



# Adaptación sostenible al cambio climático en cereales de invierno



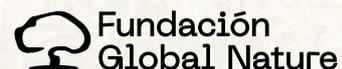
Con el apoyo de:



VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Organiza:



# CRÉDITOS

## PUBLICACIÓN:

Adaptación sostenible al cambio climático en cereales de invierno

Cómo citar este documento: Llorens, M., Pajares, M. (2025). Adaptación sostenible al cambio climático en cereales de invierno. Fundación Global Nature

## FECHA DE EDICIÓN:

2025

## AUTORÍA DE LA PUBLICACIÓN:

Maite Llorens y Miriam Pajares de Fundación Global Nature

## DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

Natalia Martín

## CON EL APOYO DE:



AgriAdapt\_Canari cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030).

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.

# Índice

<b>01. Agricultura y adaptación al cambio climático</b>	<b>04</b>
<b>02. Barreras para la adaptación en el sector agrario</b>	<b>06</b>
<b>03. Herramientas para la adaptación: CANARI</b>	<b>08</b>
<b>04. Cereales de invierno y cambio climático</b>	<b>12</b>
<b>4.1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS CEREALES DE INVIERNO</b>	<b>13</b>
4.1.1. Influencia en la fenología y el rendimiento en el cultivo	13
4.1.2. Estrés abiótico en el cultivo del cereal	15
4.1.3. Estrés biótico: plagas y enfermedades de los cereales y su relación con el cambio climático	20
<b>4.2. SELECCIÓN DE INDICADORES AGROCLIMÁTICOS (IACs)</b>	<b>21</b>
<b>4.3. CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS CEREALES DE INVIERNO</b>	<b>24</b>
<b>05. Estrategias de adaptación al cambio climático en cereales de invierno</b>	<b>27</b>
<b>5.1. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN</b>	<b>29</b>
5.1.1. Medidas de adaptación a corto plazo	30
5.1.2. Medidas de adaptación a medio plazo	50
5.1.3. Medidas de adaptación a largo plazo	71
<b>06. Bibliografía</b>	<b>76</b>

# Agricultura y adaptación al cambio climático

# 01

# Agricultura y adaptación al cambio climático

El sector agrario es clave en la economía española por su aporte al PIB, la generación de empleo y la sostenibilidad del medio rural. España cuenta con más de 23 millones de hectáreas de superficie agraria útil, casi la mitad del territorio, de las cuales 17 millones son tierras de cultivo. Su vasta extensión, moldeada por una geografía diversa, da lugar a una agricultura rica y variada, donde el clima, la topografía y los suelos definen las particularidades de los distintos tipos de cultivo en cada territorio. La estrecha relación de la agricultura con el entorno natural y su constante exposición a las condiciones meteorológicas, convierten al sector en uno de los más vulnerables frente al cambio climático, ya que, factores como las olas de calor, los fenómenos hídricos extremos o las heladas impactan directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Además, la variación de las condiciones climáticas puede influir en los precios y la rentabilidad, e incluso afectar a la capacidad de competir en un mercado cada vez más globalizado y exigente en términos de calidad.

La importancia económica y cultural de la agricultura ha impulsado un profundo interés científico en estudiar el impacto del cambio climático sobre los

cultivos y la producción. Las tendencias climáticas observadas durante las últimas décadas han motivado la realización de numerosos estudios, proporcionando una base sólida de conocimiento sobre cómo las variaciones en las temperaturas, las precipitaciones y otros fenómenos climáticos afectan a la calidad, productividad y sostenibilidad de los cultivos. En este contexto, entender los posibles impactos del cambio climático en un territorio específico es un aspecto clave, ya que permite al sector anticiparse y desarrollar estrategias de adaptación que minimicen los efectos negativos, garantizando de este modo la sostenibilidad de la producción agrícola a largo plazo. Sin embargo, fomentar la adaptación al cambio climático en el sector agrícola, y especialmente la implementación de medidas de adaptación, requiere de dos componentes estratégicos fundamentales, tal como se establece en el **PNAC 2021-2030**. Por un lado, la generación de conocimiento, que demanda recursos para el diseño y evaluación de estrategias y medidas de adaptación. Por otro, la movilización de actores, tanto del sector público como privado, para garantizar su implicación activa y consciente a través de la información, la divulgación, la capacitación, la investigación, la innovación y la participación social.



A close-up photograph of a hand holding a small amount of seeds, likely wheat or barley, against a warm, orange-toned background. The hand is positioned on the left side of the frame, with the palm facing upwards. The seeds are scattered in the palm and are in sharp focus. The background is a soft, out-of-focus landscape with a warm, golden-orange hue, suggesting a sunset or sunrise over a field. The overall composition is centered and balanced, with the text overlaid on the right side of the image.

# Barreras para la adaptación en el sector agrario

# 02

# Barreras para la adaptación en el sector agrario

En términos generales, más allá del ámbito de la agricultura, existen barreras técnicas, socioeconómicas y tecnológicas que dificultan la acción frente al cambio climático. A estas limitaciones estructurales se suman los obstáculos psicológicos, que a menudo escapan al control individual y que influyen en la inacción. Uno de los principales ejemplos es el hecho de que el cerebro humano está diseñado para responder a problemas inmediatos, por lo que los desafíos a largo plazo, como el cambio climático, son difíciles de procesar. A esto se suma el hecho de que muchas personas desconocen la magnitud del problema o no saben cómo actuar de manera efectiva, lo que dificulta la implementación de estrategias adecuadas de adaptación. Además, la percepción de que el riesgo es lejano ya sea en el tiempo o en el espacio, reduce la urgencia de tomar medidas. Otros factores como el sesgo del optimismo, que lleva a pensar que los efectos serán menos graves en nuestro entorno cercano, la falta de control personal, creencias ideológicas y la sensación de que otros no actúan de manera responsable, también influyen en cómo las personas perciben el cambio climático y en su disposición a tomar medidas para enfrentarlo. Finalmente, las comparaciones sociales y la creencia

de que el cambio depende de otros o de soluciones tecnológicas disminuyen aún más la urgencia de actuar, limitando la motivación para implementar acciones a corto plazo frente a los efectos del cambio climático.

Por tanto, para impulsar la implementación de medidas de adaptación en el sector agrario, es crucial identificar y comprender las barreras existentes, así como obtener una visión precisa de cómo el sector percibe el cambio climático. En este marco, los procesos participativos permiten a las personas afectadas o interesadas la oportunidad de presentar y defender sus intereses en un espacio colectivo, siendo esenciales para lograr una adaptación justa y equitativa. El informe **"Percepción del Cambio Climático en el sector agrario español"**, realizado en el marco del proyecto **AgriAdapt**, presenta los resultados obtenidos en los talleres participativos realizados junto al sector, ofreciendo una visión detallada de la percepción sobre los impactos del cambio climático en la actividad agrícola a través de cinco estudios de caso: cereales y viñedos en Navarra, olivares, frutos secos y viñedos en la Comunidad Valenciana, y olivares en Castilla-La Mancha.





# Herramientas para la adaptación: CANARI

# 03

# Herramientas para la adaptación: CANARI

Las proyecciones climáticas constituyen información nueva y son puntos de partida clave para los enfoques de adaptación del sector agrario. Sin embargo, estos datos siguen siendo en gran parte desconocidos para los grupos de interés del sector, debido a su difícil acceso o interpretación fuera de la comunidad climática. Por ello, es imprescindible desarrollar herramientas de transferencia que faciliten la integración del cambio climático en la toma de decisiones y en los procesos productivos del sector agrario.

La herramienta **CANARI** es una plataforma web innovadora que proporciona acceso rápido y directo a más de un centenar de Indicadores AgroClimáticos (IACs), diseñados para apoyar al sector agrario en la toma de decisiones informadas frente a los desafíos del cambio climático. El portal CANARI, desarrollada por Solagro junto a Makina Corpus, con el apoyo científico del IPSL (Institut Pierre Simon Laplace); la unidad MARS del JRC (Centro Común de investigación de la Unión Europea) y el equipo del proyecto LIFE AgriAdapt, con la colaboración de Fundación Global Nature, tiene como objetivo ofrecer proyecciones climáticas personalizadas para cualquier punto de Europa, facilitando la evaluación de riesgos y oportunidades para el sector agrícola en diversos contextos climáticos. CANARI permite calcular IACs que abordan las necesidades específicas de distintas tipologías de cultivo y sectores agrarios, con una alta resolución geográfica (12,5 km de longitud de cuadrícula). Los indicadores abarcan dos periodos clave: el Futuro Próximo (2020-2050) y el Futuro Lejano (2050-2100), utilizando un enfoque basado en modelos múltiples para evaluar diferentes escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5). De este modo, los IACs reflejan la evolución de la "presión climática" al

comparar un período de referencia con uno futuro, proporcionando información clave sobre cómo el cambio climático afectará a la agricultura en un territorio específico. La información proporcionada por CANARI sirve como punto de partida para el diseño de medidas de adaptación específicas para cada contexto local, orientadas a minimizar los efectos esperados del cambio climático y fortalecer la resiliencia del sector agrícola.

La herramienta CANARI permite el cálculo de IACs en 4 sencillos pasos accesibles desde la página de inicio de la aplicación (**Figura 1**), haciendo clic en el botón amarillo "Cálculo de IAC".

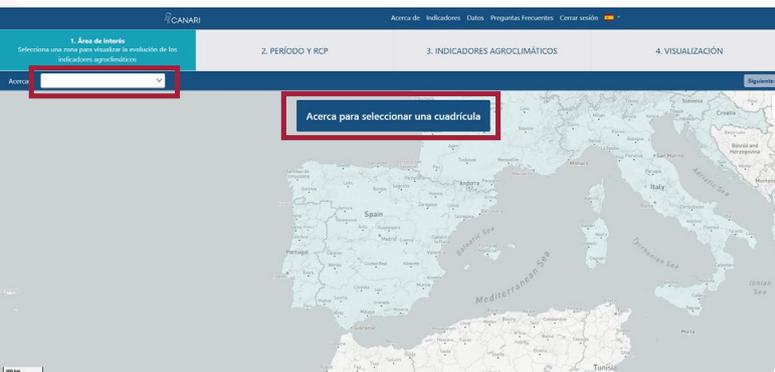


**FIGURA 1.** Página de inicio de CANARI.

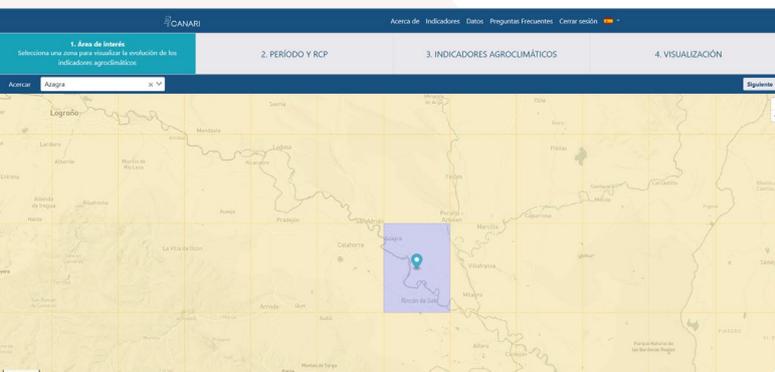
## 1.1. SELECCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA Y CUADRÍCULA DE INTERÉS

El primer paso es ingresar a una entrada cartográfica, donde el usuario puede buscar un municipio por nombre o utilizar el zoom para acercarse a la ubicación de interés (**Figura 2**).

Una vez seleccionada el área de interés, se muestran las cuadrículas de aproximadamente 12 km de lado. El usuario podrá seleccionar la cuadrícula de interés haciendo click sobre ella (**Figura 3**).



**FIGURA 2.** Entrada cartográfica para la búsqueda de área geográfica en CANARI.



**FIGURA 3.** Selección de cuadrículas de interés.

## 1.2. SELECCIÓN DEL PERIODO FUTURO Y ESCENARIO DE EMISIONES GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

El segundo paso es seleccionar el período de tiempo, futuro cercano (2020-2050) y/o lejano (2050-2100) y el escenario de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (RCP 4.5 o RCP 8.5). Al hacer clic en la opción elegida, el período seleccionado se resalta en azul (**Figura 4**).



**FIGURA 4.** Selección de periodo y escenarios en CANARI.

## 1.3. SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE UN IAC

El tercer paso es seleccionar un indicador. CANARI ofrece un conjunto de indicadores agroclimáticos clasificados según la variable climática de interés (indicadores generales) o el cultivo de interés (indicadores agroclimáticos) (**Figura 5**).

Dentro de un apartado, el usuario puede elegir uno de los indicadores propuestos con un clic. Al seleccionar el indicador, aparece en azul a la derecha una descripción y los cálculos correspondientes. Además, se puede ajustar el período y el umbral de cálculo si es necesario, especificando las fechas de inicio y finalización (**Figura 6**).



FIGURA 5. Indicadores disponibles en CANARI.

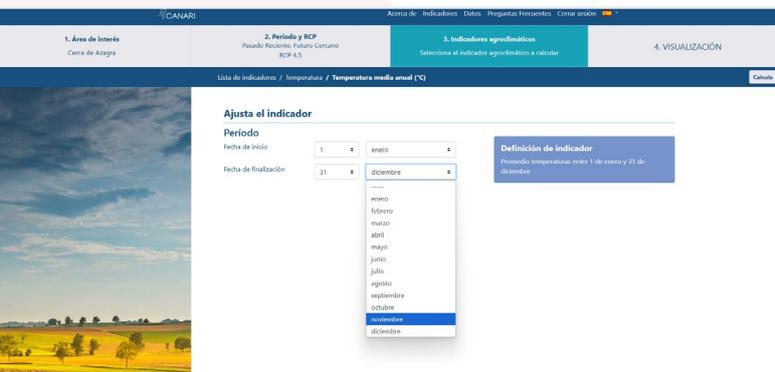


FIGURA 6. Selección y ajuste de IACs.

## 1.4. VISUALIZACIÓN DEL IAC

Por último, CANARI permite la visualización de los resultados en tres formatos (Figura 7). En forma de gráfico, se presenta un friso cronológico continuo que muestra la evolución del indicador hasta el horizonte del futuro seleccionado, incluyendo las simulaciones y su promedio. En forma de diagrama de cajas, que muestra la mediana, los valores centrales y los "bigotes" que representan el 5% de los valores extremos, y, finalmente, en forma de tabla que puede ser descargada en formato .csv para el posterior análisis de los datos brutos.

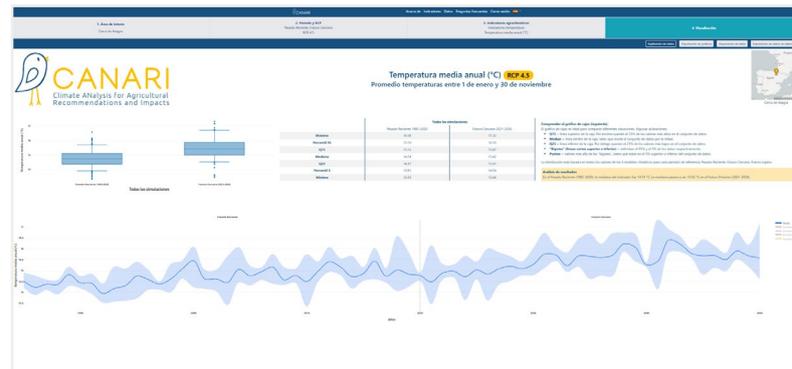


FIGURA 7. Visualización de datos en CANARI.

# Cereales de invierno y cambio climático

# 04

# Cereales de invierno y cambio climático

El cambio climático está afectando significativamente a la producción y calidad de los cultivos de cereales, que son fundamentales en la alimentación global. Estos cultivos, hasta ahora, se han desarrollado predominantemente en secano, por su capacidad natural para adaptarse a periodos de sequía moderada y altas temperaturas. Sin embargo, los cambios que están teniendo lugar desde el punto de vista climatológico, están poniendo a prueba esta capacidad, afectando a la estabilidad de los rendimientos, incluso a su viabilidad en años extremos.

Diversos estudios en Europa señalan que, pese a los avances tecnológicos, el rendimiento de los cereales se ha estancado en las últimas décadas, con el clima convirtiéndose en el principal factor que limita la producción agrícola. El aumento de las temperaturas, la irregularidad de las precipitaciones y la mayor frecuencia de eventos extremos plantean desafíos no solo para estos cultivos, sino también para la seguridad alimentaria global. Por ello, resulta fundamental comprender la relación entre el clima y los cereales para desarrollar estrategias que refuercen su adaptación a condiciones climáticas cada vez más cambiantes.

## 4.1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS CEREALES DE INVIERNO

### 4.1.1. Influencia en la fenología y el rendimiento del cultivo

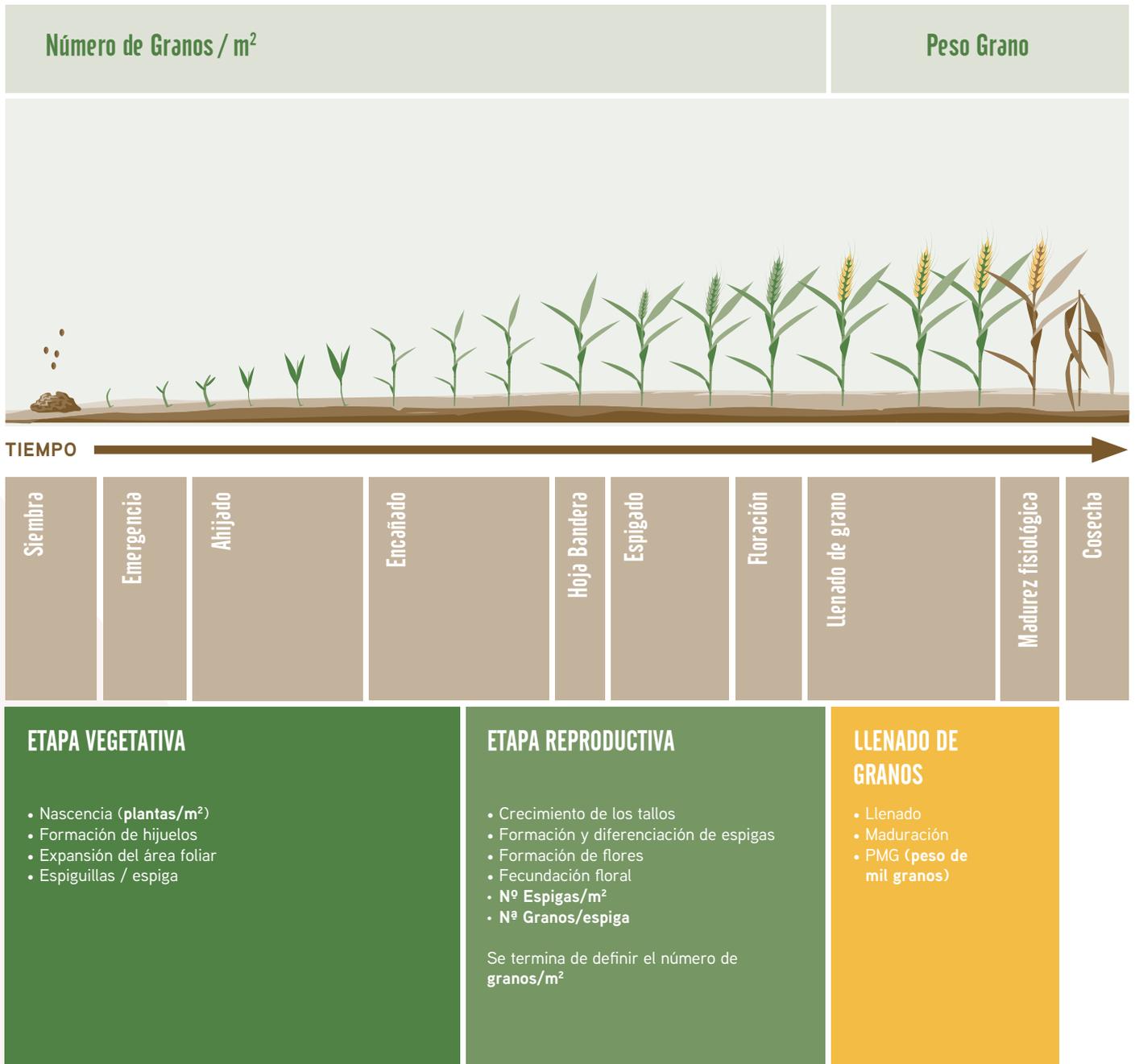
La sensibilidad del rendimiento de los cereales a la variación e intensificación de ciertas variables climáticas como la temperatura, régimen de precipitaciones y radiación solar, entre otras, varía

según el momento de desarrollo del cultivo. En este contexto, el cambio climático altera los estados fenológicos del cereal, provocando lo que se conoce como "desajuste fenológico": una alteración en su ciclo de vida debido a cambios en las condiciones ambientales. Esto significa que momentos clave como la floración o el llenado del grano, entre otros, pueden ocurrir en periodos distintos a los habituales, afectando la sincronización óptima entre el crecimiento del cultivo y la disponibilidad de recursos. Como resultado, el estrés ambiental generado por este desajuste puede reducir el rendimiento y comprometer la estabilidad de la producción.

