes por 100 kg de maíz producido que es de unos 2,5 kg. En relación con los fertilizantes, el informe Cerdà avanza unas conclusiones bastante cautas ya que, según los datos disponibles para su elaboración y la opinión del comité técnico, no se aprecia una reducción en su uso; no obstante, el 65% de las iniciativas de innovación desarrolladas actualmente tienen la disminución en el uso de fertilizantes como uno de sus objetivos.

El maíz a menudo se fertiliza en exceso para reducir el riesgo de pérdidas de rendimiento. Sin embargo, estudios como el de Jimenez-Aguirre et al. (2018) en zonas de riego en el Valle del Ebro muestran una tendencia significativa a reducir las tasas promedio de N aplicadas al maíz asociadas con el cambio de inundación (431 kg N ha^{-1}) a los sistemas de riego por aspersión más eficientes (338 kg N ha^{-1}). Afirman que, basándose en el concepto de balance de nitrógeno del cultivo, todavía existe potencial para mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno cuando se incorporan prácticas de gestión adecuadas para los fertilizantes nitrogenados. Los resultados de este informe avalan la viabilidad técnica de reducir las dosis reales de N utilizadas por los productores de maíz en condiciones de riego de alta productividad, manteniendo así los rendimientos y reduciendo los posibles efectos negativos del exceso de N en los agroecosistemas.

Frente a esta tendencia a sobre fertilizar con nitrógeno el cultivo del maíz, en un estudio de Isla y Quílez (2006) basado en los trabajos realizados por investigadores de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA (Gobierno de Aragón) en diversos polígonos de riego de Aragón, se apuntaba que una parte considerable del nitrógeno aplicado como fertilizante es lavado y arrastrado hasta los drenajes, con la consecuente merma económica y perjuicio medioambiental. Por tanto, la recomendación era que se debía evitar derrochar el fertilizante si se quería mejorar la competitividad del cultivo. En definitiva, se hacía necesario ajustar mejor las dosis de fertilizante nitrogenado. En la misma línea incide un estudio más reciente (Isla et al., 2020) que muestra los resultados de cinco experimentos de campo entre 2010 y 2012 que llevaron a cabo en dos zonas de producción de maíz de regadío de España (valle medio del Ebro y Castilla-La Mancha). Concluye que el ajuste de las dosis de fertilizaciones nitrogenadas redujo en un 38% de promedio la cantidad de N en el suelo.

En nuestro estudio los valores de eficiencia del uso del nitrógeno oscilan entre 57 (tratamiento C-MCC, año 2020) y 85 (tratamiento G-MCC, año 2019) kg de grano cosechado por cada kg de nitrógeno aplicado, pero la variabilidad de los resultados enmascara las diferencias entre tratamientos. Respecto a la respuesta económica al uso del nitrógeno, los valores oscilan entre 6,5 (tratamiento C-MCC, año 2020) y 15,1 (tratamiento CC-MCL, año 2021) euros ingresados respecto a los euros gastados en fertilización.

Salomó et al. (2016) presentan los resultados del ensayo de campo que llevaron a cabo en Algerri (Lérida) durante la campaña 2015-2016, después de cuatro años practicando el doble cultivo anual maíz-cebada. En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que existe un importante efecto residual del nitrógeno aplicado en el maíz sobre el cultivo de cebada siguiente, al menos en los sistemas de riego por aspersión. En este ensayo, el efecto del nitrógeno residual presente en el suelo después del maíz en rendimiento de grano de cebada se cifró en 4.470 kg ha⁻¹, el cual, en términos monetarios se traduce en 760 € ha⁻¹ (precio cebada=170 € t⁻¹). La conclusión es que, dentro del contexto de rotaciones anuales en regadío, la evaluación del nitrógeno residual después de la cosecha de un cultivo debe ser una herramienta de decisión que ayude a estimar la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo para el siguiente cultivo, y que, por tanto, no es necesario aplicarlo en forma de fertilizante. Esta práctica conllevaría un beneficio económico para la explotación y reduciría el riesgo de contaminación ambiental.