Desde el punto de vista de generación de rendimiento, el ciclo de los cereales se divide en 3 etapas principales: (1) Vegetativa, (2) Reproductiva (crecimiento de espigas y floración) y (3) llenado del grano. En cuanto al rendimiento en grano, este se expresa como el producto entre dos componentes:

- **Número de granos por unidad de superficie** (número de granos/m<sup>2</sup>), que termina de definirse alrededor de la floración.
- **El peso por grano** (peso de mil granos), que se define en la etapa de llenado.

La **Figura 8** muestra la relevancia de cada etapa fenológica en la determinación del rendimiento del cultivo.



**FIGURA 8.** Fases fenológicas de los cereales de invierno. Factores de rendimiento.

#### 4.1.2. Estrés abiótico en el cultivo del cereal

Las situaciones de estrés en las plantas pueden clasificarse en dos grandes grupos según su origen. Cuando el factor desencadenante no está relacionado con organismos vivos, como plagas o enfermedades, se habla de *estrés abiótico*. En el contexto del cambio climático, el estrés abiótico está asociado a la variabilidad e intensificación de ciertas variables climáticas, pudiendo producirse distintos tipos de estrés en función de la variable afectada.

En los siguientes apartados se analizan los cuatro tipos de estrés abiótico más relevantes para los cereales en un escenario de cambio climático, detallando las variables climáticas involucradas y los umbrales críticos que pueden comprometer su desarrollo y rendimiento.

##### 4.1.2.1 Estrés térmico

Uno de los efectos más preocupantes del cambio climático es el aumento de la temperatura, que puede generar estrés térmico en los cultivos. Este se produce cuando la temperatura del aire supera un umbral crítico durante un tiempo suficiente como para causar daños irreversibles en la planta.

El estrés térmico está vinculado al incremento de la temperatura del dosel, que a su vez depende de factores como la temperatura del aire y del suelo, las propiedades del suelo y las características del propio dosel, además de la pérdida de humedad en el suelo.

El rango óptimo de temperatura para el crecimiento de los cereales oscila entre los 10 y 24°C, siendo su temperatura mínima alrededor de los 4-5°C y la máxima de 30°C. Sin embargo, cuando la temperatura supera los 25°C, los cereales comienzan a experimentar estrés térmico, el cual se agrava notablemente a partir de los 31°C. De hecho, los cereales son especialmente sensibles a este tipo de estrés, y en el caso concreto del trigo, se estima que la producción mundial disminuye un 6 % por cada 1 °C de aumento en la temperatura media [1].

Los efectos del estrés térmico en las plantas son complejos y provocan alteraciones en su crecimiento y desarrollo. En el caso de los cereales, las altas temperaturas pueden afectar negativamente a la germinación y el establecimiento de las plantas, reducir la fotosíntesis, acelerar la senescencia foliar, disminuir la viabilidad del polen y, como resultado, reducir el número de granos y su tamaño.

Es importante señalar que el estrés térmico es más intenso a medida que aumentan la temperatura y la duración del período de estrés y que su impacto varía según la etapa fenológica en la que se presente. En lo que respecta a los cereales de invierno, la **floración** y el **llenado de grano** son las etapas más críticas, ya que los eventos extremos de temperatura pueden afectar de manera más decisiva a la producción.

La **Tabla 1** detalla las consecuencias del estrés térmico sobre la fisiología y los componentes del rendimiento de los cereales en cada fase fenológica, así como los umbrales de temperatura a partir de los cuáles se considera se produce el estrés.

## ESTRÉS TÉRMICO EN CEREALES DE INVIERNO

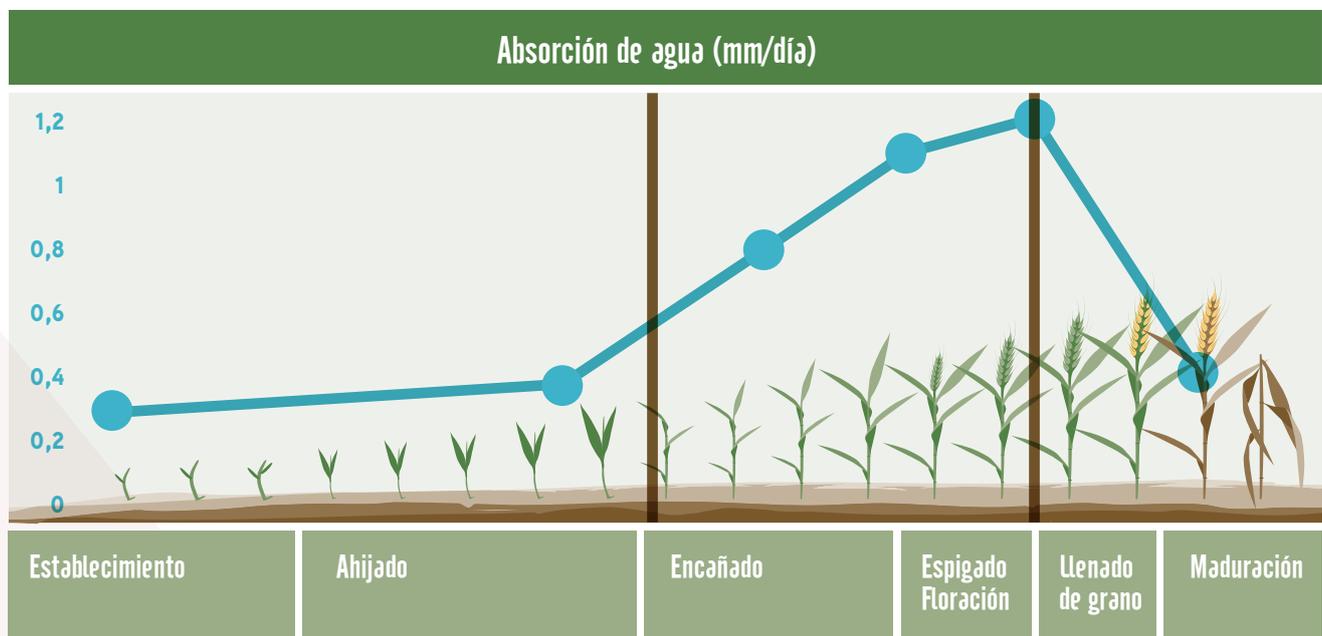
ETAPAS	COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	FASES FENOLÓGICAS	Tª ÓPTIMA CULTIVO	Tª ÓPTIMA POR FASES	ESTRÉS TÉRMICO MODERADO		ESTRÉS TÉRMICO SEVERO	
					Tª CRÍTICA	CONSECUENCIAS	Tª CRÍTICA	CONSECUENCIAS
Vegetativa	Nº Plantas/m² Nº Espigas/Planta Nº Granos/Espiga <b>TOTAL: Nº Granos/m²</b>	Nascencia	10-24°C	T > 4°C	-	-	45°C	Disminuye la germinación y emergencia de las semillas
		Ahijado		8-15°C	15°C	Se acorta la etapa de desarrollo Se reduce el número de hijuelos Se acumulan menos horas-frío: problema en variedades que requieren vernalización Se retrasa la fecha de espigado y la diferenciación floral Se reduce el número de espigas por planta	25°C	Se paraliza el ahijado
		Encañado-Hoja Bandera		20-22°C	20-22°C	Se acorta la etapa de desarrollo Disminuye la acumulación de biomasa Se reduce el número de granos por espiga Aumento del estrés oxidativo	-	-
Espigado	Se acorta la fase de desarrollo Se reduce el número de espiguillas y granos por espiga	31°C	Esterilidad del polen (no se producirán semillas viables) y se reduce el número de granos por espiga					
Reproductiva	Floración		12-22°C	25°C	Se acorta la fase de desarrollo (la floración y los tiempos de llenado y maduración) y se acelera la tasa de crecimiento del grano, lo que resulta en una disminución del peso del grano.  "En trigos harineros se ha estimado que por cada grado centígrado de aumento de la temperatura media durante el llenado, la duración de esta etapa se reduce 3 días y el peso de cada grano disminuye entre 1,8 y 2,5 mg" [2,3]	31°C	Esterilidad del polen 3 días consecutivos: disminuye el cuajado (menor número de granos por espiga) 3 días después: aborta el grano y se reduce su peso 6-10 días después: granos con muescas, partidos, opacos y hasta un 25% de merma en rendimiento A partir de 31°C se sobrepasa el límite superior para mantener el estado hídrico del cultivo	
Llenado Grano		Peso Grano	Llenado de grano					Asurado

**TABLA 1.** Impacto del estrés térmico en la fisiología y el rendimiento de los cereales: Fases de desarrollo y umbrales críticos de temperatura.

#### 4.1.2.2 Estrés hídrico

El estrés hídrico es otro de los factores climáticos más limitantes para la productividad de los cereales. Las proyecciones climáticas futuras indican una reducción generalizada de las precipitaciones y un aumento de los fenómenos extremos relacionados con el agua, como sequías e inundaciones. Sin embargo, la magnitud y la intensidad de estos fenómenos presentan mayor incertidumbre que los pronósticos de temperatura.

Se considera que existe estrés hídrico en agricultura cuando la disponibilidad de agua para los cultivos es insuficiente para satisfacer sus necesidades, es decir, cuando la demanda de agua supera los recursos disponibles. Este tipo de estrés puede ser causado por la falta de precipitaciones (sequía), cuyo impacto se ve aún más agravado por altas temperaturas, fuertes vientos y una elevada intensidad lumínica. También puede originarse por una mala gestión del agua en regadío.



**FIGURA 9.** Consumo medio de agua (mm/día) del cereal en distintas fases fenológicas. Adaptado [4,5].

Aunque la demanda hídrica varía según la fase del cultivo (**Figura 9**), las necesidades hídricas generales de los cereales oscilan entre los 450-650 mm anuales.

En cuanto a sus efectos, al igual que ocurre con el estrés térmico, son variables y dependen del estado fenológico en el que ocurra, así como de su duración, intensidad y frecuencia.

En los cereales, de forma general, la falta de agua genera una serie de cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y moleculares que afectan tanto a los tejidos subterráneos como a los aéreos. A medida que disminuye el contenido de agua en la planta, se reduce el potencial hídrico de la hoja y se pierde turgencia. Entre las principales respuestas fisiológicas al estrés hídrico se encuentran el enrollamiento foliar, el cierre parcial o total de los estomas para minimizar

la deshidratación, la reducción del crecimiento celular y la disminución del CO<sub>2</sub> interno, lo que limita la actividad fotosintética. En casos de sequía severa, la fotosíntesis puede detenerse por completo, alterando el metabolismo general de la planta y, en última instancia, provocando su muerte. Además, la escasez de precipitaciones puede acortar el ciclo de crecimiento, afectando tanto a la duración del período hasta el espigado como a la fase de llenado del grano, lo que repercute negativamente en el rendimiento final del cultivo [4].

Si analizamos cada fase fenológica por separado, la sequía impacta de manera significativa en cada una de ellas. Durante la germinación, puede reducir el número y la densidad de plantas. En la fase de ahijado, afecta a la formación de hijuelos, lo que repercute en el número final de espigas. Además, el crecimiento puede ralentizarse y las hojas más

viejas pueden mostrar amarilleamiento. En la etapa final del ahijado, la demanda de agua aumenta considerablemente. Durante el encañado, el estrés hídrico provoca una reducción en la altura de la planta y un retraso en su desarrollo. En las fases de espigado y floración, el déficit hídrico impacta en los procesos de fecundación y fijación del grano, lo que se traduce en una menor cantidad de granos por unidad de superficie. Finalmente, en la fase de llenado del grano, la sequía reduce la capacidad de las hojas para translocar los asimilados hacia el grano, lo que disminuye su peso y afecta el rendimiento final del cultivo [4].

La mayoría de los autores coinciden con que las **etapas más sensibles al déficit hídrico son el espigado y la floración**, aunque el **encañado** también es considerado una fase crítica donde la falta de agua puede tener consecuencias importantes en el rendimiento. **Durante el llenado de grano**, sin embargo, **la sensibilidad se reduce**, como lo demuestran los resultados del estudio realizado en Francia por *G. Touzy et al.* (2019) [6].

En este estudio, se identificaron cuatro escenarios de estrés hídrico comunes en el trigo en Francia, considerando el momento de ocurrencia y la intensidad del estrés. Se evaluaron variaciones en el rendimiento y sus componentes en diversos ensayos de campo bajo las siguientes condiciones:

1. **Condición óptima:** sin estrés hídrico.
2. **Estrés hídrico tardío:** comienza después de la floración y se intensifica progresivamente en llenado de grano pasando de moderado a severo.
3. **Estrés hídrico moderado en floración:** ocurre durante la antesis, pero las precipitaciones posteriores alivian el estrés durante el llenado del grano.
4. **Estrés hídrico severo previo a la floración:** se inicia en la fase vegetativa y se agrava a lo largo del llenado del grano.

En comparación con la condición óptima, las pérdidas de rendimiento en grano fueron del 3,3% en el escenario de estrés hídrico tardío, del 12,4% en el de estrés moderado durante la floración y del 31,2% en el de estrés severo antes de floración.

Por lo tanto, estos resultados resaltan la importancia del momento en que ocurre el déficit hídrico en la determinación del rendimiento del trigo, evidenciando que incluso un estrés hídrico severo durante el llenado de grano provoca menores pérdidas de rendimiento que un estrés moderado en floración. Esto subraya la alta sensibilidad del cultivo a la falta de agua en etapas reproductivas clave y la relativa tolerancia en fases posteriores del desarrollo.

#### 4.1.2.3 Eventos combinados de estrés térmico e hídrico

Dado que usualmente los episodios de sequía (estrés hídrico) y de olas de calor (estrés térmico) coinciden en el contexto de cambio climático, los efectos sobre la producción pueden ser especialmente negativos para los cereales. Las etapas de floración y llenado de grano vuelven a ser las más sensibles a sufrir el efecto combinado de ambos tipos de estrés, ya que ocurren en los meses que es más probable que haya un aumento considerable de las temperaturas y una baja disponibilidad de agua.

Como se ha explicado con anterioridad, temperaturas por encima de 25-30°C, baja humedad relativa y poca disponibilidad de agua en el suelo, hacen que la planta reaccione reduciendo drásticamente la duración de la etapa de llenado. Que esta etapa se acorte, da lugar a que no todos los asimilados pueden incorporarse al grano con la consecuente pérdida de rendimiento. Además, en condiciones de sequía y para evitar el estrés hídrico, las plantas cierran estomas reduciéndose la transpiración significativamente, por lo que se genera menor intercambio gaseoso, lo que da lugar a un incremento adicional de la temperatura de la planta. Por lo tanto, este mecanismo de la planta para evitar el estrés hídrico es contraproducente para evitar los daños por estrés térmico.

#### 4.1.2.4 Estrés por exceso de humedad (encharcamiento)

Los cereales, como la mayoría de los cultivos, son sensibles al encharcamiento. Sólo unos pocos días de inundación pueden dañar gravemente las plantas y provocar importantes pérdidas agrícolas. La principal consecuencia de la inundación es el deterioro de la difusión de gases entre la planta y su entorno. Esto conduce a un deterioro de la respiración celular y de la fotosíntesis y, en consecuencia, a una crisis energética que puede acabar matando a la planta [7].

Al igual que el estrés térmico e hídrico, el exceso de humedad afecta de manera distinta a cada fase fenológica de los cereales. **Precipitaciones acumuladas superiores a 100 mm en el mes posterior a la siembra** pueden generar hipoxia (falta de oxígeno en el suelo), lo que impacta negativamente en el rendimiento. Esto se traduce en una reducción significativa del índice de germinación, una menor emergencia de plántulas y un enraizamiento deficiente, además de un retraso general en el desarrollo de la planta. Si el encharcamiento se prolonga durante 10 días consecutivos, el cultivo puede sufrir pérdidas totales.

Los suelos anegados, además, perjudican la absorción de nitrógeno y otros nutrientes y aumentan el potencial de desnitrificación y lixiviación, además de propiciar el desarrollo de enfermedades. **Las fases de floración y llenado de grano** también son **altamente sensibles al encharcamiento**. En estas etapas, el exceso de agua puede provocar una maduración prematura, acortando la fase de llenado y reduciendo el peso de los granos.

Por otro lado, los eventos extremos de lluvia en forma de tormentas intensifican los procesos de erosión, ocasionando pérdidas significativas de suelo. Esto afecta directamente a los cultivos de cereales y compromete su producción.

#### 4.1.2.5 Estrés por bajas temperaturas (heladas)

En cuanto a las bajas temperaturas, los cereales presentan umbrales críticos por debajo de los cuales pueden sufrir daños por congelación. Estos umbrales varían según la fase fenológica, como se muestra en la **Tabla 2**.

Fases Fenológicas	Tª (°C)
Ahijado	-11
Encañado	-4
Espiga embuchada	-2
Espigado	-1
Floración	

**TABLA 2.** Umbrales de temperatura para daños por hielo según las fases fenológicas en cereales de invierno [8].

La fase de ahijado es la etapa en la que los cereales son más resistentes al frío, empezándose a producir daños a partir de temperaturas inferiores a -11°C. A partir de encañado a hoja bandera, los cereales empiezan a ser particularmente sensibles al frío. El ápice entra en una fase activa de desarrollo y se expone a bajas temperaturas al elevarse sobre el suelo produciéndose pérdidas de rendimiento cuando la temperatura mínima desciende por debajo de los -4°C. Las etapas más críticas comienzan con la emergencia de la espiga y con temperaturas a partir de -1°C, una vez queden expuestas las espiguillas. Cuanto más ha emergido la espiga mayor es el daño, como consecuencia de una mayor afección sobre el número de espiguillas expuestas. Durante este periodo la caída potencial del rendimiento puede ser muy significativa por la esterilidad generalizada producida sobre las espiguillas. La **floración**, es, sin duda, la **etapa de máxima sensibilidad al efecto de las heladas**. Las flores expuestas al hielo resultan estériles, por lo que se reduce el número de granos.

Finalmente, a modo de resumen, la **Tabla 3** muestra las fases fenológicas más críticas de los cereales de invierno frente a diversos tipos de estrés abiótico en el contexto del cambio climático.

Tipos de estrés	Fases fenológicas críticas
Térmico	Floración Llenado de Grano
Hídrico	Encañado Espigado Floración
Encharcamiento (> 100 mm)	Germinación Floración Llenado de grano
Heladas	Espigado Floración

**TABLA 3.** Etapas más sensibles a los efectos del cambio climático en cereales de invierno.

### 4.1.3. Estrés biótico: plagas y enfermedades de los cereales y su relación con el cambio climático

A continuación, se realiza un breve análisis de cómo las variaciones climáticas pueden aumentar la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de cereal y acelerar su expansión.

#### 4.1.3.1 Plagas

Los insectos son organismos ectotérmicos, siendo la temperatura ambiental un factor clave en la regulación de su desarrollo, por lo que, hasta la fecha, el efecto directo del cambio climático sobre los mismos se ha asociado principalmente a la elevación de la temperatura, si bien cambios en el régimen de precipitaciones y la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico también puede jugar un papel en este sentido [9,10]. Las condiciones climáticas como el aumento de la temperatura ejercen pues, una influencia significativa sobre la duración de su ciclo de desarrollo, dinámica e intensidad de población y área de distribución.

Efecto del incremento de las temperaturas de primavera y verano, época en la que la mayor parte de los fitófagos de clima templado presentan su fase de crecimiento, va a suponer una aceleración de su desarrollo, y por consiguiente del número anual de generaciones. Además, muchas especies podrán extender su área de distribución a mayores latitudes y altitudes, pudiendo establecerse nuevas poblaciones de plagas, y otras especies con menos importancia hasta la fecha que no se consideraban plagas pasar a serlo [11].