Un trabajo reciente sobre el doble cultivo leguminosas maíz en regadíos del Valle del Ebro en la provincia de Lérida abunda en las mismas conclusiones (Fernández-Ortega et al., 2023). El estudio se llevó a cabo durante tres temporadas consecutivas (2019, 2020 y 2021) en Agramunt. Los resultados indican que, en los agroecosistemas mediterráneos, el uso de sistemas de doble cultivo leguminosas-maíz junto con sistemas labranza 0 y reducción de la fertilización nitrogenada puede ser una buena estrategia para mantener el rendimiento de los cultivos, al mismo tiempo que se ahorra fertilizante nitrogenado y se mejora la eficiencia del uso del agua. Según sus resultados la rotación con leguminosas permite una reducción de la tasa de N necesaria para el cultivo posterior de 30 a 150 kg N ha⁻¹. Además, el crecimiento de la leguminosa ayudaría a movilizar el fósforo presente en el suelo mediante la liberación de ácidos carboxílicos de los exudados de la raíz. Por otra parte, las leguminosas no son susceptibles a las mismas plagas y enfermedades que los cereales, por lo tanto, pueden interrumpir el ciclo de

vida de los organismos patógenos, disminuyendo su aparición y/o severidad en el cultivo siguiente. Los resultados de este estudio han demostrado que el reemplazo del barbecho de invierno por una leguminosa aumenta los rendimientos del maíz mientras reduce el fertilizante N.

Fernández-Ortega (2024) en su investigación sobre el efecto de la introducción del doble cultivo leguminosa-maíz en zonas mediterráneas presenta unos resultados que demuestran como la sustitución del barbecho de invierno por el cultivo de leguminosas aumenta los rendimientos de maíz. Aparte de sus beneficios ambientales, están los económicos: el empleo de leguminosas en sistemas de doble cultivo leguminosa-maíz, han permitido la reducción de la fertilización mineral nitrogenada necesaria para el cultivo de maíz, lo cual supone un ahorro. Esta reducción de la fertilización, además de afectar positivamente a la rentabilidad de la explotación, ha sido comprobada por muchos autores como una de las principales soluciones para evitar la contaminación de los recursos hídricos durante la escorrentía y percolación de aguas cargadas con N.

5.6.3. Monocultivo del maíz frente a dobles cultivos: aspectos económicos y ambientales.

Los resultados de nuestro estudio han demostrado que existen variaciones sustanciales de rentabilidad entre los diferentes sistemas de manejos ensayados. Los tratamientos de doble cultivo tienen mayor rentabilidad económica que los de cultivo simple.

Los resultados combinados de las variables contempladas – labores, energía para la aspersión, productos fitosanitarios, fertilizantes y semilla– muestran diferencias significativas en cuanto al gasto total: los dos tratamientos de cultivo simple presentan valores más bajos frente a los de doble cultivo (cebada-maíz y guisante-maíz). En un estudio centrado en los cultivos de trigo, cebada, colza y guisante en las zonas del entorno del Canal Segarra-Garrigues, provincia de Lérida (Lloveras y Cabases, 2015) se estimaron, a partir de encuestas a los agricultores, los costes de producción de la cebada y el guisante en regadío en monocultivo y en el sistema de doble cultivo (cebada-maíz y guisante-maíz). En este caso la comparación de los costos de dobles cultivos no era respecto al maíz en monocultivo sino a la cebada y al guisante y los resultados difieren: la cebada en monocultivo suponía unos costes totales de 968 €/Ha., mayores que en doble cultivo (831 €/Ha). En cuanto al guisante los costes totales eran de 1.102 €/ha. en monocultivo y 997 €/ha. en doble cultivo.

En relación con los ingresos (€/ha.), en nuestro estudio se aprecian diferencias significativas entre los tres periodos evaluados (los mayores ingresos corresponden al año 2021 y los menores al año 2020). Respecto a los ingresos por tratamiento, el tratamiento cebada-maíz presenta la media de ingresos más elevada, mientras que guisante-maíz muestra valores ligeramente inferiores, aunque también significativamente mayores que los tratamientos de cultivo simple, los cuales no presentan diferencias significativas entre sí. Este mismo patrón, la variación interanual y por tipo de tratamiento, se observa en los beneficios: cebada-maíz presentó el mayor beneficio medio interanual, diferenciándose significativamente del resto de tratamientos. Guisante-maíz mostró valores intermedios, compartiendo grupo homogéneo con barbecho-maíz, mientras que veza-maíz registró el menor beneficio medio. La relación coste-

ingresos permite concluir que los sistemas diversificados resultan más rentables que los de monocultivo.