El incremento de las temperaturas invernales y otoñales puede tener un efecto sobre los insectos que viven en el suelo y que comúnmente entran en diapausa en estado de larva. Estos podrían seguir alimentándose y su desarrollo ralentizarse, pero no cesar [11]. Es el caso del zabro, que con otoños suaves y húmedos se dan eclosiones tempranas y desarrollo continuado de las larvas, lo que origina daños más importantes, sobre todo si se continúa con un invierno suave.

Es importante destacar la influencia del cambio climático en la relación entre los insectos fitófagos y sus enemigos naturales (depredadores o parasitoides). Los insectos fitófagos pueden responder a menudo rápida y drásticamente a cambios en las condiciones climáticas que influyen en su desarrollo, mientras que los agentes entomófagos, por otra parte, pueden verse afectados tanto por variaciones climáticas predecibles, pero también por otras impredecibles asociadas a los cambios que acontecen en la dinámica de sus hospedantes. Esta última variabilidad puede ocasionar una disminución importante de los porcentajes naturales

de depredación y parasitismo [11]. Un metaanálisis de datos de estudios de laboratorio concluyó que los niveles tróficos superiores (p. ej. depredadores) son más susceptibles al cambio climático que los organismos de orden inferior (plantas o insectos herbívoros) [12]. Esto es relevante a la hora de estudiar el papel cambiante de los enemigos naturales en la dinámica de las plagas de insectos y el control biológico bajo el cambio climático, un tema sobre el que hay muy pocos datos de campo [13] y que deberá seguir estudiándose en el futuro.

Por lo tanto, los principales efectos del cambio climático sobre las plagas se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Alarga el periodo reproductivo y aumenta el número de generaciones.
- Reduce la mortalidad invernal de ciertas plagas.
- Desajusta los ciclos de depredadores y presas

#### 4.1.3.2 Enfermedades

Los conocimientos actuales indican que, potencialmente, las modificaciones ambientales asociadas con el cambio climático pueden dar lugar a alteraciones en los ciclos vitales de los patógenos, en el desarrollo de la enfermedad y en la fisiología de las interacciones planta-patógeno. Tales alteraciones podrán repercutir sobre la distribución geográfica de los patógenos, la incidencia y severidad de las enfermedades y las pérdidas de rendimiento que estas ocasionen. Además, la eficiencia de las estrategias empleadas para su control también puede verse afectada [14]. En este sentido, se debe tener en cuenta la vulnerabilidad de los agentes microbianos de biocontrol a las variaciones extremas de ciertas variables climáticas.

La modificación de las condiciones ambientales, en gran medida inducidas por el cambio climático, se asocia con el 25 % de las enfermedades emergentes, las cuales encuentran condiciones óptimas en zonas que antes no eran propicias para su desarrollo. Se prevé que los cambios en los patrones de los vientos o las tormentas promuevan la futura distribución de la roya del trigo, causada por *Puccinia graminis* [15]. La gravedad de esta enfermedad ha aumentado en los últimos años y se espera que el cambio climático modifique su frecuencia, incidencia, gravedad y sincronía con el hospedador. De hecho, el aumento de la frecuencia de fenómenos extremos como las tormentas debería ofrecer mejores condiciones para las esporas de la roya del trigo, que son móviles y pueden transportarse a grandes distancias [16]. Además, los inviernos más suaves y las primaveras más cálidas deberían favorecer epidemias más tempranas, acortar los periodos de latencia y aumentar las eficiencias de infección y esporulación, provocando así más ciclos infecciosos [17].

Un estudio del IFAPA ha analizado el efecto que tiene el incremento de la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub> en la resistencia y susceptibilidad del trigo frente a la roya y la septoria. Así, han encontrado evidencias de que las enfermedades pueden desarrollar mayores síntomas en condiciones de elevada temperatura o concentración de CO<sub>2</sub>, provocando una rápida evolución de nuevos patotipos, o que la resistencia de las variedades se vea superada en menor tiempo. También es conocido que algunos genes de resistencia en trigo pierden su eficacia frente a patógenos específicos con temperaturas elevadas, lo que supone también un riesgo potencial para el cultivo.

## 4.2. SELECCIÓN DE INDICADORES AGROCLIMÁTICOS (IACS)

El análisis previo permite comprender la relación entre el clima y los cereales, así como los riesgos e impactos que el cambio climático puede generar en estos cultivos. Con esta base, el objetivo es avanzar en la adaptación del sector cerealista mediante herramientas que faciliten la toma de decisiones.

Para que las medidas de adaptación sean realmente efectivas, es fundamental un enfoque a nivel local, diseñando soluciones específicas para cada territorio. En este sentido, la herramienta CANARI permite calcular de manera ágil indicadores agroclimáticos (IACS) adaptados a cada zona productiva para distintas producciones. Para el grupo “Cereales de Invierno”, la herramienta ya contaba con IACS predefinidos, pero su alcance era generalista y requería una mayor precisión para reflejar con exactitud los impactos del cambio climático en estos cultivos.

Por ello, a partir del análisis detallado de los principales estreses abióticos que afectan a los cereales en el contexto del cambio climático, se han revisado y mejorado los IACS originales de CANARI, definiendo con mayor precisión las variables climáticas clave, los periodos críticos y los umbrales específicos para cada indicador. Estos ajustes permiten una evaluación más precisa de los impactos del cambio climático

en los cereales de invierno y proporcionan una base metodológica más robusta para su aplicación en distintos territorios.

El resultado de este proceso es una **nueva base de siete Indicadores AgroClimáticos para los cereales de invierno**, cuya definición más precisa permitirá evaluar con mayor exactitud la viabilidad futura de la producción cerealista. Toda esta información ha sido recopilada en la **Tabla 4** que servirá de referencia para cualquier persona interesada en analizar estos IACS en su propio territorio, siguiendo las instrucciones establecidas en este documento.

Cada uno de los indicadores representa una posible pérdida de rendimiento o un riesgo potencial para el cultivo, basado en una o varias variables climáticas combinadas durante un periodo determinado en relación con distintas fases fenológicas. Dado que las fechas en las que ocurren estas fases varían según el territorio, será necesario definir las específicamente para cada caso. Además, algunos indicadores incluyen umbrales críticos que deben considerarse al realizar el análisis con la herramienta.

De los siete indicadores definidos, tres están vinculados al aumento de las temperaturas y los daños por estrés térmico, uno al riesgo de daños por heladas y los tres restantes a los efectos de las precipitaciones, ya sea por déficit (estrés hídrico) o por exceso (daños por encharcamiento). Seguidamente se detalla cada uno de ellos:

- Estrés Térmico-General del cultivo
- Estrés térmico en floración
- Asurado del grano
- Heladas
- Estrés hídrico-General del cultivo
- Estrés hídrico en Espigado y Floración
- Riesgo de exceso de agua-post siembra

IACs	Periodos a Evaluar		Análisis mediante la Herramienta CANARI		Umbral		
	<p><i>Por fases fenológicas: Definirse para cada territorio de estudio, además de para cada tipo de cereal de invierno.</i></p> <p><i>Establece como fecha de inicio el comienzo de la fase fenológica y como fecha de finalización el final de la misma. Haz lo mismo para la combinación de varias fases fenológicas.</i></p>		<p><b>Variables Climáticas:</b></p> <p><i>Se deben analizar el conjunto de las variables climáticas indicadas para cada IAC en cada uno de los periodos.</i></p>	<p><b>Indicadores predefinidos en CANARI</b></p> <p><i>De la Lista de Indicadores seleccionar el indicador agroclimático a calcular.</i></p>	Moderado	Crítico	
<b>Estrés Térmico - General del Cultivo</b> <i>(En relación con el adelanto de la fenología del cultivo y el acortamiento de las distintas fases fenológicas)</i>	Por Fases	Anual	Temperatura	Media (°C)	Indicador General / Temperatura / Temperatura media anual (°C)- <b>Ajustar periodo</b>	NO	
		Ahijado		Media de Máximas (°C)	Indicador General / Temperatura / Temperatura máxima anual (°C)- <b>Ajustar periodo</b>		
		Encañado-Hoja bandera		Media de Mínimas (°C)	Indicador General / Temperatura / Temperatura mínima anual (°C)- <b>Ajustar periodo</b>		
		Espigado-Llenado de grano					
<b>Estrés térmico en Floración</b>	Floración	Nº de Días Tª Máxima Diaria ≥ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Nº de días calurosos o muy calurosos- <b>Ajustar periodo y umbral</b>	25°C	31°C		
<b>Asurado del Grano</b>	de Grano Lechoso a Grano Pastoso	Nº de Días Consecutivos Tª Máxima Diaria ≥ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Ola de calor (días consecutivos)- <b>Ajustar periodo y umbral</b>				
<b>Heladas</b>	Por Fases	Anual		Nº de días Temperatura mínima diaria ≤ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Nº de días de Heladas- <b>Ajustar periodo y umbral</b>	0° C	
		Encañado-Hoja bandera		Nº de días Temperatura mínima diaria ≤ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Nº de días de Heladas- <b>Ajustar periodo y umbral</b>	-4°C	
		Espigado-Llenado de grano		Fecha primer día Temperatura mínima diaria ≤ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Primer día de Helada- <b>Ajustar periodo y umbral</b>	-1°C	
				Fecha último día Temperatura mínima diaria ≤ <b>Umbral</b>	Indicador General / Temperatura / Último día de Heladas- <b>Ajustar periodo y umbral</b>		
<b>Estrés Hídrico - General Cultivo</b>	Por Fases	Anual	Precipitación Diaria Acumulada (mm)	Lista de Indicadores / Precipitación, ETP, déficit Hídrico / Precipitación Anual Acumulada (mm)- <b>Ajustar periodo</b>	NO		
		Siembra					
		Ahijado		Déficit Hídrico diario acumulado (Precipitación -Evapotranspiración) (mm)		Lista de Indicadores / Precipitación, ETP, déficit Hídrico / Deficit hídrico anual (mm)- <b>Ajustar periodo</b>	
		Encañado-Hoja Bandera <i>(Fase Crítica para el rendimiento)</i>					
Espigado-Llenado Grano <i>(Crítico si la precipitación acumulada es &gt; de 100 mm en este periodo)</i>							
<b>Estrés Hídrico en Espigado y Floración</b>	Espigado-Floración	Déficit Hídrico diario acumulado (Precipitación -Evapotranspiración) (mm)	Lista de Indicadores / Precipitación, ETP, déficit Hídrico / Déficit hídrico anual (mm)- <b>Ajustar periodo</b>	NO			
<b>Riesgo de exceso de Agua Post-Siembra</b>	Mes posterior a la siembra	Precipitación Diaria Acumulada ( <b>Crítico cuando es &gt; 100 mm</b> )	Lista de Indicadores / Precipitación, ETP, déficit Hídrico / Precipitación Anual Acumulada (mm)- <b>Ajustar periodo</b>	NO			

**IACs:** Indicadores basados en una o varias variables climáticas que explican una posible pérdida de rendimiento o calidad del cultivo y permiten identificar la existencia de una presión climática futura. Estos indicadores son específicos para cada cultivo y se han definido en función de los eventos climáticos más relevantes que pueden afectar a los cereales en el contexto del cambio climático, tales como déficit hídrico, exceso de agua, temperaturas altas y bajas.

**PERIODOS A EVALUAR:** Indica el intervalo de tiempo durante el cual se analizará el comportamiento de las variables climáticas. Estos periodos están vinculados a las etapas fenológicas más críticas, en las que los eventos climáticos extremos pueden afectar negativamente a la producción y calidad de los cereales.

**VARIABLES CLIMÁTICAS:** Elementos del clima capaces de definir el tiempo atmosférico. Se especifica qué variable climática se debe evaluar.

**INDICADORES PREDEFINIDOS EN CANARI:** Ruta a seguir a través de la herramienta CANARI para el cálculo de las diferentes variables climáticas que definen los IACs del cereal

**UMBRAL:** Define el valor crítico de la variable climática a partir del cual se considera que existe un riesgo para el cultivo.

**TABLA 4.** Guía para el cálculo de los IACs para la Evaluación de Impactos Climáticos en Cereales de Invierno mediante la herramienta CANARI.

A continuación, se describe brevemente el interés de cada una de las variables climáticas asociadas a los IACs para una mejor comprensión de los impactos sobre el cultivo:



## TEMPERATURA (media, media de máximas, media de mínimas)

La temperatura es un factor clave para el crecimiento y desarrollo de cualquier cultivo, así como para su rendimiento. En este sentido, cada especie tiene una temperatura mínima, máxima y óptima para su normal desarrollo y supervivencia, de ahí que su análisis sea de interés en cualquier estudio climático.

### TEMPERATURA MEDIA DE MÁXIMAS

En lo que respecta a los cereales, estos son aptos en un ambiente fresco, por lo que su crecimiento y desarrollo es vulnerable a las altas temperaturas pudiendo sufrir estrés térmico en una o varias fases de su ciclo, dependiendo de la intensidad (temperatura máxima alcanzada) y duración del periodo de estrés. Este estrés por calor afecta a la tasa de desarrollo de los cultivos, que se acelera hasta cierto punto y se reduce después de cierto nivel, y controla en gran medida la fenología de las plantas. Además, las altas temperaturas están estrechamente relacionada con el estrés hídrico, de tal manera que los incrementos de temperatura pueden conllevar un incremento en el consumo de agua que puede afectar directamente a la fisiología del cultivo.

### Nº DE DÍAS Tª MÁXIMA DIARIA Y Nº DE DÍAS CONSECUTIVOS Tª MÁXIMA DIARIA $\geq$ UMBRAL

Tal y como se ha explicado con anterioridad, los cereales, como el resto de los cultivos, tienen una temperatura máxima óptima de desarrollo, por encima de la cual empiezan a sufrir estrés térmico. Por lo tanto, es necesario analizar, sobre todo para las etapas más vulnerables del ciclo de desarrollo del cultivo, el número de días que la temperatura máxima va a estar por encima de la temperatura umbral. Teniendo en cuenta, además, que el estrés térmico es acumulativo, conocer el tiempo que la planta va a estar expuesta a esta temperatura mediante el número de días consecutivos por encima de la temperatura umbral será también clave para determinar el grado de estrés térmico.

### TEMPERATURA MEDIA DE MÍNIMAS Y Nº DE DÍAS TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA $\leq$ UMBRAL (Nº DE DÍAS DE HELADAS)

Al igual que ocurre con las altas temperaturas, las bajas temperaturas también pueden causar daños en los cereales. La magnitud de estos daños dependerá tanto de la intensidad (temperatura mínima alcanzada) como de la duración (número de días a esa temperatura). De forma adicional, conocer el primer y último día en el que la temperatura mínima alcanza el umbral crítico para el cultivo será clave para diseñar medidas de adaptación, como el adelanto de la fecha de siembra. Los procesos de vernalización, que están estrechamente relacionados con las bajas temperaturas, refuerzan la importancia de comprender el comportamiento futuro de estas temperaturas. Esto permitirá seleccionar variedades que no requieran vernalización o, en su defecto, con poca necesidad de periodos variables de frío.



## PRECIPITACIÓN

Los cereales requieren una cantidad adecuada de humedad en cada fase fenológica para lograr buenos rendimientos, siempre que los demás factores climáticos sean también óptimos. Por ello, es fundamental evaluar la cantidad de precipitación y su distribución a lo largo de las distintas fases del ciclo del cultivo, utilizando la variable **Precipitación Acumulada en mm**. Además, el exceso de precipitación en determinados periodos puede tener efectos negativos sobre el rendimiento, por lo que conocer la Precipitación Acumulada en un periodo específico permitirá también estimar el riesgo de afectación al cultivo debido al exceso de agua.



### DÉFICIT HÍDRICO (Precipitación – Evapotranspiración)

El rendimiento de los cereales depende de la humedad del suelo y esta se ve afectada no sólo por la precipitación, sino también por la evapotranspiración. El **déficit hídrico** es la **diferencia entre la Precipitación y la evapotranspiración**. Cuando es **negativo**, existe **riesgo de que se produzca estrés hídrico** al no poder satisfacer la planta su demanda hídrica con los recursos hídricos disponibles en el suelo.

Por último, para evaluar el impacto de las proyecciones climáticas en el rendimiento y la calidad de los cereales, es necesario realizar ciertos cálculos. Estos se basan en comparar las medianas de las variables climáticas de los diferentes IACs en los tres períodos analizados: pasado, futuro cercano y futuro lejano.

Para las temperaturas (media, máxima y mínima), se calcula la diferencia entre los valores del futuro y del pasado (se resta el valor del pasado al del futuro). Para el resto de variables, se utiliza el cálculo de la diferencia en porcentaje. Los valores negativos indican una reducción en la variable climática, lo que podría reducir la presión sobre el cultivo en el futuro.

Estos cálculos ayudan a determinar si las variaciones climáticas son suficientemente significativas para afectar a la producción y si se deben priorizar medidas de adaptación. En caso de analizar múltiples cuadrículas geográficas, se recomienda calcular la media de las medianas de cada variable climática para facilitar la interpretación, siempre que no existan diferencias significativas entre cuadrículas. En caso de variaciones relevantes, se deben analizar por separado para reflejar mejor las condiciones locales.

### 4.3. CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CEREALES DE INVIERNO

El cambio climático se perfila como uno de los principales desafíos para la agricultura y la seguridad alimentaria en el futuro. En España, los cereales son el cultivo más extendido, y el 90% de su producción corresponde a los cereales de invierno, especialmente trigo y cebada, los cuales se cultivan mayoritariamente en secano. Esto hace que las producciones sufran

fuertes oscilaciones debido al clima, principalmente a la variabilidad de las precipitaciones [18].

Aunque algunos efectos ya son evidentes en los últimos años, se espera que el cambio climático aumente la vulnerabilidad del sector cerealista de manera aún más pronunciada en el futuro. Aunque existan diferencias regionales en cuanto a su impacto, ningún área es inmune al calentamiento global [18], y los cereales experimentarán sus efectos en mayor o menor medida dependiendo de la ubicación geográfica.

Las simulaciones climáticas futuras, proporcionadas por modelos climáticos regionalizados, predicen, en términos generales, un **aumento de las temperaturas** para España. Este incremento determinará, según su intensidad (temperatura máxima alcanzada) y duración, el grado de estrés térmico y el impacto sobre el rendimiento. Dicho aumento va a afectar a la tasa de desarrollo general de los cereales y va a provocar un adelanto en su fenología, además de un acortamiento de sus fases de desarrollo. Además, podría causar alteraciones fisiológicas si se superan ciertos umbrales, lo que afectaría negativamente al rendimiento y la calidad del grano, como la disminución en la concentración de almidón. El impacto más significativo se dará durante las fases de espigado, floración y llenado de grano, siendo esta última la fase más afectada.

También se predice una **disminución de las precipitaciones** y un **aumento** más pronunciado de las **sequías primaverales**. Esta reducción tendrá un impacto directo tanto en los cultivos de secano como en los de regadío, debido al incremento de las necesidades de riego y la disminución de las reservas de agua disponibles [18]. Es importante señalar que, en España, la escasez de agua ya representa una

limitación significativa para los cereales de invierno en algunas regiones. Además, se espera un **aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, como olas de calor, sequías y lluvias torrenciales**. Los **eventos de granizo también se intensificarán** y afectarán a áreas más extensas [19]. Todos estos fenómenos extremos se agravarán aún más por el aumento gradual de la temperatura.

No obstante, las mayores pérdidas irán asociadas con el **aumento del estrés hídrico**. El incremento generalizado de las temperaturas provocará un mayor consumo de agua y un **aumento de la evapotranspiración**. Esto, sumado a la reducción de las precipitaciones, generará un déficit hídrico ya desde

fases tempranas de desarrollo, en las cuales la planta no podrá cubrir su demanda de agua con los recursos hídricos disponibles. Además, las lluvias serán más intensas, aumentando la erosión, y se concentrarán en épocas como el otoño, por lo que el agua será menos aprovechable por el cultivo en las fases de mayor demanda. Estos daños se podrán incrementar aún más por la incidencia de plagas y enfermedades, las cuales se intensificarán en este nuevo contexto climático.

En la **Tabla 5** se resumen los efectos potenciales del cambio climático en los cereales de invierno en España según el tipo de riesgo [18].

Factor de Cambio	Efectos negativos
Aumento de Temperaturas	Aumento estrés térmico Aumento daños por plagas
Disminución de la precipitación	Aumento estrés hídrico Aumento demanda de agua en regadío
Aumento de lluvias intensas o tormentas	Aumento de la erosión Daños por inundaciones o pedriscos

**TABLA 5.** Impactos del cambio climático en los cereales de invierno.

Entender las consecuencias de los riesgos climáticos en los cereales de invierno, aunque sea de forma general, es el primer paso para diseñar estrategias de adaptación.

En este sentido, hace años que expertos en clima y agricultura de todo el mundo colaboran para entender cómo se trasladan los cambios en el clima a los cultivos de cereales. Su investigación se centra en analizar de que manera las variaciones en la temperatura, precipitaciones y eventos extremos influyen en su desarrollo, y en particular, en el rendimiento y la calidad del grano.

De nuevo, cada región y más en concreto cada explotación, pueden tener un comportamiento diferente en función de sus peculiaridades, ya que existen otras variables que determinan la vulnerabilidad de los cereales a los efectos del clima como el tipo de suelo, la variedad cultivada, la fecha de siembra, la exposición de la parcela, la disponibilidad de riego y las prácticas agronómicas empleadas, entre otras. No obstante, los efectos potenciales de los dos principales impactos que los cereales de invierno podrían experimentar en un clima futuro cada vez más cálido y seco se pueden resumir de forma general en la siguientes Figuras (**Figura 10**).

## MÁS ESTRÉS TÉRMICO

### Consecuencias en el cultivo

#### En el crecimiento y desarrollo

Se adelanta la fenología.

##### Se acortan las distintas fases de desarrollo.

Significa que las plantas tienen menos tiempo para desarrollarse, por lo que acumulan menos biomasa y, en consecuencia, los rendimientos bajan. Si se acorta la **etapa de llenado** se acelera la tasa de crecimiento y no todos los asimilados pueden incorporarse al grano y se reduce su peso y calidad. Por eso, las altas temperaturas son más graves durante la floración y el llenado del grano.

##### Disminuye el ahijado y el desarrollo foliar.

##### Enrollamiento y senescencia de las hojas.

Las hojas al enrollarse están menos expuestas a la luz solar por lo que se limita la capacidad fotosintética, acaban envejeciendo y perdiendo su funcionalidad.

##### Se acumulan menos horas-frío.

Afecta negativamente a las **variedades que requieren vernalización**, retrasando o impidiendo el desarrollo adecuado de las espigas.

#### En la fisiología

**Alteraciones en la fotosíntesis, apertura-cierre de estomas y concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de las células.**

##### Deshidratación y pérdida de turgencia de los tejidos vegetales.

Afecta a la capacidad para mantener la rigidez celular, lo que dificulta la absorción de agua.

##### Aumenta la transpiración y disminuye el potencial hídrico del cultivo.

Se reduce la cantidad de agua disponible en las hojas. Como respuesta, la planta puede cerrar estomas para conservar el agua, lo que da lugar a un incremento adicional de la temperatura de la planta, lo que agrava el daño.

##### Deterioro de la clorofila.

Disminuye la capacidad para realizar la fotosíntesis de manera eficiente.

#### En la bioquímica

##### Aumenta la producción de ROS (Especies reactivas de oxígeno).

Aunque son útiles en pequeñas cantidades, en niveles elevados pueden dañar células y tejidos y afectar a la salud general de la planta.

##### Se reduce la eficiencia fotoquímica.

La capacidad de la planta para convertir la luz solar en energía durante la fotosíntesis se ve afectada, lo que reduce la energía disponible para sus funciones vitales.

#### En el rendimiento y calidad del grano

**Se inhibe la germinación de las semillas y la emergencia de las plántulas, lo que da lugar a un establecimiento deficiente del cultivo.**

Las altas temperaturas pueden afectar negativamente la capacidad de las semillas para germinar y de las plántulas para emerger del suelo no alcanzando una densidad óptima en el campo.

**Se reduce la viabilidad del polen y el número de granos por espiga.**

**Asurado del grano - Granos arrugados y con bajo peso.** Se detiene la acumulación de sustancias de reserva en el grano, como el almidón, que representa más del 65% del peso seco, lo que reduce significativamente el rendimiento y calidad del grano.

**Cambios en la composición proteica del grano.**

## MÁS ESTRÉS HÍDRICO

### Consecuencias en el cultivo

Se acortan las distintas fases de desarrollo.

Reducción del potencial hídrico y pérdida de turgencia.

Disminución de la actividad fotosintética y perturbación de las actividades metabólicas generales.

Disminución del crecimiento y retraso en el desarrollo.

Cierre de estomas (para prevenir deshidratación) y reducción de la transpiración, que resulta en incremento adicional de la temperatura de la planta y aumento del riesgo de estrés térmico.

Disminuye la fecundación y fijación de los granos, por lo que se reduce el número de granos por espiga.

Disminuye la capacidad de translocar los asimilados al grano por lo que se reduce su peso.

Aunque algunos otoños puedan ser críticos debido a la falta de precipitaciones, los impactos que más crecen en magnitud se concentrarán en primavera, coincidiendo con los estados más sensibles a la escasez de agua y altas temperaturas. Los eventos extremos (lluvias torrenciales y granizos) no pueden predecirse con exactitud, pero las elevadas temperaturas acentuarán su impacto.

Rendimiento =

Fenología

Estrés térmico

Estrés hídrico. Déficit hídrico

Riesgo de heladas

Plagas

Enfermedades

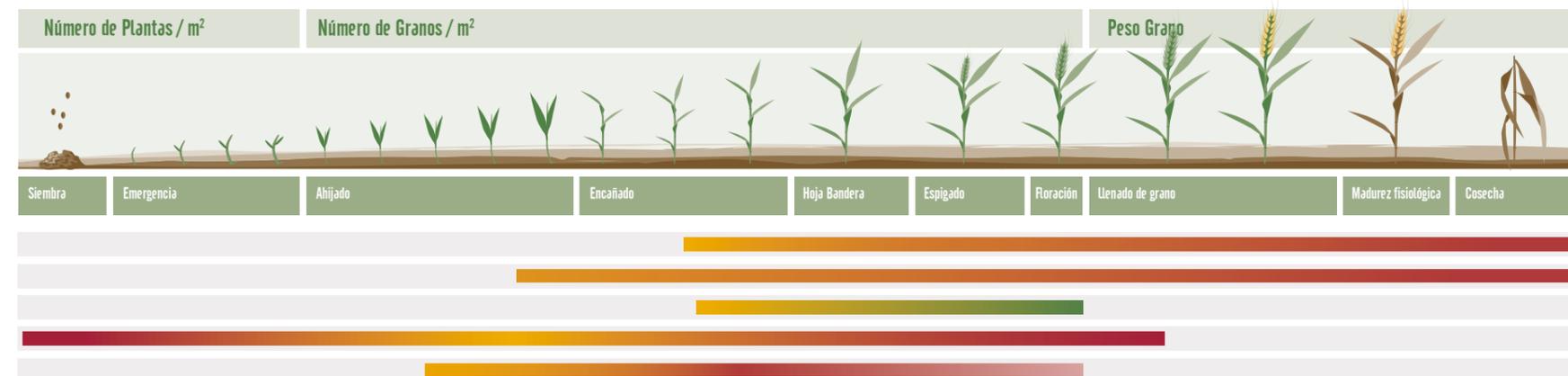


FIGURA 10. Impactos del cambio climático en los cereales de invierno.

# Estrategias de adaptación al cambio climático en cereales de invierno

# 05

# Estrategias de adaptación al cambio climático en cereales de invierno

El análisis previo evidencia que el estrés térmico e hídrico serán los dos principales impactos que sufrirá el cultivo de cereal de forma generalizada en los próximos años en las distintas áreas geográficas de España como consecuencia del cambio climático, por lo que las estrategias de adaptación deben de ir dirigidas a atenuar tanto los efectos de las altas temperaturas como el déficit hídrico.

Se prevé que, sin la adopción de medidas de adaptación, el rendimiento de los cereales disminuya un 5 % de media por cada grado centígrado de calentamiento a escala global [20]. Por lo tanto, para hacer frente a estos efectos y a la creciente vulnerabilidad del sector cerealista, es crucial implementar estrategias de adaptación que permitan anticiparse y reducir los riesgos derivados del cambio climático.

A continuación, se proponen una serie de medidas de adaptación encaminadas a dar respuesta a los dos principales impactos detectados. Algunas de estas medidas, además, tienen el potencial de mejorar tanto la salud del agroecosistema como la productividad y la sostenibilidad económica de las explotaciones cerealistas.

Las medidas se han clasificado según su aplicación a corto, medio y largo plazo, de acuerdo con su nivel de exigencia, es decir, si pueden adoptarse de forma inmediata o requieren cambios de gestión más profundos que impliquen esfuerzos adicionales incluso inversiones. Para cada medida, además, se ha elaborado una ficha detallada que describe el beneficio de la práctica en relación con el riesgo climático que aborda, indicando si su efecto es a corto, medio o

largo plazo, los requerimientos técnicos específicos necesarios y otras consideraciones importantes para su correcta implementación. También se señala si estas prácticas están incentivadas o subvencionadas por la PAC, así como otros beneficios ambientales asociados. En algunas fichas, además, se incluyen los resultados de ciertos “experimentos” que se han realizado en el marco del Proyecto para demostrar la eficacia de ciertas medidas y respaldar su aplicación.

Aunque se haya comprobado la eficacia de estas medidas en diversos contextos geográficos, será crucial adaptarlas a las condiciones climáticas particulares de cada región. Por lo tanto, es importante subrayar que no existe una solución única ni universal para enfrentar estos riesgos. Sin embargo, lo que sí está claro es que, adaptando ciertas prácticas agronómicas e incorporando otras nuevas, es posible avanzar y prosperar frente a los nuevos desafíos climáticos.

Por último, es importante señalar que aunque las medidas de adaptación que se presentan en este documento podrían amortiguar ciertamente los impactos del cambio climático en los cereales de invierno, tienen una capacidad limitada que podría verse sobrepasada si no hay una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a escala global [18].

## 5.1. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN		
A corto plazo	Medio plazo	Largo plazo
		
Adaptación del calendario de siembra	Siembra directa	Cosecha de agua: Laboreo en línea clave o <i>Keyline</i>
Uso de bioestimulantes	Mantenimiento de una cobertura vegetal permanente en el suelo	Creación y mantenimiento de infraestructuras verdes
Variedades adaptadas a las nuevas condiciones climáticas	Rotación y diversificación de cultivos	
Herramientas para mejorar la gestión y la eficiencia de la fertilización	Fertilización orgánica	
En regadío, herramientas para optimizar el riego		

**TABLA 8:** Medidas de adaptación a corto, medio y largo plazo.



### 5.1.1. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

#### A CORTO PLAZO

El siguiente conjunto de medidas agrupa prácticas de fácil implementación, orientadas a reducir los impactos del estrés térmico e hídrico y cuyos efectos positivos pueden observarse a corto plazo.

- **Adaptación del calendario de siembra**
- **Uso de bioestimulantes**
- **Variedades adaptadas a las nuevas condiciones climáticas**
- **Herramientas para mejorar la gestión y la eficiencia de la fertilización**
- **En regadío, herramientas para optimizar el riego**

Adecuar las prácticas de manejo, especialmente la fertilización nitrogenada y el riego, a las características del cultivo y del suelo, son unas de las medidas claves tanto para la mitigación como para la adaptación al cambio climático.

En las fichas, se presentan distintas herramientas para optimizar la fertilización y el riego en los cultivos de cereales.



## Adaptación del calendario de siembra

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

Adelantar las fechas críticas del cultivo (floración y llenado de grano) adelantando la fecha de siembra de 15 a 30 días antes de la fecha habitual, reduce la posibilidad de que estas tengan lugar en los meses donde se prevé un mayor aumento de las temperaturas máximas por encima de la temperatura umbral y un mayor riesgo de déficit hídrico (disminución de las precipitaciones y aumento de la evapotranspiración).

Se propone, siempre que las lluvias lo permitan, y que encaje con las rotaciones, **adelantar la fecha de siembra a mitad de octubre**. De esta forma aumenta la probabilidad de que la floración y el llenado de grano finalicen antes de que los eventos extremos ocurran, minimizándose los impactos sobre el rendimiento.

Numerosos estudios en diversas regiones europeas proponen la adopción de fechas de siembra tempranas como medida de adaptación clave en el cultivo de cereales. En ambientes semiáridos, se ha estimado que adelantar la fecha de siembra 15 días (de finales a mediados de octubre) supone un incremento en las producciones de trigo en torno al 8% para el periodo 2021-2050 y del 16% para el periodo 2071-2100. En regadío, los beneficios de las siembras tempranas son similares, con incrementos para el futuro cercano de entre el 4 y el 8.5%, y de entre el 15.5 y el 17% para el futuro lejano [21].

En ambientes semiáridos, además, el adelanto de la fecha de siembra debe combinarse con el uso de cultivares de ciclo largo, que cuenten con un tiempo relativamente largo hasta el espigado, con altas tasas de llenado de grano y maduración temprana, lo que ayudará a evitar la sequía y el estrés por altas temperaturas al final de la estación de crecimiento [22].

### Impacto a...

Corto plazo

Medio plazo

Largo plazo

### Coste



### Requerimientos técnicos



### Incentivos /Subvenciones

No se recogen incentivos para esta medida en las intervenciones del Pilar I y Pilar II de la PAC para el periodo 2023-2027.

## Consideraciones

- La **meteorología** es el principal condicionante para adaptar la fecha de siembra y determinará si esta medida puede adoptarse o no cada campaña (falta de precipitaciones en secano o exceso de lluvias tanto en secano como en regadío).
- **Rotación de cultivos:** en función del cultivo que preceda al cereal y cuándo se coseche permitirá la adopción o no de esta práctica, de ahí la importancia de coordinar esta práctica con la rotación.
- Combinar con el uso de **variedades de madurez temprana** y un **tiempo relativamente largo hasta el espigado**.
- Tamaño de las explotaciones: cuando el número de hectáreas a sembrar es elevado, los trabajos de siembra se programan según las horas necesarias que hay que dedicar a cada tarea y será difícil que todas las parcelas se siembren en fechas tempranas. La siembra directa podría reducir el tiempo dedicado a las labores de preparación del terreno y aumentar el número de hectáreas sembradas en fechas tempranas.
- **Riesgo de heladas en floración:** a pesar de que las proyecciones climáticas muestran una reducción del riesgo de heladas, adelantar la fecha de siembra supone aumentar la probabilidad de que ocurra un daño por bajas temperaturas durante la floración y el llenado de grano, lo que tendría consecuencias negativas para el cultivo.
- Sembrar temprano puede **aumentar la vulnerabilidad a daños de zabro**, ya que las condiciones pueden ser más favorables para su desarrollo.
- Las **hierbas adventicias** pueden ser un problema en siembras tempranas, especialmente en parcelas con altas infestaciones. En estos casos, sería recomendable reconsiderar aplicar esta práctica.

## Experimentos

**LOCALIZACIÓN:** Cuenca de Pamplona (Navarra)

**CAMPAÑA:** 2023-2024

### OBJETIVO:

Comparar la evolución fenológica de un cultivo de avena sembrado el 15/10/23 con otro sembrado el 01/02/24 mediante teledetección, para identificar los estados fenológicos críticos que afectan al rendimiento y evaluar si estos coinciden con los períodos del año en los que se incrementan los riesgos de estrés térmico e hídrico. Además, se han estimado las fechas de inicio del estrés hídrico y el rendimiento de ambos cultivos. Se utilizaron cámaras termográficas en dos fechas del mes de junio para registrar las temperaturas de cada cultivo y, en función del estado fenológico y las temperaturas observadas en campo, evaluar el riesgo de asurado del grano y las posibles pérdidas de rendimiento.

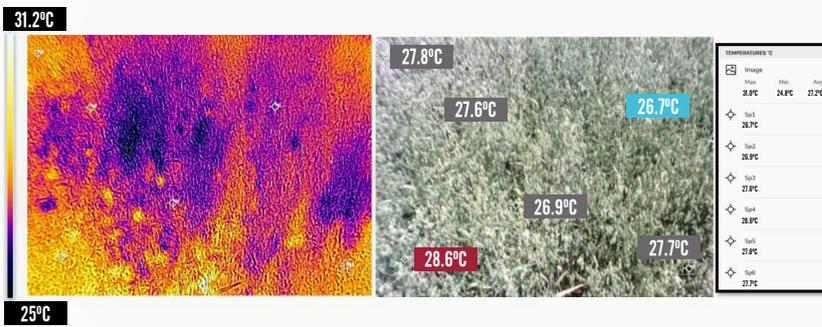


## VISITA 01: Día 08 de Junio de 2024

### AVENA TEMPRANA



**TEMPERATURA** < 31°C: Bajo riesgo de asurado

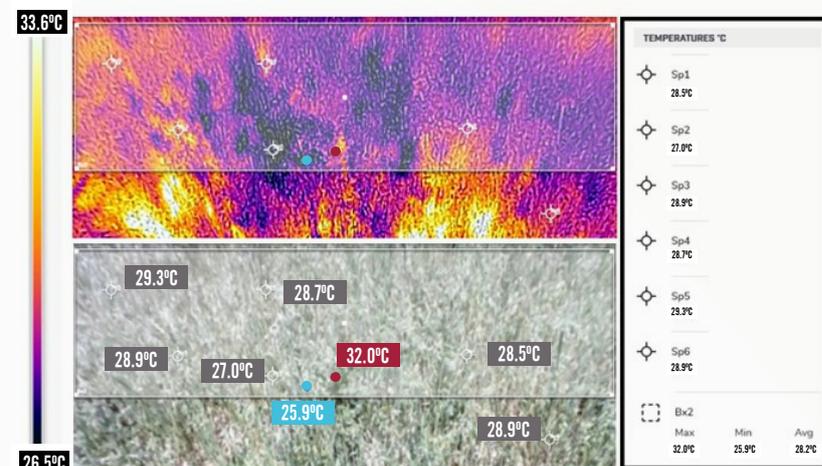


### AVENA TARDÍA



**TEMPERATURA** > 25°C → Se acorta el periodo de llenado y se acelera la tasa de crecimiento del grano.

La fase de grano lechoso a pastoso ocurrirá más adelante, lo que aumenta el riesgo de ocurran eventos extremos de temperatura y déficit hídrico.