Respecto a la rotación de maíz-cebada, se cuenta con bastantes estudios que aconsejan esta práctica para incrementar los rendimientos totales con la doble cosecha. En el Valle del Ebro, algunos autores (Gil, 2013) establecen que los márgenes brutos del doble cultivo de cebada-maíz respecto al monocultivo de maíz pueden experimentar un incremento entre un 13% y un 22%. En base a resultados experimentales –ensayos en Alguerri, Lérida– (Maresma et al., 2016) se puede concluir que la doble cosecha cebada-maíz es una alternativa que puede ayudar a rentabilizar los regadíos: la suma de las dos cosechas, supone aumentar en torno a un 15-20% el rendimiento de grano de una cosecha única de maíz.

Pero a la hora de valorar las diferentes alternativas al monocultivo de maíz, es importante tener en cuenta no solo la rentabilidad económica, también deben entrar en juego las cuestiones medioambientales. Actualmente la mayoría de los agro-sistemas responden a una fuerte especialización que, combinada con un uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y otros insumos, ha permitido aumentar los rendimientos. Esto es lo que ha ocurrido en el Valle del Ebro con el monocultivo de maíz en regadío, pero hay que tener en cuenta que este sistema es uno de los más demandantes de fertilizantes nitrogenados. En nuestro trabajo tratamos de evaluar este aspecto con los indicadores de eficiencia: en el uso del nitrógeno (EUN) y en la respuesta económica al uso del nitrógeno (REUN), interpretamos la ausencia de diferencias significativas para los dos indicadores utilizados bien como que el nitrógeno que se aplica está bien ajustado y es igual de eficiente en todos los tratamientos o bien que no hemos sido capaces de detectar diferencias en esas eficiencias por la alta variabilidad de nuestros resultados.

Empieza a estar ampliamente aceptado que los índices ambientales deben agregarse a los resultados económicos. Tal y como señala Gil (2013) en la comparación del sistema de monocultivo de maíz con el de rotación maíz-cebada en las comarcas de nuevos regadíos de Aragón (Monegros, Cinco Villas) hay que considerar conceptos agronómicos, económicos y ambientales, señalando sus relaciones y valorando los resultados de forma conjunta.

Algunos autores (Fernández-Ortega, 2024) señalan que la diversificación de cultivos basada en la doble cosecha maíz-cebada busca sobre todo la mejora de la rentabilidad económica pero es poco sostenible desde el punto de vista ambiental. Por eso se apunta a la necesidad de explorar los dobles beneficios, tanto económicos como ambientales, de la alternancia maíz-leguminosas. En este sentido el cambio del cultivo de invierno, de un cereal a una leguminosa para producción de grano (veza o guisante), puede tener la ventaja del aporte extra de Nitrógeno en sus restos al cultivo de maíz, permitiendo un menor empleo de fertilización mineral de N, la mejora del uso del N por el maíz y la reducción de la pérdida de nitratos por lixiviación durante el invierno, gracias a la captura del N mineral por el tejido vegetal del cultivo secundario.

Otros autores Khushboo et al. (2025) utilizan otros indicadores ambientales que quizás podrían detectar mejor si hay cambios con las alternativas analizadas.

Sin embargo, falta una comprensión más amplia e integral de si la diversificación de cultivos afecta, y en qué medida, a la rentabilidad económica; es decir, si resulta o no una alternativa económicamente viable para las empresas agrícolas (Yang et al., 2023). Para dar respuesta a

estas cuestiones estos autores realizaron un estudio experimental en Quzhou al norte de China, con datos recopilados entre 2020 y 2022. En esta zona domina un sistema de rotación de trigo de invierno y maíz de verano. Junto a este sistema convencional en el estudio se ensayaron cinco más, uno de monocultivo de maíz, y el resto de diversificación de cultivos, bien dos cultivos dentro de un año o bien tres cultivos en dos años. Para cada uno de ellos se aplicaron una serie muy amplia de variables que finalmente se sintetizaron en cinco grandes grupos, contemplando aspectos ambientales y también económicos: la salud del suelo, la biodiversidad, la regulación del clima, la producción de alimentos y la rentabilidad económica.