**VISITA 02:** Día 27 de Junio de 2024

## AVENA TEMPRANA



**MADURACIÓN COMPLETA** >> Sin riesgo de merma en el rendimiento



MADURACIÓN: Previsión cosecha en 10 días

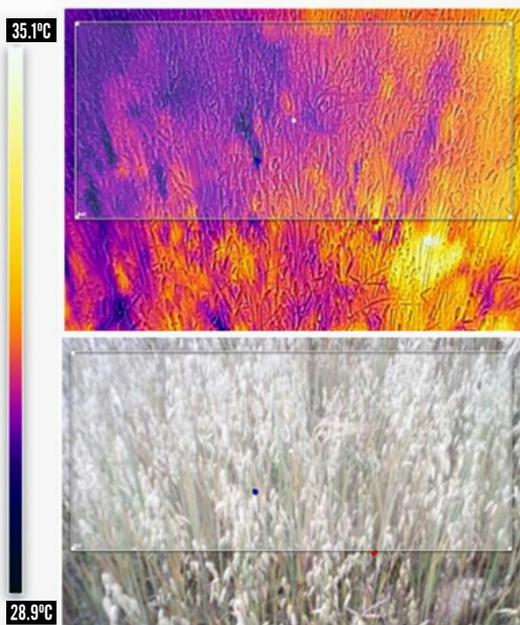
## AVENA TARDÍA



**TEMPERATURA** > 31°C → Riesgo alto de asurado del grano (granos arrugados y con bajo peso)



Grano Lechoso- Pastoso

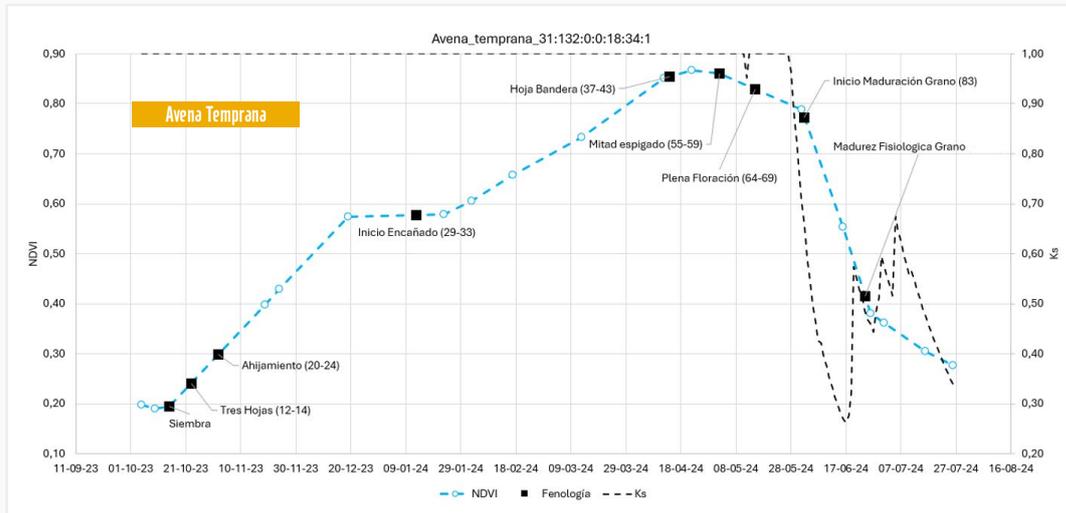


TEMPERATURES °C			
	Image		
	Max	Min	Avg
	35.0	29.7	31.5
	Bx2		
	Max	Min	Avg
	32.9	29.7	31.3

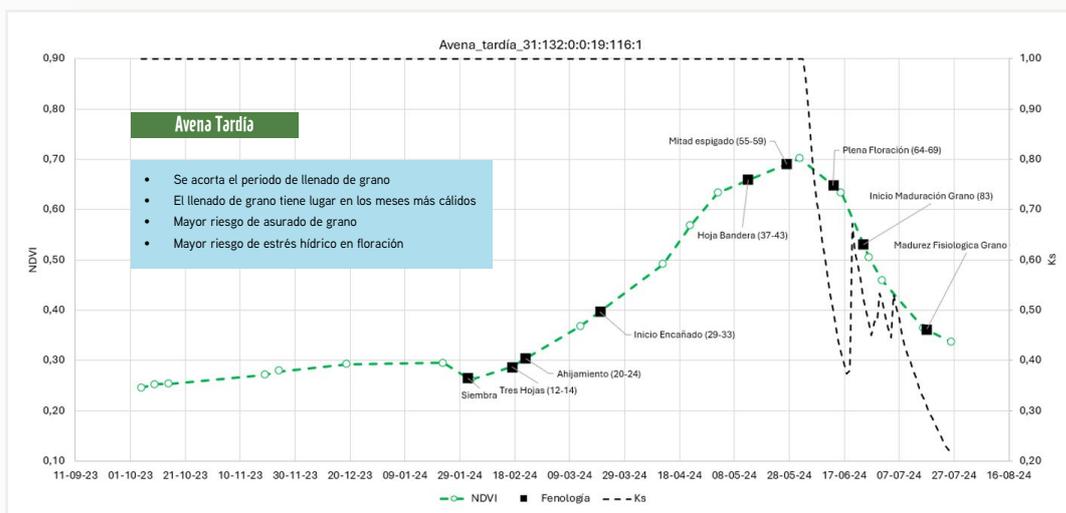


## Resultados Teledetección 01:

Estimación de los principales estadios fenológicos de la avena (BBCH) y fechas inicio de estrés hídrico.



- Duración periodo llenado de grano: **40 días** aproximadamente (mitad mayo a tercera semana de junio).
- Riesgo de asurado (Grano lechoso a pastoso): Final de mayo a principios de junio
- El **estrés hídrico** ( $K_s < 1$ ) **comienza en grano pastoso**, estado fenológico menos sensible para la pérdida de rendimiento.



- Duración periodo llenado de grano: **30 días** aproximadamente (mitad junio a mediados julio)
- Riesgo de asurado (Grano lechoso a pastoso): Segunda quincena de junio
- El **estrés hídrico** ( $K_s < 1$ ) **comienza a finales de espigado** y se extiende durante el llenado de grano, por lo que la influencia sobre el rendimiento será mayor.

## Resultados Teledetección 02:

Estimación del Rendimiento (kg/ha).



Los resultados muestran un mayor rendimiento en la avena temprana (4.941 kg/ha frente a 3.019 kg/ha). Los resultados indican una mayor transpiración ajustada acumulada en la avena temprana, lo que indicaría una mayor producción de biomasa.



# Uso de Bioestimulantes

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

Actualmente existen en el mercado numerosos productos con capacidad para estimular los procesos naturales que benefician el crecimiento y las respuestas de las plantas a los diferentes tipos de estrés.

Las plantas reaccionan ante diferentes factores ambientales estresantes, como la sequía o las altas temperaturas, liberando en las células unas moléculas portadoras de oxígeno denominadas especies reactivas del oxígeno (ROS). Estas desempeñan un importante papel para el funcionamiento normal de diversos procesos de las plantas, tales como la fotosíntesis, la protección frente a patógenos y el crecimiento. Sin embargo, unos niveles elevados pueden provocar daños en el ADN y la estructura de las células provocando **estrés oxidativo**. Para contrarrestar los efectos nocivos de ROS, las plantas han desarrollado un sistema antioxidante que se basa en la eliminación de radicales que reduce el daño celular y vegetal.

Por lo tanto, el uso de bioestimulantes que contengan compuestos **antioxidantes**, como los polifenoles, polialcoholes, ácidos hidroxibenzoicos, y **osmoprotectores**, como la glicina betaína, la prolina o el manitol, pueden ayudar a paliar los efectos del estrés térmico e hídrico en las plantas.

También existen otros productos a base de algas, como *Ecklonia máxima* o *Ascophyllum nodosum*, que ayudan a la planta a reajustar su fisiología y metabolismo tras situaciones extremas, gracias al conjunto de polisacáridos, vitaminas, esteroides, aminoácidos y fitohormonas que contienen de forma natural.

### Impacto a...

Corto plazo

Medio plazo

Largo plazo

### Coste



### Requerimientos técnicos



### Incentivos / Subvenciones

No se recogen incentivos para esta medida en las intervenciones del Pilar I y Pilar II de la PAC para el periodo 2023-2027.



# Variedades adaptadas a las nuevas condiciones climáticas

Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

## Descripción de la medida

Dado que los efectos del cambio climático pueden depender de las variedades, la correcta elección varietal es una medida de adaptación importante para minimizar sus efectos.

### Mejora genética

La investigación sobre nuevas variedades que respondan mejor a los nuevos estreses, tanto bióticos (incidencia de plagas y enfermedades) como abióticos (estrés térmico, hídrico, reducción horas de frío, entre otras) van a determinar la productividad y rentabilidad de los cereales en el futuro. Por lo tanto, la mejora genética y la introducción de nuevas variedades son una herramienta clave para minimizar los impactos del cambio climático.

Gracias a los programas de mejora vegetal, cada año se lanzan al mercado nuevas variedades de cereal que presentan mejoras en comparación con las ya existentes, especialmente en lo que respecta a los rasgos relacionados con la adaptación climática. No obstante, será esencial seleccionar aquellas **variedades que mejor se ajusten a las condiciones del cultivo en cada zona**. En este sentido, la **red GENVCE** (Grupo para la Evaluación de Nuevas Variedades de Cultivos Extensivos en España) realiza ensayos de variedades por CCAA, con el objetivo de analizar su productividad, adaptación ambiental y calidad tecnológica en cada territorio. La transferencia de todo este conocimiento al sector será la clave del éxito de esta medida.

### Variedades locales (tradicionales)

La apuesta por el uso de variedades locales con mayor rusticidad es otra medida interesante desde el punto de vista de la adaptación. Se han identificado rasgos asociados a la tolerancia a la sequía y a temperaturas elevadas en variedades tradicionales. De hecho, diversas investigaciones señalan un mejor comportamiento de estas variedades frente a las modernas en áreas vulnerables al cambio climático [23].

El laboratorio de Historia de los Agroecosistemas de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla ha trabajado en la recuperación de variedades tradicionales de trigo en agroecosistemas de secano mediterráneos. En sus ensayos de campo han confirmado que dichas variedades producen la misma cantidad de grano que las variedades modernas, además de producir más fitomasa de paja y raíces, lo que incrementa la materia orgánica edáfica y el secuestro de carbono. Por lo tanto, produce el mismo grano con la ventaja añadida de mejorar el suelo y la productividad potencial a futuro.

Sin embargo, es importante considerar que, en el ámbito de la agroindustria, las harinas y sémolas provenientes de estas variedades se adaptan mejor a la transformación artesanal o de pequeña escala, comúnmente empleada en el sector ecológico. Esto se debe a que carecen de las características necesarias para su procesamiento industrial, lo que complica su comercialización fuera de los mercados de alto valor añadido.

### Diversificación varietal

Incrementar el número de variedades cultivadas en la explotación aumenta la variabilidad en las respuestas de los diferentes genotipos, por lo que se diversifican (diluyen) los riesgos y podrían minimizarse los impactos del clima, así como de las plagas y enfermedades que puedan afectar al cultivo.



### Consideraciones

- La mejora genética es un proceso lento y requiere de una gran inversión para conseguir poner a disposición de los agricultores variedades adaptadas a las nuevas condiciones climáticas. Además, no siempre las prioridades de las casas comerciales van enfocadas a este objetivo.
- Es necesario evaluar y caracterizar adecuadamente las nuevas variedades que se lanzan al mercado para poder ofrecer un asesoramiento adecuado al sector de los cereales.
- **Variedades tradicionales:**
  - Dificultad de obtención de semilla (pocos agricultores interesados en la recuperación de variedades tradicionales)
  - Poco interés para la agroindustria a gran escala

### Otros beneficios ambientales

- **Fomento de la biodiversidad**
- **Captura de carbono**



# Herramientas para mejorar la gestión y la eficiencia de la fertilización

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

La aplicación de fertilizantes nitrogenados en la actividad agrícola es una de las principales causas de emisiones GEI, de ahí que ajustar la dosis a las necesidades reales del cultivo sea clave para reducir dichas emisiones. Pero, dar a la planta los nutrientes que necesita de forma equilibrada, hace que esta tolere mejor el estrés térmico y use el agua de forma más eficiente.

La evidencia acumulada sugiere que el estado nutricional mineral de las plantas afecta en gran medida a su capacidad para adaptarse a condiciones ambientales adversas. Cuando se utiliza mucho fertilizante, las plantas crecen con más fuerza, por lo que necesitan consumir más agua, y en ausencia de precipitaciones, se ven más afectadas por la sequía que cuando crecen con menor intensidad. Diversos estudios han puesto de manifiesto que distintos niveles de fertilización nitrogenada modifican la sensibilidad de las plantas a la sequía y a la temperatura.

Para maximizar la eficiencia de la fertilización, especialmente la nitrogenada, es fundamental aplicar lo que se conoce como **Estrategia 4R**, que se basa en: *right rate* (ajustar la dosis), *right source* (fuente de N adecuada), *right place* (correcta localización) y *right time* (en el momento adecuado). Seguir esta norma es clave para aprovechar al máximo los nutrientes en cualquier escenario.

### DOSIS Y MOMENTO DE APLICACIÓN DEL FERTILIZANTE

Existen diversas herramientas, que se presentan a continuación, que nos permiten conocer tanto el contenido nutricional del suelo como de la planta, así como su evolución, y nos ayudan a sincronizar al máximo la aplicación del fertilizante con los momentos de mayor demanda del cereal, y, por consiguiente, racionalizar la dosis.

#### Análisis de suelo

Es una herramienta asequible y fundamental para conocer la calidad del suelo y sus necesidades, determinando sus propiedades físicas y químicas, así como el contenido en macro y micronutrientes. Es el punto de partida para el diseño de los planes de fertilización. Esto reportará beneficios a nivel de producción, así como de ahorro en fertilizantes.

#### Agricultura de precisión

La Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales de plantas y animales y los combina con otras informaciones para respaldar las

decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola (*International Society of Precision Agriculture*). En la actualidad, se ha convertido en una herramienta clave para afrontar el cambio climático.

En la práctica, existen diversas tecnologías que hacen posible la agricultura de precisión, las cuales se dividen entre tecnologías de información y de actuación.

### Tecnologías de información

Engloban a todos los dispositivos que permiten captar datos del cultivo, suelo, clima, maquinaria y convertirlos en mapas georreferenciados. Se incluye el GPS y todo tipo de sensores fijos y móviles, los cuales pueden instalarse tanto en el campo como en la maquinaria (ejemplo: mapas de rendimiento en cosechadoras).

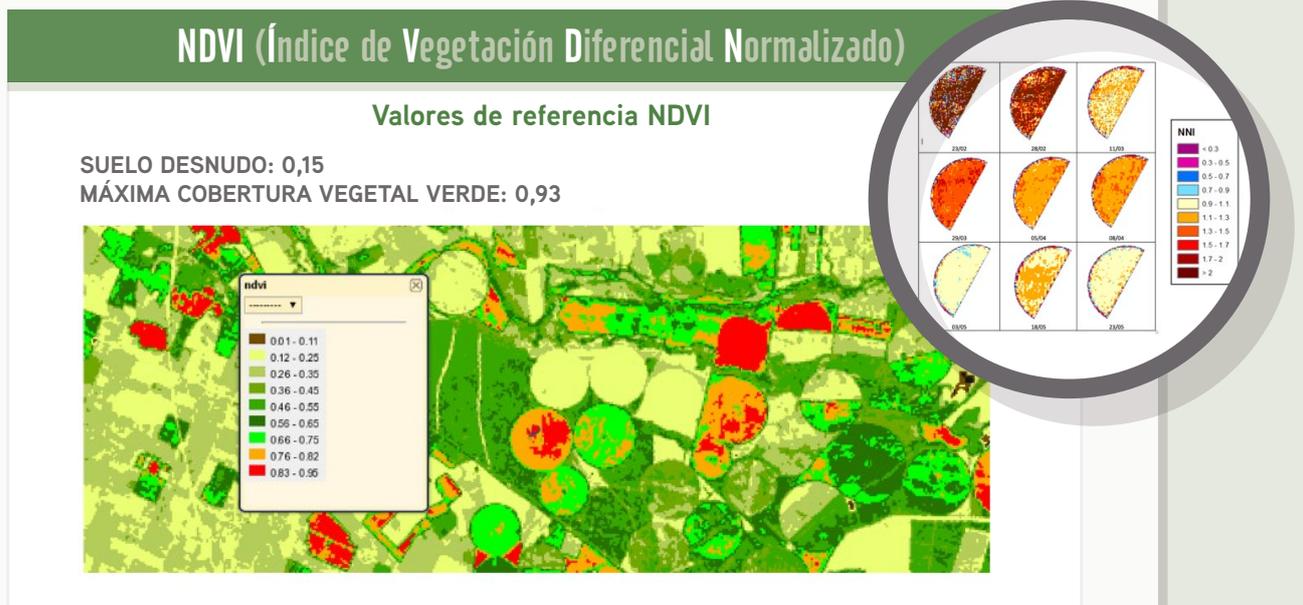
Una de las tecnologías más destacadas es la **teledetección** (imágenes desde satélites, drones), a partir de la cual se puede obtener, mediante el cálculo de diversos índices, como el “Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado” (NDVI por sus siglas en inglés), información relevante de una superficie vegetal con una alta resolución espacial sin la necesidad de acudir presencialmente al campo. Esto la convierte en una herramienta clave de gestión, a partir de la cual se puede conocer y evaluar cómo varían espacial y temporalmente las características de una cubierta vegetal y detectar anomalías de crecimiento, así como cuantificar daños. Teniendo en cuenta, además, la gran heterogeneidad que puede existir dentro de una misma parcela, debido a factores edafológicos, orográficos, entre otros, la teledetección permite caracterizar la variabilidad intraparcular y estimar la capacidad productiva en diferentes zonas. Esto facilita el cálculo de las necesidades de fertilización y riego, así como su distribución espacial y aplicación a dosis variables, siempre que se disponga de la tecnología adecuada, como abonadoras de dosis variable y sistemas de riego con sectores diferenciados.

La **estrategia de dosis variable de fertilizante** tiene como factor común la **aplicación de más fertilizante en las zonas con mayor potencial productivo, ahorrando producto en las zonas con menor potencial**, donde se producen pérdidas de este elemento al aplicar una dosis superior a la capacidad de asimilación del cultivo. Esta estrategia permite **ahorros de fertilizante entre el 15 y 30%**.



**FIGURA 1.** Abonadora de dosis variable sobre mapa de abonado variable y mapa de preinscripción de abonado (Fuente: Agrisat Iberia S.L.).

Además, mediante teledetección se han desarrollado otros índices, como el NNI (Índice de Nutrición Nitrogenada), que permite monitorear a lo largo de la estación de crecimiento el aprovechamiento adecuado de los aportes nitrogenados por el cultivo. Esto facilita el ajuste de las dosis y los momentos de aplicación a las fases de mayor demanda, lo que no solo optimiza el uso del nitrógeno, sino que también contribuye a reducir las pérdidas de este elemento al medio ambiente y ahorrar costes.



**FIGURA 2.** Índices de vegetación NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado) y NNI (Índice de Nutrición Nitrogenada). **Fuente: Agrisat Iberia S.L.**

### Tecnologías de actuación

Engloban los sistemas que permiten llevar a cabo la aplicación diferencial de insumos en campo, como la maquinaria para dosificación variable de fertilizantes, fitosanitarios, semilla, agua de riego, y la robótica agrícola en general.

### FUENTE DE NITRÓGENO (N)

En cuanto a la elección del tipo de fertilizante nitrogenado más adecuado, en el caso de fertilizantes inorgánicos, se debe seleccionar aquel cuya concentración se adapte mejor a las necesidades que se han estimado para el cultivo, y **dar prioridad a la utilización de fertilizantes especiales, con inhibidores o de liberación controlada.**

Este tipo de fertilizantes tienen en común mayor eficacia por unidad fertilizante aplicada, al potenciar una fertilización controlada y evitar pérdidas por lixiviación y volatilización del N. En el caso de los fertilizantes con inhibidores, existen dos tipos en el mercado, los basados en ureasas, que evitan la hidrólisis de la urea ralentizando así la formación de amonio, o basados en la inhibición de la nitrificación, que impiden temporalmente la oxidación del nitrógeno en forma de amonio a nitrito, frenando así la formación de nitrato. En cuanto a los fertilizantes de liberación controlada, se basan en la baja solubilidad o en tecnologías adaptadas a la demanda de la planta.

En resumen, el uso de fertilizantes de liberación controlada busca sincronizar la transformación del nitrógeno a las necesidades temporales de los cereales, reduciendo pérdidas al medio ambiente y mejorando la eficiencia en su uso. Esto permite reducir hasta un 30% la cantidad de fertilizantes aplicados y disminuir el número de pases de maquinaria, lo que incrementa la rentabilidad del agricultor. Además, algunas investigaciones indican que los inhibidores pueden mejorar la microbiota del suelo y reducir la presencia de fitopatógenos.

## LOCALIZACIÓN DEL FERTILIZANTE

La aplicación del fertilizante **en línea de siembra**, a la vez que se deposita la semilla, hace que los nutrientes sean asimilados más fácilmente por la planta, pudiendo reducirse la dosis. Además, el porcentaje de plantas emergidas es mayor, ya que los nutrientes están más localizados (próximos a la raíz) por lo que son más fácilmente asimilados en los momentos demandados.

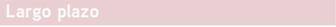


**FIGURA 3.** Tolva delantera para abonado en línea de siembra.

El sistema radicular también se ve beneficiado, siendo su crecimiento más rápido y vigoroso, favoreciendo así una mayor la asimilación de agua y nutrientes. Los fertilizantes microgranulados, con inhibidores o de liberación controlada, son los más idóneos para aplicarse en línea de siembra.

Se necesita maquinaria específica, como una sembradora combinada, o integrar una tolva delantera para el fertilizante para poder llevar a cabo esta práctica.

La adquisición de maquinaria y de cierta tecnología de precisión requiere una inversión inicial alta

Impacto a...	Coste	Requerimientos técnicos
<p>Corto plazo </p> <p>Medio plazo </p> <p>Largo plazo </p>		

### Incentivos / Subvenciones

No se recogen incentivos para esta medida en las intervenciones del Pilar I y Pilar II de la PAC para el periodo 2023-2027.