Los resultados indican que los sistemas más diversos (es decir, los sistemas de tres cultivos en dos años) presentan un mayor equilibrio entre la rentabilidad económica y los aspectos medioambientales. En concreto estos sistemas de triple rotación a dos años fueron trigo de invierno-maíz de verano-maíz de primavera y trigo de invierno-soja de verano-maíz de primavera. Entre estos dos sistemas el de rotación trigo-soja-maíz una producción intermedia en comparación con los otros cinco sistemas de cultivo, como resultado de unos rendimientos relativamente moderados, pero una mayor fijación de nitrógeno por la presencia de una leguminosa (soja). El estudio concluye que la diversificación por rotación de cultivos es potencialmente ventajosa para mejorar la economía agrícola y mejorar también el medio ambiente por sus efectos beneficiosos sobre la salud del suelo y la regulación del clima, sin comprometer la provisión de producción alimentaria y la rentabilidad económica. Sin embargo, se expresa también una cierta reserva ante estas conclusiones, porque quizá ambos aspectos – económicos y ambientales– no siempre puedan ser compatibles. Además, se avisa de que los resultados de este estudio podrían cambiar en diferentes condiciones de suelo y clima, por lo que se necesitan más estudios para generalizar estas conclusiones.

Un reciente estudio (Khakbazan et al., 2025) sobre la efectividad económica de varios sistemas de cultivo en alternancia cuatrienal en tres zonas de Canadá, afirma que los sistemas diversificados con cereales y cultivos alternativos se convierten en la mejor opción sobre todo si los precios de los fertilizantes aumentan y los del resto de costos se mantienen estables. En este estudio, aunque el ‘sistema impulsado por el mercado’ produjo los mayores rendimientos netos de los seis sistemas comparados, el diversificado tuvo un rendimiento similar al de los dos siguientes, pero recibió entre un 40 y un 50% menos de fertilizante nitrogenado que el resto de sistemas. El estudio concluye que el sistema diversificado es competitivo y que puede haber margen para reducir el uso de N sin pérdidas económicas significativas.

También el proyecto de investigación en la que se inscribe este TFM (Zugasti-López et al., 2024) avanza algunas conclusiones de cara a la valoración económica de los diferentes tipos de manejos del cultivo del maíz, aunque la valoración económica no es el objeto de este proyecto. En síntesis, se contemplan las siguientes:

- La introducción del cultivo de cobertura de invierno no incrementó la cosecha posterior de maíz en comparación con el barbecho de invierno.

- El sistema de doble cultivo de cebada-maíz a pesar del significativo incremento en el rendimiento de grano obtenido requiere 100 kg adicionales de fertilizante N por hectárea.

-Las posibles reducciones de la dosis de fertilizante N en el sistema de doble cultivo de guisante-maíz y la introducción de un valioso cultivo de leguminosas hacen de este sistema una opción interesante para aumentar la diversificación de los agrosistemas de regadío basados en el maíz sin incrementar las emisiones de GEI.

En nuestro estudio el tratamiento cebada-maíz presenta el mayor beneficio en los tres años contemplados, diferenciándose significativamente del resto de tratamientos. Guisante-maíz muestra valores intermedios, compartiendo grupo homogéneo con barbecho-maíz, mientras que veza-maíz registra el menor beneficio. También el análisis de sensibilidad para analizar la rentabilidad frente a variaciones en los precios tanto de los inputs como de los outputs del sistema, muestra que, en cuanto a los ingresos por precio de venta, la alternativa cebada-maíz resulta la opción más rentable, es la que alcanza los valores más elevados en el conjunto de escenarios analizados seguida de guisante-maíz. Sin embargo, atendiendo a la necesidad de establecer un equilibrio entre beneficios económicos y ambientales, podemos concluir que aunque el tratamiento cebada-maíz es el que presenta mayores beneficios, sería la otra opción de doble cultivo –guisante-maíz– la que cumpliría mejor con esta exigencia; es la segunda opción en cuanto a rentabilidad económica, pero requiere menor aporte de fertilizantes.