### Otros beneficios ambientales

- Reducción emisiones de gases de efecto invernadero
- Reducción contaminación de suelos y aguas
- Fomento de la biodiversidad



# En regadío, herramientas para optimizar el riego

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

Uno de los grandes desafíos frente al cambio climático es optimizar el uso del agua, dado el aumento de la escasez hídrica y el creciente coste de la energía. Esto implica mejorar la eficiencia en su aprovechamiento, logrando altos rendimientos en regadío con el menor aporte posible y, en secano, maximizando el uso de las precipitaciones.

En parcelas de **secano**, debido a la creciente escasez de agua, es poco probable que la superficie de regadío aumente. No obstante, un **riego de apoyo**, donde fuese posible, sería una buena opción para mejorar el rendimiento; este consiste en aportar la mínima cantidad de agua en los estados fenológicos más críticos, como **en espigado y floración**, en el caso del cereal.

En el caso de las **explotaciones con disponibilidad de riego**, una **correcta programación** de este, ajustando la cantidad de agua a las condiciones reales del cultivo en el momento adecuado, será clave para conseguir ahorrar agua. Para ello, los **avances tecnológicos, como las herramientas de ayuda a la toma de decisiones para el riego, o el uso** de materiales de riego más eficientes, como los **aspersores a baja presión**, nos pueden ayudar a cumplir este objetivo. A continuación, se analiza cada una de estas tecnologías.

## HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA EL RIEGO

Calcular de forma adecuada las necesidades de riego del cereal es fundamental para suministrar la dotación realmente requerida y ahorrar agua.

La incorporación de nuevas tecnologías al regadío permite optimizar el manejo del riego, aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental. Estas innovaciones alcanzan tanto al sistema de distribución del agua como a la interacción entre suelo, planta y atmósfera, mejorando la precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos [24]. Destacan la **teledetección**, los **sensores de humedad del suelo** y el uso de **servicios de asesoramiento al regante (SAR)**.

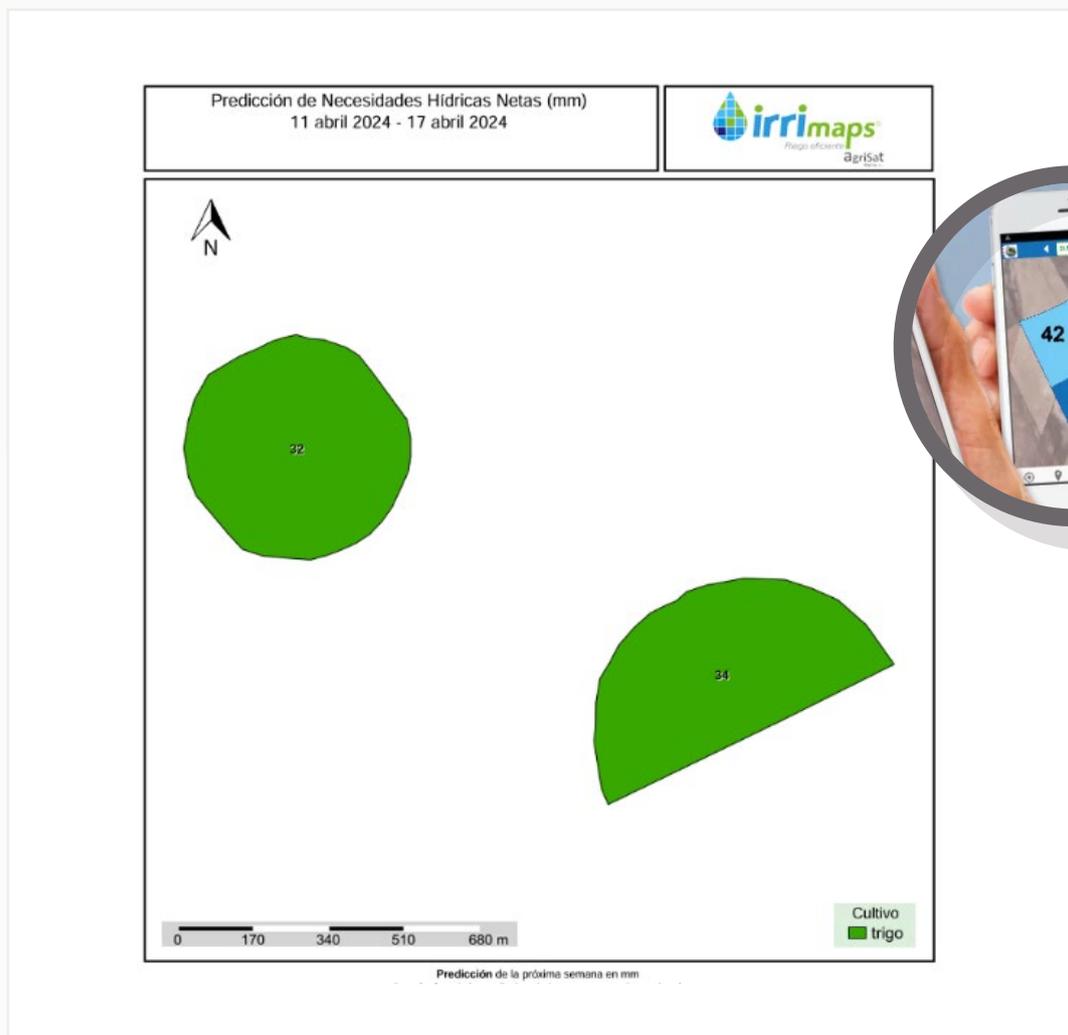
### Teledetección

La teledetección es una tecnología válida y económica para apoyar la gestión hídrica de las explotaciones cerealistas, a partir de la cual se puede ajustar la cantidad de agua a las necesidades reales del cultivo, además de determinar el momento más adecuado de riego y alcanzar así una mayor eficiencia hídrica.

La metodología, ampliamente utilizada y comúnmente aceptada, para la estimación de las necesidades de agua de los cultivos es la denominada “Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia” (Kc-ET<sub>o</sub>), descrita de forma detallada en el manual de FAO56.

La determinación del Kc adecuado, en base a los valores empíricos recogidos en la bibliografía, a menudo implica un alto grado de incertidumbre, mayormente cuando se trata de seleccionar un único valor que defina a una parcela de cultivo completa. Las investigaciones científicas han puesto de manifiesto la buena relación lineal existente entre el NDVI y el coeficiente de cultivo, lo que permite obtener un Kc realmente ajustado a la situación del cultivo en cada momento.

Por lo tanto, a partir de series temporales de imágenes de satélite asistidas por teledetección y datos de predicción meteorológica, se pueden estimar las necesidades hídricas netas acumuladas a escala de unidad de manejo de riego (ej: sectores de riego) y proporcionar recomendaciones a una semana vista.



**FIGURA 1.** Recomendación de riego (mm) para cultivo de trigo mediante sistema Irrimaps asistido por teledetección y visualización en aplicación móvil (Fuente: Agrisat Iberia S.L.).

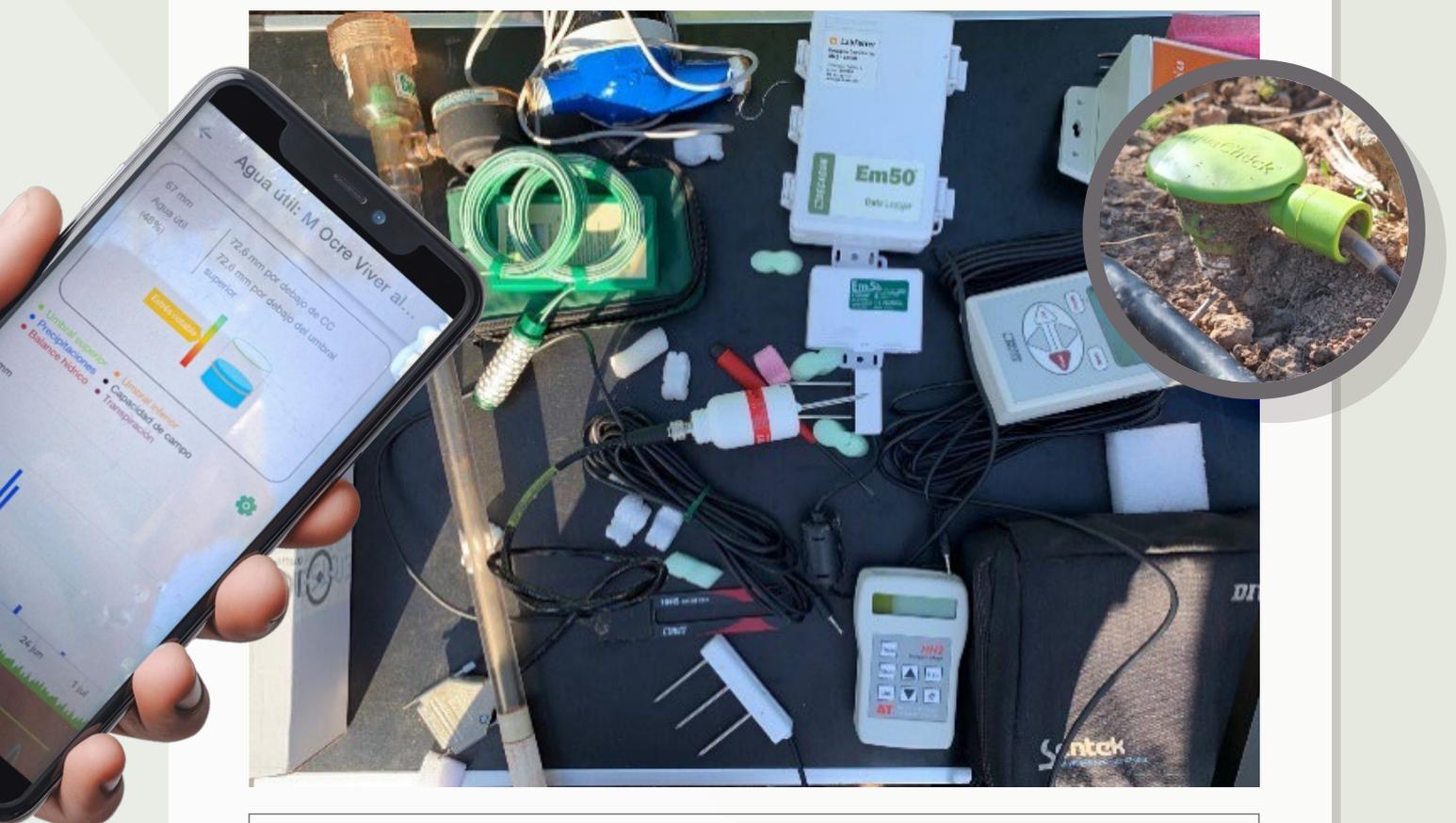
### Sensores de humedad del suelo

El control remoto del riego y el uso de sensores de humedad, que permiten monitorizar el agua en el suelo en tiempo real, son otra de las tecnologías clave para optimizar el uso del agua. No obstante, se deben tener ciertos conocimientos para interpretar los datos y estimar las necesidades hídricas del cultivo.

Aunque existen dispositivos manuales, los más interesantes son aquellos que funcionan de forma automática, sin la necesidad de ir directamente al campo para hacer la medición. La mayoría de los sensores automáticos funcionan mediante energía solar, por lo que no hace falta recargarlos, y se conectan con una aplicación que muestra los datos recabados, además de las predicciones meteorológicas de cada zona, pudiéndose, además, programar el riego de forma remota. Muchos de estos sensores forman parte de estaciones meteorológicas que, además, aportan otros datos de interés para la gestión eficiente del cultivo.

Existen distintos tipos de sensores en el mercado con diferentes costes en función de su precisión, pero su elección dependerá, también, del tipo de cultivo, la textura y salinidad del suelo.

Para que sean efectivos, deben instalarse de forma rigurosa y ubicarse en una zona estratégica, de tal manera que los datos obtenidos puedan extrapolarse a otras superficies. Se introducen en el suelo, en la zona radicular del cultivo. El número de sensores dependerá de la extensión y variabilidad de la explotación, siendo necesario, por lo general, colocar más de 1 sensor, lo que puede aumentar los costes respecto a la teledetección.



**FIGURA 2.** App con datos de humedad de suelo recabados por sensor. Variedad de sondas de humedad de suelo disponibles en el mercado. Sensor de humedad de suelo.

### Servicio de Asesoramiento al Regante (SAR)

Algunas comunidades autónomas disponen de Servicios de Asesoramiento al Regante, que calculan y difunden de forma gratuita las necesidades de riego para distintas zonas regables y cultivos, incluido el cereal. Para ello, utilizan datos meteorológicos de estaciones agroclimáticas automáticas distribuidas en el territorio. Los consumos de referencia se determinan según el cultivo y la zona, y se actualizan semanalmente a través de distintos medios, además de estar disponibles en internet. Gracias a esta información, los regantes pueden conocer con precisión el agua que deben aportar a cada parcela y anticipar la demanda hídrica a lo largo de la campaña de riego.



**FIGURA 3.** Servicio de Asesoramiento de Riegos en España por comunidades autónomas.  
[www.fega.gob.es/sites/default/files/inline-files/fega\\_asesor\\_riegos\\_tcm5\\_27413.pdf](http://www.fega.gob.es/sites/default/files/inline-files/fega_asesor_riegos_tcm5_27413.pdf)

### ASPERSORES A BAJA PRESIÓN

El diseño tradicional de un sistema de riego por aspersión con cobertura total enterrada y un marco de riego de 18 × 15T garantiza una presión mínima de 3,0 bar en la boquilla del aspersor y una presión media de funcionamiento de 3,5 bar. Reducir esta presión sin modificar el marco de riego, pero manteniendo su calidad, no solo permitiría un ahorro energético, sino también una reducción del consumo de agua de hasta un 3%, al disminuir las pérdidas por evaporación y arrastre [25]. Esto se debe a que estos aspersores generan gotas más grandes y resistentes al viento. Además, se logra una uniformidad de distribución del riego superior al 95%, permitiendo operar durante períodos más cortos.

Diversos estudios, como el realizado en parcelas de cereal en Navarra en 2018 dentro del Proyecto LIFE NADAPTA, han confirmado que la reducción de presión no afecta a la distribución del agua en el suelo, el vigor del cultivo ni el rendimiento, obteniendo resultados equivalentes a los de los aspersores de presión convencional.

En cuanto a las herramientas para optimizar el riego, su coste puede variar en función de la precisión y las necesidades particulares de cada explotación. Referente a los aspersores de baja presión, en sistemas existentes es rentable si el ahorro en energía supera el coste de la modificación; en instalaciones nuevas, es más sencillo y rentable desde el inicio

Impacto a...	Coste	Requerimientos técnicos
<p>Corto plazo</p> <p>Medio plazo</p> <p>Largo plazo</p>		

## Consideraciones

- En explotaciones cerealistas, por su extensión, es más recomendable la teledetección como herramienta para optimizar el riego que los sensores de humedad de suelo, aunque ambos se pueden combinar.
- En la instalación de aspersores a baja presión se debe asegurar que el diámetro de las tuberías sea adecuado para mantener el caudal a baja presión, evitando pérdidas de agua y garantizando una distribución uniforme.

## Otros beneficios ambientales

- **Control de la erosión**
- **Reducción de la contaminación:** Se minimiza la lixiviación de nutrientes y pesticidas hacia los acuíferos y cuerpos de agua cercanos
- **Fomento de la biodiversidad:** al reducir el exceso de humedad se crean condiciones más estables para especies beneficiosas
- **Un riego bien gestionado mantiene la salud del suelo y su capacidad para capturar carbono**



## 5.1.2. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

### A MEDIO PLAZO

Este conjunto de medidas reúne prácticas que pueden implementarse en un plazo razonable y cuyos efectos positivos se manifiestan a medio plazo. Su objetivo principal es **mejorar la capacidad del suelo para retener agua**, optimizando su almacenamiento durante el mayor tiempo posible y, al mismo tiempo, **atenuar su temperatura**.

La capacidad de retención de agua en los suelos agrícolas depende en gran medida de su estructura, porosidad y contenido de materia orgánica. Esta última, en particular su componente principal, el carbono orgánico del suelo (COS), juega un papel clave en la conservación y mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Contribuye a la formación y estabilidad de los agregados, reduce la compactación, mejora las propiedades hidrodinámicas (infiltración, permeabilidad y conductividad hidráulica), reduce las oscilaciones térmicas y la evaporación, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y sirve de fuente de energía para los microorganismos.

Por lo tanto, **aumentar los niveles de materia orgánica en el suelo conlleva un aumento de la porosidad, con el resultado inmediato de que el agua se infiltra más fácilmente y puede retenerse en el suelo**.

En este sentido, se han calculado como influyen los cambios en el nivel de carbono orgánico del suelo en el almacenamiento de agua en los 30 cm superiores del suelo (suelo con densidad aparente de 1,4 gr/cm<sup>3</sup>). Los resultados se muestran en la siguiente Tabla (Tabla 6).

Cambio en la concentración de Carbono Orgánico	Cambio en la reserva de Carbono Orgánico (kg/m <sup>2</sup> )	Agua adicional (litros/m <sup>2</sup> )	Agua adicional (litros/ha)	CO <sub>2</sub> secuestrado (t/ha)
1%	4.2	16.8	168,000	154
2%	8.4	33.6	336,000	308
3%	12.6	50.4	504,000	462
4%	16.8	67.2	672,000	616

TABLA 6. Jones-Carbon&Cathments [26].

La importancia de atenuar la temperatura del suelo (TS) radica en su impacto sobre múltiples procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren tanto en el suelo como en las plantas que crecen en él. En este sentido, una TS excesivamente alta afecta negativamente a procesos metabólicos como la respiración, la fotosíntesis y la transpiración, además de interferir en la absorción de agua y nutrientes, y alterar la actividad microbiana y la dinámica de la materia orgánica del suelo. La TS está condicionada por la cantidad de radiación solar incidente, la presencia de vegetación, la topografía (a mayor inclinación del terreno mayor incidencia de la radiación solar), las propiedades físicas y químicas (textura y presencia de materia orgánica) y por el contenido de humedad. En el contexto de cambio climático es importante entender que los flujos de agua y calor en el suelo están interconectados, por lo tanto, **la presencia de humedad tiene una influencia directa en la temperatura del suelo**. El calor específico del agua es mayor que el del suelo, y, en consecuencia, los suelos con alta humedad tienen un mayor calor específico que los suelos secos, lo que resulta en una menor temperatura del suelo [27], y, por tanto, en menores variaciones térmicas. Además, en suelos secos, la radiación solar incidente se transforma principalmente en calor sensible, lo que efectivamente incrementa la temperatura del suelo y del aire circundante. En suelos húmedos, sin embargo, parte de esa radiación se destina al proceso de evaporación del agua (calor latente), lo que limita el aumento de temperatura tanto en el suelo como en el aire. Por lo tanto, **la baja humedad del suelo amplifica los daños por estrés térmico en los cereales**.

En cuanto al contenido de materia orgánica, este está altamente influenciado por el manejo del suelo, de tal manera que existen prácticas que generan su detrimento en el tiempo, a la vez que hay prácticas que favorecen su acumulación. En este contexto, **la agricultura de conservación (AC)** juega un papel clave, ya que **sus prácticas contribuyen a preservar y aumentar la materia orgánica, mejorando el balance de agua en el suelo**. Esto, a su vez, **reduce la vulnerabilidad de los cereales al estrés térmico e hídrico**.

La AEACSV (Asociación Española Agricultura de Conservación y Suelos Vivos) definen AC como un sistema de producción agrícola sostenible, que comprende un conjunto de prácticas agronómicas adaptadas a las exigencias del cultivo y a las condiciones locales de cada región, cuyas técnicas de cultivo y de manejo de suelo lo protegen de su erosión y degradación, mejoran su calidad y biodiversidad, contribuyen a la preservación de los recursos naturales, agua y aire, sin menoscabo de los niveles de producción de las explotaciones. Se fundamenta en **3 principios** [28]:

- **Mínima alteración mecánica del suelo:** supone la supresión del laboreo. La Práctica de referencia es la **Siembra Directa**. También incluye el mínimo laboreo, siempre y cuando los aperos utilizados para realizar las labores de presembrado dejen en superficie mínimo un 30% de restos vegetales sobre el suelo.
- **Cobertura vegetal permanente en el suelo** (al menos un 30%) con residuos de cultivo y/o cultivos de cobertura.
- **Rotación y diversificación de cultivos.**

La agricultura de conservación (AC) es una herramienta eficaz frente al cambio climático. Contribuye a la mitigación al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera hasta en un 22 % [28] y, al mismo tiempo, desempeña un papel clave en la adaptación, ayudando a afrontar los riesgos climáticos. Sus beneficios en este sentido incluyen la mejora del suelo y su capacidad de retención de agua, el fomento de la biodiversidad y el aumento de la resistencia de los cultivos frente a condiciones meteorológicas extremas, amortiguando impactos como el estrés térmico e hídrico.