6. CONCLUSIONES

- Los resultados del estudio permiten afirmar que un mayor nivel de inversión en labores e insumos va acompañado de un retorno económico significativamente superior, especialmente cuando las condiciones de mercado son favorables.
- En las condiciones de este trabajo, los costes de laboreo y de energía para la aspersión suponen entre el 40% y el 50% de los costes de producción, pero sin diferencias significativas por la diversificación de cultivos ensayada.
- Las alternativas más intensivas (con dobles cultivos) si que suponen un incremento significativo del coste de los insumos (fertilizantes, fitosanitarios y semillas). Estos incrementos de costes también producen unos mayores ingresos en esos tratamientos.
- Con el doble cultivo cebada-maíz se obtienen, significativamente, más ingresos que con el doble cultivo guisante-maíz, sin embargo, los beneficios no son significativamente diferentes.
- Basándose exclusivamente en los beneficios, los dos dobles cultivos ensayados mejorarían la rentabilidad de las explotaciones. Los indicadores de eficiencia utilizados tampoco detectan diferencias en el uso del nitrógeno de estas dos alternativas.
- Tanto en los ingresos como en los beneficios hay un significativo efecto del año de cosecha, debido principalmente al precio de venta de los productos obtenidos. Los índices de eficiencia del uso del nitrógeno analizados no muestran diferencias significativas entre los tratamientos, lo que refleja que los mayores aportes de fertilizante en las diversificaciones más intensivas los utilizan de manera eficiente los cultivos.
- En el análisis de sensibilidad, el cultivo de cubierta siempre presenta los menores beneficios, y el doble cultivo cebada-maíz los mayores. Sin embargo, los otros dos tratamientos (doble cultivo guisante-maíz y monocultivo de maíz) son más sensibles a los cambios. Concretamente es más beneficioso el doble cultivos con leguminosa cuando se incrementan los precios de venta del producto, y se igualan los ingresos cuando se incrementa el coste de los insumos (carburante, fertilizantes y semillas)
- En resumen, el factor externo que más contribuye en la rentabilidad de las explotaciones con cultivos de maíz es el precio de venta del producto. La diversificación con dobles cosechas, tanto de gramíneas como de leguminosas, supone un aumento de los costes, de los ingresos y de los beneficios. Y los indicadores ambientales quizás no han sido los más indicados para encontrar el efecto de la diversificación en la sostenibilidad de estos sistemas.

7. BIBLIOGRAFIA

- Agróptima (2019). *Diversificación de cultivos. Estrategias para mejorar tu rentabilidad*. Guía Agróptima. https://landings.agroptima.com/diversificacion-cultivos?utm_campaign=ebook-diversification&utm_medium=referral&utm_source=profesionalagro.com
- ANFFE (2021). *Macromagnitudes Sectoriales 2020*. Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes. <http://www.anffe.com/informaci%F3n%20sectorial/macromagnitudes%20sectoriales/2020/index.html>
- Apesteguía, M.; Delgado, J. & Orcaray, L. (2017). "Uso de abonos orgánicos para el cultivo del maíz". *Navarra Agraria*, 221, pp. 30-34. <https://navarraagraria.com/categories/item/1280-abonos-maiz>
- Comisión Europea (2019). *De la granja a la mesa: el Pacto Verde Europeo*. Oficina de Publicaciones. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/80994>
- Comisión Europea (s.f.). *Estadísticas de cereales*. Departamento de Agricultura y Desarrollo Rural de la Comisión Europea. https://agriculture.ec.europa.eu/data-and-analysis/markets/overviews/market-observatories/crops/cereals-statistics_es
- Datos macro (s.f.). *España. Precios de la electricidad de los hogares*. Expansión/Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-precio-hogares/espana>
- ECREA (s.f.). *Estudios de costes y rentas de las explotaciones agrarias*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/financiacion-fiscalidad-estudio-costes/ecrea/>
- ESRYCE (2025). *Encuesta de superficies y rendimientos de cultivos en España. Resultados 2024*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/default.aspx>
- FAO (2015). *Ahorrar para crecer en la práctica. Maíz, arroz, trigo. Guía para la producción sostenible de Cereales*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4009s>
- FAOSTAT (s.f.). *Statistica ldata base*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fernández-Ortega, J. (2024). *Diversificación de cultivos, optimización de la fertilización nitrogenada y manejo del suelo para la reducción de gases de efecto invernadero y el mantenimiento de la productividad en agroecosistemas de regadío en zona mediterránea*. Universitat de Lleida. <http://hdl.handle.net/10803/690816>