**FIGURA 11.** Papel de la AC en la adaptación al Cambio Climático. Fuente AEACSV [28].

En las siguientes fichas se presenta cada práctica de AC como una medida de adaptación específica, analizando su impacto y beneficios de manera individual.

- **Siembra directa**
- **Mantenimiento de una cobertura vegetal permanente en el suelo**
- **Rotación y diversificación de cultivos**
- **Fertilización orgánica**



# Siembra directa (SD)

Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

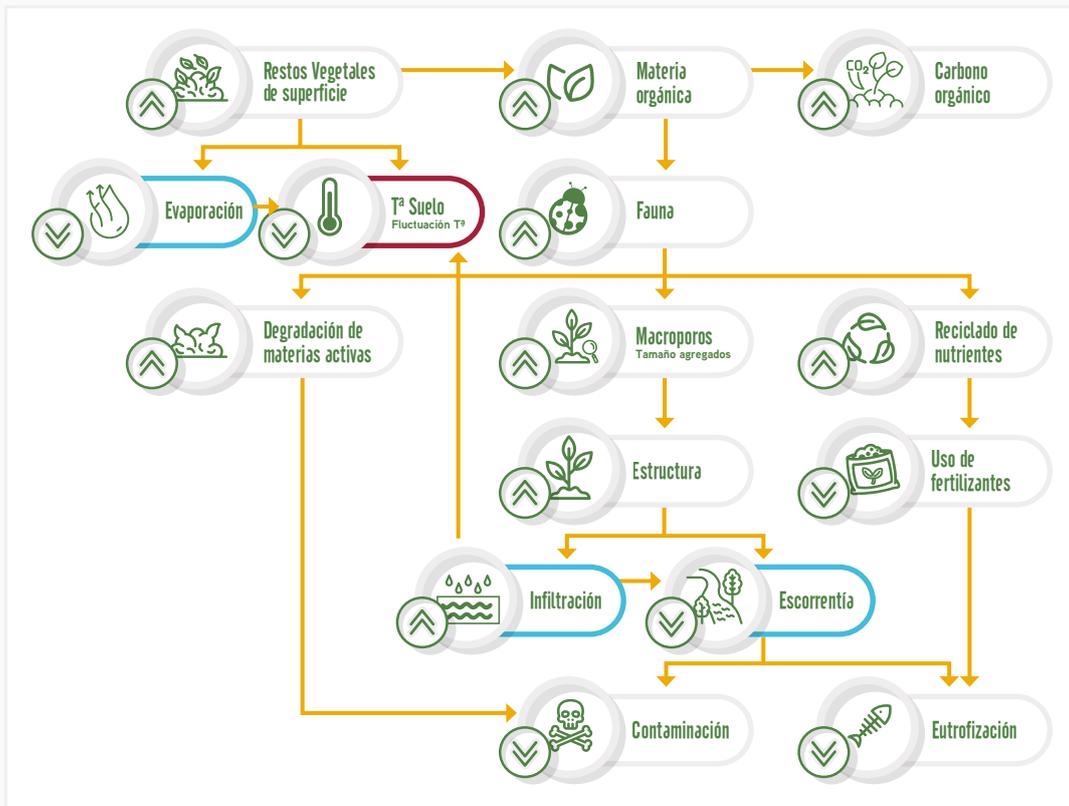
## Descripción de la medida

Práctica de cultivo en la que no hay perturbación del suelo de un año a otro. El objetivo es sembrar un cultivo sobre los residuos del cultivo anterior sin ningún tipo de labores de preparación del suelo. Se necesita maquinaria específica para la siembra sobre la cobertura vegetal.

La **no perturbación del suelo** proporciona una serie de servicios ecosistémicos capaces de minimizar los impactos del cambio climático. En este sentido, el no laboreo **influye** directamente en las propiedades físicas del suelo y con ello **en los procesos implicados en el balance de agua y en su aprovechamiento por los cultivos, reduciéndose el estrés hídrico**. Además, debido al aumento de la humedad del suelo y la presencia de residuos vegetales en la superficie, se ha observado que en suelos sin laboreo las fluctuaciones de temperatura en la capa superior son menores [29]. También se reduce la incidencia de la radiación solar directa sobre el suelo, lo que resulta en temperaturas generalmente más bajas en comparación con los suelos labrados, contribuyendo así a mitigar el estrés térmico del cultivo.



FIGURA 1. Cereal en SD sobre rastrojo.



**FIGURA 2.** Efecto de la SD en la retención de agua en el suelo y la regulación de la temperatura (AEACSV [28], adaptación de M. Llorens).

Desde el punto de vista económico, y a pesar de la inversión inicial en maquinaria, la SD supone un ahorro de costes en cuanto a que reduce los costes de la producción por:

- Reducción de labores y por consiguiente de gasoil (hasta un 40% menos)
- Menor desgaste de maquinaria (menor coste de mantenimiento)
- Reducción de horas de trabajo por hectárea
- En regadío, disminución de las necesidades hídricas por mejor aprovechamiento del agua del suelo (ahorro de costes de riego)
- Aumento de la fertilidad natural del suelo y mayor disponibilidad de nutrientes que supone una reducción en el gasto de fertilizantes.
- Subvención PAC (Ecorregímenes)

De acuerdo con varios estudios económicos, la reducción de costes de un sistema de siembra directa respecto a un sistema basado en laboreo con chisel, puede ir desde el 23,6% cuando la superficie trabajada es de 50 hectáreas, hasta un 51,3% cuando la superficie trabajada es de 800 hectáreas [28].

Coste alto si se necesita invertir en la compra de una sembradora de SD

Impacto a...	Coste	Requerimientos técnicos
<p>Corto plazo</p> <p>Medio plazo</p> <p>Largo plazo</p>	<p>€ € €</p>	

## Incentivos /Subvenciones

PAC-Ecorregímenes agricultura de carbono: **Siembra directa (P4)** en secano, secano húmedo y regadío. Como mínimo el 40% de la superficie acogida a esta práctica debe cumplir los requisitos de no labrar el suelo, sembrar directamente sobre los rastrojos y mantener éstos sobre el terreno todo el año y llevar a cabo una rotación de cultivos en dicha superficie (exceptuando a las especies plurianuales). Con el objetivo de que esta práctica se realice en años consecutivos en la misma superficie se establece un complemento adicional por hectárea que se sumará al importe determinado de la ayuda.

## Consideraciones

- Implica disponer de maquinaria específica para la siembra directa sobre la cobertura vegetal, por lo que la inversión inicial es alta.
- Nascencia e implantación del cultivo más arriesgada. Importante durante la cosecha del cultivo anterior picar y distribuir de forma homogénea los restos vegetales sobre el suelo, por lo que es recomendable que la cosechadora de cereal disponga de picadora y esparcidora (incrementa la inversión). Es un error que los residuos se concentren en poco espacio, por lo menos ocupar la anchura de la cosechadora.
- La elección del tipo de sembradora (disco o rejas) es una decisión clave. Se debe tener en cuenta cuál se adapta mejor a las condiciones de cada explotación (necesidad de asesoramiento) y el manejo de los residuos del cultivo precedente también serán clave en cuanto a la altura y grado de picado (Disco-rastrojo alto, Reja-rastrojo corto).
- Debido al mayor peso de las sembradoras de SD, y para evitar la compactación, se recomienda usar neumáticos de alta flotación.
- El cambio de manejo del suelo suele llevar implicado el cambio en el manejo de las estrategias de fertilización y tratamientos fitosanitarios.
- **La combinación de esta práctica junto a una correcta selección de cultivos en la rotación determinará su éxito.** Se aconseja rotar con leguminosas y oleaginosas (que cambien la relación C/N).
- Si se simplifica la rotación con cereales mayor problemas de malas hierbas y menor productividad. Si se repite un cereal mejor avena para forraje que otro cereal grano.
- Los herbicidas de acción radicular pueden tener menor efectividad, se necesita un riego o lluvia para que se incorporen.

## Otros beneficios ambientales

- **Control de la erosión**
- **Reducciones de emisiones**
- **Captura de carbono**
- **Fomento de la biodiversidad**

## Experimentos

**LOCALIZACIÓN:** Valladolid

**CAMPAÑA:** 2023-2024

### DATOS PARCELAS:

- **TRIGO SD:** 12 años SIN laboreo / Suelo Franco / 3,35% Materia Orgánica
- **TRIGO LABOREO:** Laboreo / Suelo Franco / 1,33% Materia Orgánica

### OBJETIVO:

El objetivo de este estudio es comparar los beneficios de la siembra directa frente al laboreo, centrándonos en cómo esta práctica influye en los procesos de retención y almacenamiento de agua en el suelo. Se busca demostrar que la siembra directa mejora el balance hídrico del suelo, reduce el estrés hídrico en los cultivos y, como resultado, incrementa el rendimiento. Para ello, se ha calculado el **Contenido Relativo de Agua en el suelo (CRAS %)** mediante la realización de un **balance diario de agua en el suelo asistido por teledetección**. Esta metodología ha permitido evaluar de manera continua la evolución del CRAS a lo largo del ciclo de cultivo en dos parcelas de trigo de secano: una con siembra directa y otra con laboreo, además de estimarse el rendimiento en ambas parcelas.



## METODOLOGÍA

### Balance de agua en el suelo basado en teledetección (RS-SWB)

Modelo fao56 (Allen et al, 1998 - fao56)  
ASISTIDO POR TELEDETECCIÓN

$$ET_c = \text{Transpiración} + \text{Evaporación}$$

$$ET_c = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_o + K_e \cdot ET_o$$

Satélite  
Evolución Temporal

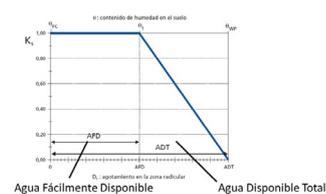
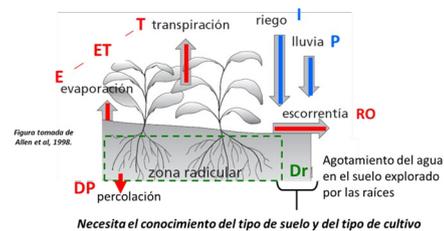
$$ET_c = K_s \cdot K_{cb}$$

Balance de agua en la  
capa explorada por raíces

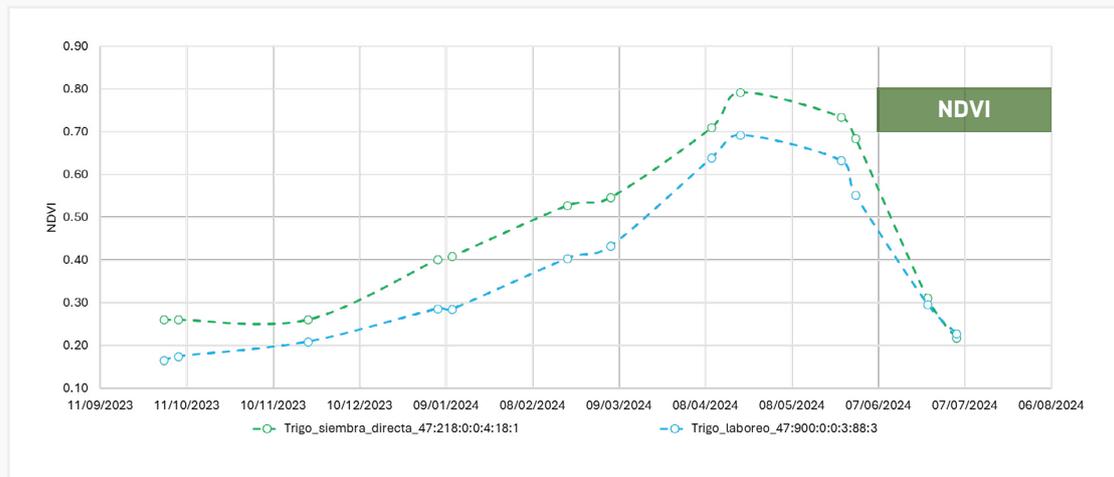
Agroclimatología  
Red SiAR

$$ET_o + K_e \cdot ET_o$$

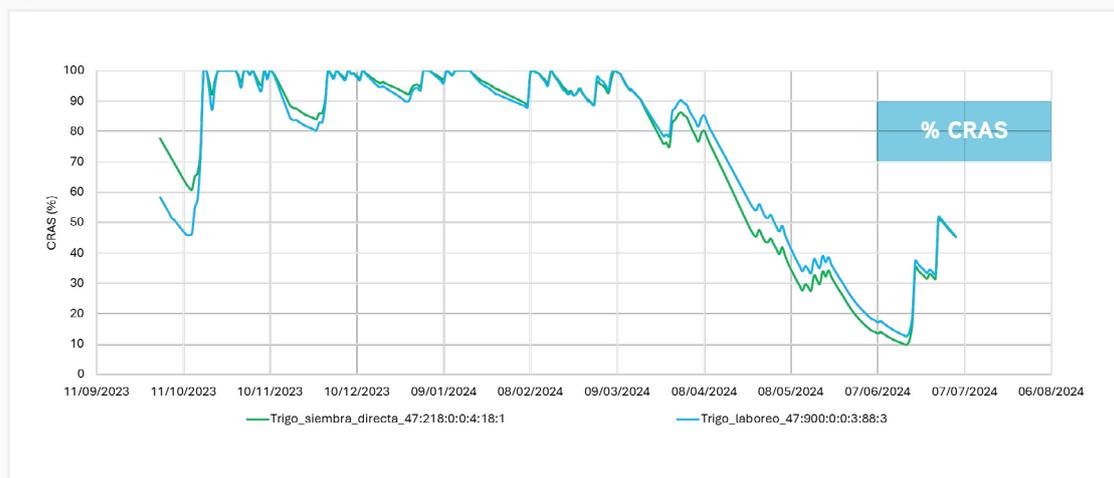
Balance de agua en la  
capa evaporable del suelo



**Mayor desarrollo vegetativo y rendimiento en SD:** La gráfica de NDVI muestra que el trigo en SD presenta un NDVI más alto durante todo el ciclo del cultivo. Esto indica que este trigo ha tenido un mayor desarrollo vegetativo comparado con el trigo en laboreo, generando más biomasa a lo largo de la campaña, y, por consiguiente, mayor rendimiento (3.267 kg/ha en SD frente a 2.684 kg/ha en laboreo).

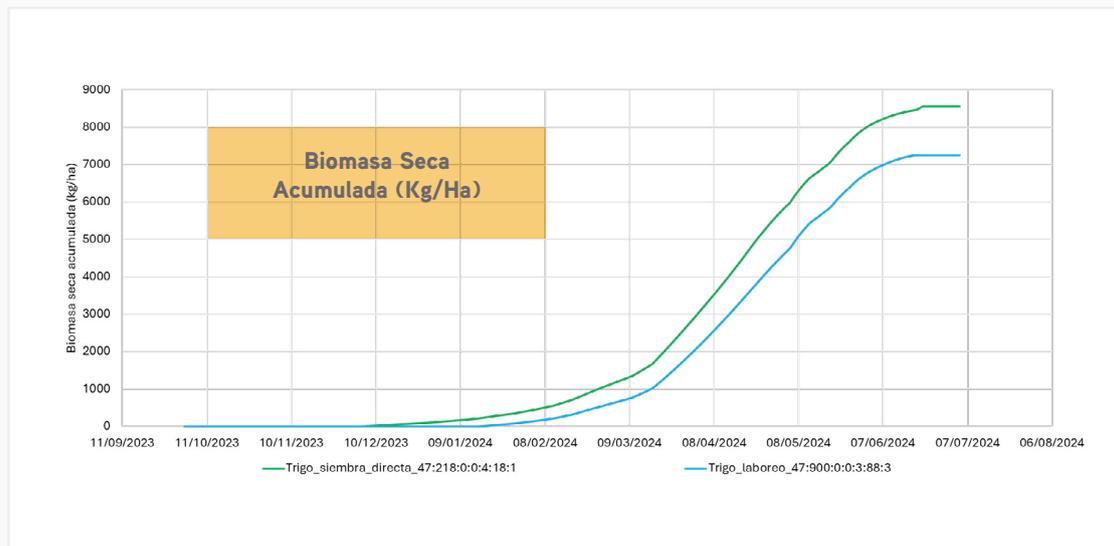


**% de CRAS (contenido relativo de agua en el suelo) menor desde finales de marzo en SD:** el % CRAS es muy similar en ambas parcelas hasta final de marzo, lo que sugiere que la cantidad de agua extraída del suelo por el trigo ha sido semejante en ambas parcelas hasta esa fecha. Sin embargo, desde finales de marzo hasta cosecha, el % de CRAS en la parcela de SD es ligeramente inferior al de la parcela de laboreo.



Este menor % de CRAS en la parcela de SD durante los últimos meses (marzo a julio) puede explicarse por una mayor extracción de agua por parte del trigo SD. Dado que el trigo en SD ha tenido un desarrollo vegetativo superior, como indica el NDVI, también ha necesitado absorber más agua, lo cual reduce el CRAS en comparación con la parcela de laboreo. Estos meses, además, coinciden con el periodo de mayor demanda hídrica del trigo y mayor transpiración por el aumento de las temperaturas.

En **cultivos herbáceos extensivos**, una mayor tasa de transpiración (cuando no hay problemas que disocian la relación biomasa-grano), se asocia con un crecimiento más vigoroso y, por lo tanto, mayor biomasa y rendimiento



#### CONCLUSIONES:

La SD mejora la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua, lo cual permite al cultivo un acceso más estable al agua del suelo (mejor aprovechamiento). Esto contribuye a un mayor desarrollo vegetativo y mayor acumulación de biomasa, como muestra la gráfica del NDVI. Al producir más biomasa, el cultivo en SD también tiene una mayor demanda de agua a partir de finales de marzo, que es cuando el trigo alcanza fases de mayor crecimiento y transpiración, reduciéndose el % de CRAS en comparación con la parcela de laboreo.

Por lo tanto, el menor % de CRAS en SD desde finales de marzo justifica la eficiencia de esta práctica para conservar y aprovechar el agua en el suelo, favoreciendo el desarrollo y el rendimiento del trigo sin incurrir en un estrés hídrico significativo.



# Mantenimiento de una cobertura vegetal permanente en el suelo

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

La cobertura del suelo comprende cualquier material vegetal, vivo o inerte, que lo cubre y protege de la acción directa del sol y el viento.

Esta es otra de las prácticas clave de la agricultura de conservación. Mantener una cobertura vegetal permanente en el suelo favorece una mayor infiltración, reduce la evaporación y la escorrentía del agua de lluvia, disminuye las fluctuaciones de temperatura del suelo y contribuye al aumento de la materia orgánica y la fertilidad.

En cuanto a la temperatura del suelo, la cobertura vegetal disminuye la cantidad de luz solar que incide directamente sobre la superficie, contribuyendo a moderarla. Esta reducción térmica también limita la evaporación del agua, favoreciendo su retención en el suelo y aumentando la disponibilidad hídrica para las plantas.

Mantener el suelo cubierto en cultivos herbáceos, como el cereal, se puede conseguir de diversas formas:

- **Residuos de cosecha:** Mantener el **rastrajo** del cultivo anterior.
- **Uso de cultivos intermedios** (cultivos de cobertura) para evitar suelo desnudo entre cultivos.
- **Intercropping:** cultivo de cobertura que crece al mismo tiempo que el cultivo comercial durante parte o toda su estación de crecimiento.

A continuación, se explica brevemente cada una de estas técnicas.

#### **Residuos de cosecha** (Cobertura de restos vegetales inertes)

Mantener el rastrojo (todos los residuos que quedan en la parcela después de la cosecha) de los diferentes cultivos que componen la rotación favorece la presencia sobre el suelo de un recubrimiento orgánico de vegetación muerta (**mulch**). Este ayuda a mantener una condición del suelo favorable debido a que mejora la distribución del agua en el perfil, aumenta la retención de humedad y evita la evaporación directa al reducir la exposición directa de la radiación solar. El uso de materiales orgánicos, además, aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo mejorando su estructura y jugando un papel clave en el control de la erosión.