- Fernández-Ortega, J.; Álvaro-Fuentes, J. & Cantero-Martínez, C. (2023). "The use of double-cropping in combination with no-tillage and optimized nitrogen fertilization reduces soil N₂O emissions under irrigation". *Science of the Total Environment*, 857-2 (109017). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159458>
- Franco-Luesma; S.; Lafuente, V.; Alonso-Ayuso, M.; Bielsa, A.; Kouchami, I.; Arrúe, J.L. & Alvaro-Fuentes, J. (2022). "Maize diversification and nitrogen fertilization effects on soil nitrous oxide emissions in irrigated mediterranean conditions". *Frontiers in Environmental Science*, 10 (914851). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.914851>
- Fundación Institut Cerdà (2021). *Aportación social, económica y ambiental del sector obtentor al cultivo, distribución y consumo del maíz*. ANOVE (Asociación Nacional de Obtentores Vegetales). <https://www.anove.es/wp-content/uploads/2021/11/Documento-Maiz-vF2.pdf>
- Gabriel, J.L.; Martín, D.; Allende, R.; Delgado, M.M. & Rodríguez-Martín, J.A. (2022). "Análisis de la producción de maíz en España". *Avances en ciencias e ingenierías*, 14 (1). <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/2468/2933>
- Gil, M. (2013). "Cebada y maíz rastrojero: Productividad económico-ambiental de la fertilización con purín". *Informaciones Técnicas Agrarias*, 245 (febrero 2013). Dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón. https://bibliotecavirtual.aragon.es/repos/i18n/publicaciones/numeros_por_mes.do?idPublicacion=17405&anyo=2013
- Gutiérrez, M; Escartín, J. & Gazol, L. (2025). "Transferencia de resultados de la red de ensayos de maíz y girasol en Aragón. Campaña 2024". *Informaciones Técnicas Agrarias*, 291. Dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón. https://www.aragon.es/documents/d/guest/it_291_25
- IRTA (2007). "Contribución de la mejora genética al incremento de los rendimientos del maíz en Cataluña". *Dossier Tècnic*, 19, pp. 3-10. Departamento de Agricultura, Alimentación y Acción Rural de la Generalitat de Cataluña. https://ruralcat.gencat.cat/c/document_library/get_file?uuid=705c5320-bbcc-45a6-9d86-20cbdaddbfe1&groupId=20181
- Isla, R. y Quílez, D. (2006) "Cultivo de maíz y fertilización nitrogenada: ¿es posible compatibilizar la rentabilidad y la protección del medio ambiente?". *Surcos de Aragón*, 100, pp. 26-30. https://www.researchgate.net/publication/284157344_Cultivo_de_maiz_y_fertilizacion_nitrogenada_es_posible_compatibilizar_la_rentabilidad_y_la_proteccion_del_medio_ambiente
- Isla, R. y Quílez, D. (2011). "Fertilización del maíz en riego por aspersión". *Gestión eficaz del riego por aspersión. Últimos avances técnicos y medioambientales*. Monográfico Riegos del Alto Aragón (II Jornada Técnica), pp. 14-17. <http://hdl.handle.net/10532/1609>
- Isla, R.; Valentín-Madrona, F.; Maturano, M.; Aibar, J.; Guillén M. & Quílez, D. (2020). "Comparison of different approaches for optimizing nitrogen management in sprinkler-

- irrigated maize". *European Journal of Agronomy*, 116. https://digital.csic.es/bitstream/10261/210739/1/QuilezD_JEuropAgron_2020.pdf
- Jiménez-Aguirre, M.T.; Isidoro, D. & Usón, A. (2018). "Soil variability in La Violada Irrigation District (Spain): I Delineating oil units for irrigation". *Geoderma*, 311, pp.78-90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.025>
- Khakbazan, M.; Liu, K.; Entz, M.; Chau, H.; Kubota, H.; Tidemman, B.; Peng, G. & Lokuruge, P. (2025). "Comparing economics and nitrogen fertilizer costs between diversified and intensified cropping systems in western Canada". *Canadian Journal of Plant Science*, 105, pp. 1-17. <https://hdl.handle.net/1807/150971>
- Khushboo, D.; Babu, S.; Rathore, S; Rag, R.; Pandey, A.; Gairola, A.; Kumar, V.; Yeasin, M. & Singh, R (2025). "Achieving economic and environmental stewardship in maize farming through legume integration and nitrogen management: impact on productivity-profitability-energy-carbon footprints". *Environmental and Sustainability Indicators*, 28 (100934). <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100934>
- LegSapiens (2023). *Guía de campo sobre el cultivo de leguminosas de consumo humano*. Grupo Operativo Generando Oportunidad (LegSapiens) https://legsapiens.es/recursos/PDF_A5_LEGSAPIENS_COMPLETO_BN.pdf
- Lloveras, J. y Cabases, M.A. (2015). "Costes de producción de cultivos extensivos en secano y regadío". *Vida Rural*, 401, pp. 38-47. <http://hdl.handle.net/10459.1/64609>
- Lloveras, J. (1987). "Forage production and quality of several crop rotations and pastures in Northwestern Spain (Galicia)". *Grass and Forage Science*, 42, pp. 241-247. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2494.1987.tb02112.x>
- MAPA (2019). *RENGRATI. Análisis de los costes del modelo de producción de España frente a la UE y terceros países*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/sectores-ganaderos-2/rengrati/jornada-internacionalizacion/informes/rengrati_analisisdecostesligadosalmodeloeuropeodeproduccion.pdf
- MAPA (2020). *Anuario de Estadística 2019*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2019>
- MAPA (2024 a). *Anuario de Estadística 2023*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2023/global%202023/ANUARIO_2023.pdf
- MAPA (2024 b). *Índices y precios pagados agrarios. Octubre*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://cpage.mpr.gob.es/producto/indices-y-precios-pagados-agrarios-58/>

- MAPA (2025). *Superficies y producciones anuales de cultivos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/>
- MAPA (s.f. a). *Evolución de los precios de los principales cereales*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/cereales/evolucion-de-los-precios-de-los-principales-cereales>
- MAPA (s.f. b). *Estadística costes de producción de cultivos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://preservicio.mapama.gob.es/eu/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/maquinaria-agricola/costes-cultivos>
- Maresma, A.; Santiveri, F.; Michelena, A. & Lloveras, J. (2016). "Optimización de la fertilización nitrogenada en sistemas de doble cultivo maíz-cebada Una alternativa ambiciosa que puede ayudar a rentabilizar los regadíos del Valle del Ebro" *Vida rural*, 15, pp. 28-34. <http://hdl.handle.net/10459.1/64612>
- Martínez de la Cuesta, E. (2015). "La fertilización nitrogenada del maíz y el nitrógeno residual del suelo". *Vida Rural*, 390, pp. 46-52. <http://hdl.handle.net/10459.1/64629>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (s. f.). *Variación del precio del gasóleo en España*. https://apps.fomento.gob.es/precio gasoleo/angular_proyecto/client/gasoleoCambio
- OECD/FAO (2020), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029*. Organisation for Economic Co-operation and Development/ Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>
- Real Decreto 916/2025, de 14 de octubre, por el que se modifican diversos reales decretos en materia de Política Agrícola Común. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2025/10/14/916>
- Red ARAX (2025). *Dossier técnico de la campaña de Maíz y Girasol, Arroz y Trigo Sarraceno*. Red Aragonesa de Cultivos Extensivos y Leguminosas. <https://www.redarax.com/documentacion/>
- Salomó, J.; Martínez, E.; Maresma, A. & Lloveras, J. (2016). "Efecto residual de la fertilización nitrogenada del maíz sobre la cebada posterior en regadío". *Tierras agricultura*, 245, pp. 44-51. https://www.researchgate.net/publication/312834754_Efecto_residual_de_la_fertilizacion_nitrogenada_del_maiz_sobre_la_cebada_posterior_en_regadio.
- Vida rural (2023). *Especial Ecorregímenes*. <https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/reforma-de-la-pac/plan-estrategico-pac-post-2020/documentos/especial-mapa-vida-rural.pdf>
- Yang, X.; Delgado-Vaquerizo, M.; Niu, Y.; Christie, P.; Chen, J. Hu, H. & Chen, Y. (2023) "Optimizing cropping systems to close the gap between economic profitability and

environmental health" *New Phytologist*, 240, pp. 2498-2512
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.19310>

Zhao, X.; Cui, H.; Wang, Y.; Sun, C.; Cui, B. & Zeng, Z. (2018). "Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), pp. 6504-6512. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02004>

Zugasti-López, I., Cavero, J., Clavería, I., Álvaro-Fuentes, J., & Isla, R. (2024). Alternatives to maize monocropping in Mediterranean irrigated conditions to reduce greenhouse gas emissions. *The Science of the Total Environment*, 912 (169030).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169030>