FIGURA 1. Mulch de Cereal

### Cultivos de cobertura

Cuando los residuos del cultivo anterior se dejan en superficie, puede ser que se acaben degradando si el intervalo de tiempo entre la cosecha de un cultivo y el establecimiento del siguiente es demasiado largo, perdiéndose los efectos positivos de la cobertura inerte. En este caso, la siembra de un cultivo intermedio, entre cultivos principales, puede alargar el periodo de tiempo en el que el suelo está cubierto, aportando numerosos beneficios al sistema.

Por lo tanto, los cultivos de cobertura son cultivos adicionales que se establecen para cubrir el suelo fuera del ciclo productivo principal. Su propósito va más encaminado a promover beneficios sobre el suelo que a ser cosechados y obtener un beneficio económico, aunque esta última opción no debe descartarse (forraje, por ejemplo).

La elección del cultivo de cobertura más idóneo depende del propósito buscado (teniendo en cuenta las características de cada especie), de los demás cultivos previstos en la rotación y de los factores climáticos y edáficos. En el caso de las leguminosas, se consigue un ingreso adicional de nitrógeno, lo que puede presentar una ventaja extra.

Existen distintos métodos de terminación del cultivo de cobertura según se desee incorporar los residuos al suelo o dejarlos en la superficie. La opción más beneficiosa es **mantener los residuos en superficie**, ya que contribuyen a la conservación del suelo, al evitar su alteración, y actúan como una medida de adaptación al cambio climático. Para ello, se pueden emplear herramientas como la **picadora o el roller-crimper**. Aunque los herbicidas también pueden utilizarse como método de terminación, no se recomiendan debido a su impacto negativo en la microbiota del suelo. Si se opta por incorporar los residuos al suelo, se emplean distintos aperos como la grada de discos o el rotavator.

### Intercropping

El intercropping es un sistema de cultivos múltiple, donde dos o más cultivos crecen juntos en la misma superficie de tierra durante parte o todo su ciclo. **La asociación gramínea-leguminosa** es de gran interés por los servicios agroecológicos que aporta esta última tanto al cereal como al cultivo siguiente. Entre las leguminosas, el **trébol** es una de las especies más interesantes para asociarse con los cereales.



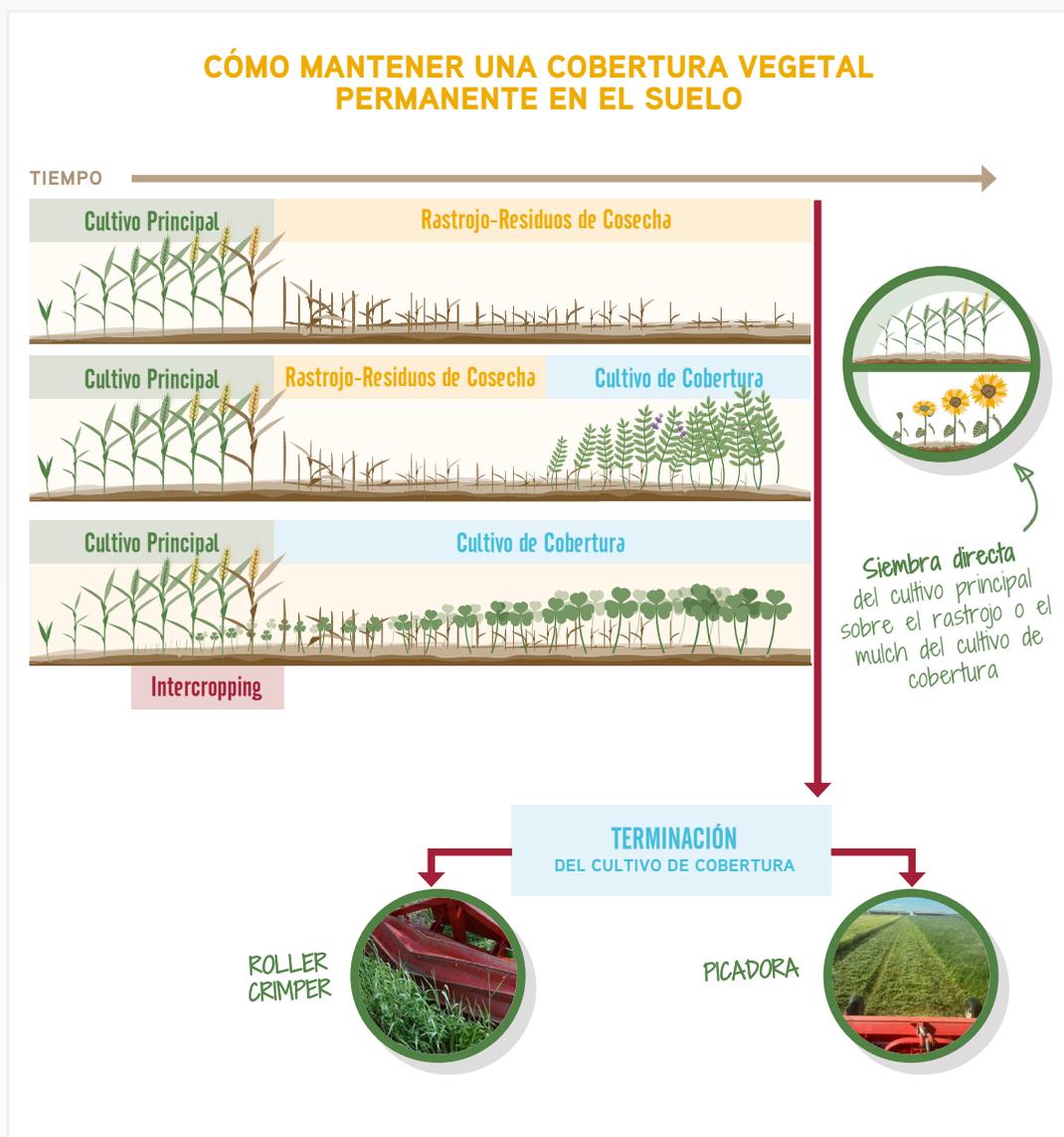
**FIGURA 2.** Siembra de trébol sobre trigo de secano (Valladolid 2024)



**FIGURA 3.** Nascencia del trébol sobre trigo de secano (Navarra 2025)

Se recomienda que la siembra de trébol se realice una vez ya instalado el cereal, en primavera (final de ahijado), para evitar competencia entre ambos cultivos, sobre todo en condiciones de secano. El objetivo es garantizar que el cultivo principal, el cereal, esté lo suficientemente establecido y sea dominante como para limitar la oportunidad de competencia con el cultivo de cobertura, y, por lo tanto, que tenga el mejor acceso a los recursos tróficos.

Tras la cosecha del cereal, el objetivo es dejar el trébol en el campo para que cubra el suelo hasta la siembra del siguiente cultivo. En condiciones de secano, la supervivencia del trébol estará condicionada por las precipitaciones estivales.



**FIGURA 4:** Esquema de cómo mantener una cobertura vegetal (viva o inerte) permanente en el suelo entre cultivos comerciales.

La fotografía del roller crimper es de NRCS Oregon bajo licencia CC BY-ND 2.0 en Flickr. No se han realizado cambios en la imagen original.



## Incentivos / Subvenciones

PAC-Ecorregímenes agricultura de carbono y agroecología: **Rotación de cultivos con especies mejorantes (P3)** en secano, secano húmedo y regadío. Realizar una rotación de cultivos en al menos el 50% de las tierras de cultivo acogidas a la práctica de rotación, descontada la superficie ocupada por cultivos plurianuales, en cada uno de los ecorregímenes que se solicite. También se considera rotación cuando hay cultivo principal y secundario el mismo año. Además, se exige que, como mínimo, el 10% de la superficie de tierra de cultivo acogida al ecorregímen esté ocupada por especies mejorantes (oleaginosas, crucíferas y leguminosas), de las cuales las leguminosas deben representar al menos una superficie equivalente al 5% de la superficie acogida; éstas podrán utilizarse como abonado en verde.

## Consideraciones

- Es **preferible dejar los residuos en superficie que enterrarlos**. Enterrar los residuos de cultivo o cultivos de cobertura, sobre todo la paja del cereal, puede tener efectos perjudiciales sobre el crecimiento y germinación de semillas a consecuencia de las sustancias inhibidoras que se producen durante la descomposición. El residuo de paja, además, tiene una alta relación C/N y puede dar lugar a inmovilización de nutrientes, como el N.
- La abundancia de residuos vegetales puede inducir a un comportamiento diferente de los herbicidas de absorción radicular, por modificaciones en selectividad, eficacia y persistencia.
- **Plagas**: la presencia de restos vegetales y una mayor humedad del suelo puede incrementar la presencia de babosas pudiendo, en ocasiones, llegar a causar daños al cultivo.
- Los **cultivos de cobertura** pueden suponer un **coste adicional** respecto a la compra de semilla y el combustible para su siembra y terminación. Sin embargo, deben verse como una **inversión a largo plazo**, ayudando gradualmente a mejorar el manejo de la explotación.
- **Dificultad** de implementación de cultivos de cobertura, principalmente de verano, e intercropping en **secano**.

## Otros beneficios ambientales

- **Control de la erosión**
- **Reducción de la compactación del suelo**
- **Captura de carbono**
- **Control de hierbas adventicias**
- **Fomento de la biodiversidad**

## Experimentos

**LOCALIZACIÓN:** Zamora

**CAMPAÑA:** 2023-2024

### OBJETIVO:

Evaluar los beneficios de un acolchado de veza y otro de paja (rastrojo de avena) en comparación con un suelo desnudo (barbecho labrado) en cuanto a la reducción de la temperatura del suelo y la mejora en la retención de humedad.

La temperatura del suelo se ha medido a través de una **cámara termográfica**, mientras que para la humedad se ha utilizado el **método gravimétrico** (técnica directa para medir la humedad del suelo). Este último implica recolectar muestras de suelo con una barrena, retirando los primeros centímetros de material vegetal. Las muestras se trasladan al laboratorio y se pesan antes y después de ser secadas, lo que permite calcular su contenido de humedad de manera precisa.

### Resultados contenido de humedad (%)

En la parcela con mulch se observa un mayor contenido de humedad en comparación con el suelo desnudo, lo cual también se refleja en el color más oscuro de la tierra. Estos resultados confirman la efectividad de esta práctica para retener la humedad del suelo gracias a que los residuos mejoran la infiltración de agua en el suelo y disminuyen las pérdidas por evaporación.

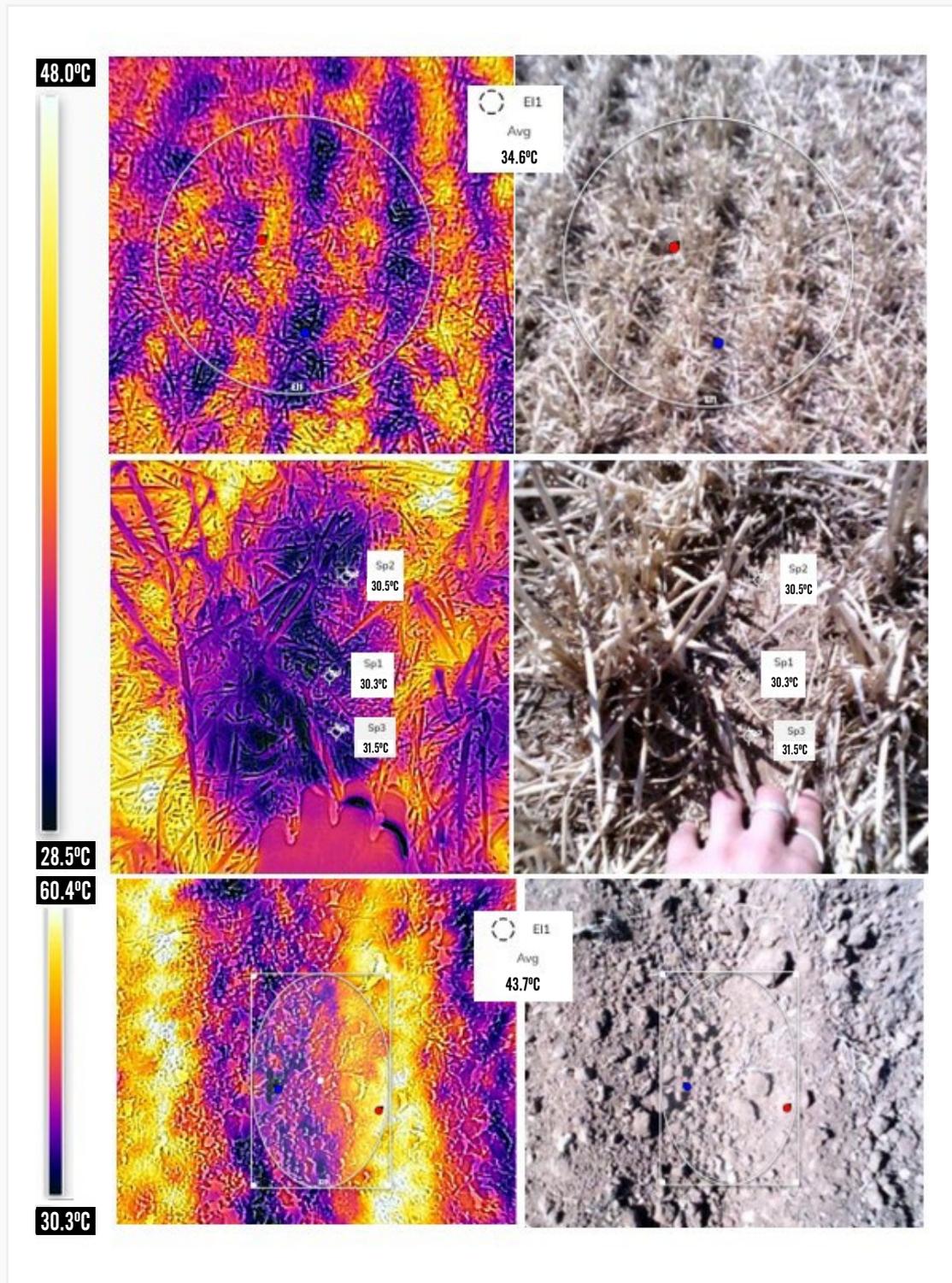


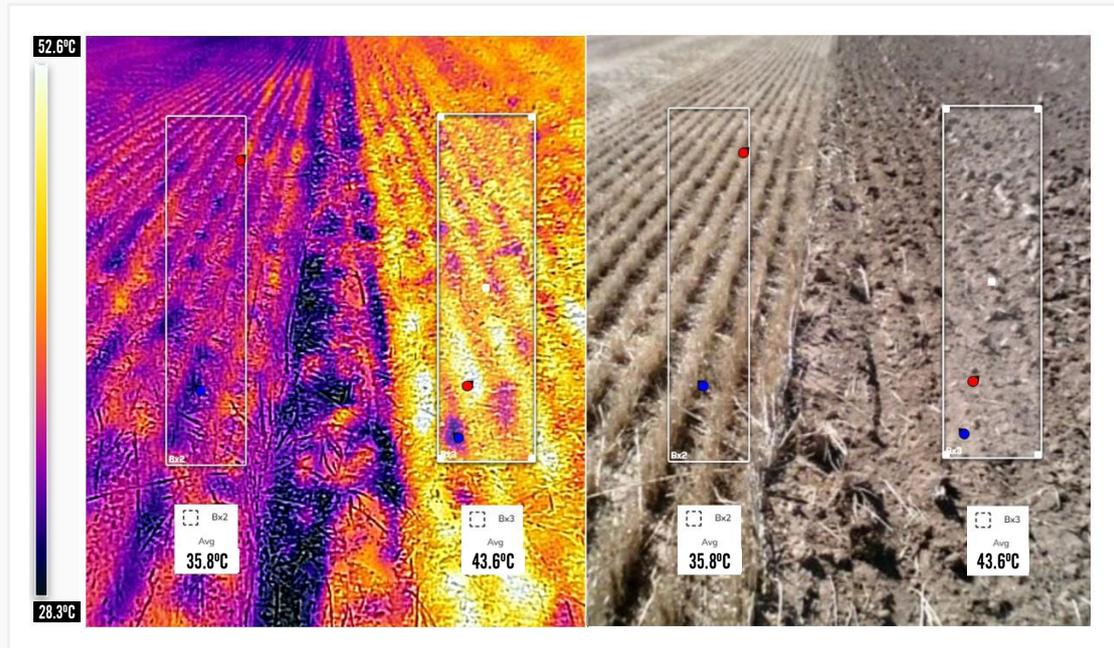
**FIGURA 5.** Mulching (veza picada)  
Hdad (%): 8,8%



**FIGURA 6.** Barbecho labrado  
Hdad (%): 3,2%

### Resultados temperatura del suelo





Las imágenes tomadas con cámara termográfica en pleno mes de julio muestran una diferencia de temperatura media en el suelo de hasta casi 8 °C menos en las parcelas con mulch de paja de avena en comparación con las parcelas sin cobertura vegetal. Además, debajo del mulch, el suelo se mantiene a casi 4 °C menos que en la superficie de este, logrando una mayor reducción de la temperatura del suelo.



#### CONCLUSIONES:

Los acolchados vegetales han mostrado resultados muy positivos en comparación con el barbecho labrado, consiguiendo una reducción significativa de la temperatura del suelo y una mayor retención de humedad. El mulching se destaca como una práctica que favorece la adaptación de los cultivos a los efectos adversos del clima, como el estrés térmico e hídrico, además de aportar múltiples beneficios a la calidad del suelo y a la biodiversidad.



# Rotación y diversificación de cultivos

### Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

### Descripción de la medida

La **diversificación** se refiere al cultivo de diferentes especies en la misma campaña agrícola en una misma explotación, en forma de rotación o asociación de cultivos. En lo que respecta a la **rotación**, consiste en la siembra sucesiva de distintos cultivos en una misma superficie. El objetivo es alternar cultivos de familias botánicas distintas, con sistemas radiculares y requerimientos nutricionales e hídricos diferentes, y afectados por plagas, enfermedades y especies adventicias también distintas. La sucesión de especies debe planificarse atendiendo a las condiciones edafoclimáticas de cada zona. Entre los principales beneficios destacan:

- Reducción de riesgos derivados de plagas y enfermedades al romper su ciclo
- Manejo del suelo: mejora de la estructura gracias a la diversificación de sistemas radiculares que exploran el suelo a distintas profundidades y de forma distinta. Se incrementa, además, el secuestro de carbono.
- Manejo del agua: se mejora la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo al mejorar su estructura.
- Mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes.
- Reducción de las aplicaciones de fertilizantes y productos fitosanitarios, reduciéndose el consumo energético, y, por consiguiente, la emisión de GEI.
- Ganadería: un mayor abanico de cultivos mejora la superficie pastable del ganado.
- Biodiversidad: Los organismos asociados al agroecosistema se benefician de una mayor diversidad de recursos para su alimentación, refugio o anidamiento.

Ambas prácticas aumentan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y reducen los riesgos derivados de una climatología cada vez más adversa, es decir, **se diversifican los riesgos**.

### Impacto a...

Corto plazo

Medio plazo

Largo plazo

### Coste



### Requerimientos técnicos



### Incentivos /Subvenciones

PAC-Ecorregímenes agricultura de carbono y agroecología: **Rotación de cultivos con especies mejorantes (P3)** en secano, secano húmedo y regadío.

### Consideraciones

- **Rotación de cultivos:**

- Las leguminosas son el mejor precedente para el cultivo de cereales, ya que además de aumentar el potencial productivo real del cultivo en más de 1 t/ha, permiten ahorrar 20-30 kg N/ha de abonos minerales nitrogenados.
- Las oleaginosas, como la colza y el girasol, son 2 precedentes buenos para los cereales, pero no permiten ahorros de nitrógeno.

- **Diversificación de cultivos:**

- Se considera que la diversificación es adecuada si se producen, al menos, dos cultivos diferentes en explotaciones de más de 10 hectáreas dentro de la misma campaña agrícola. En el caso de superficies de más de 30 hectáreas, se considera adecuado cultivar, al menos, tres cultivos diferentes dentro de la misma campaña agrícola.

### Otros beneficios ambientales

- Mejora de la fertilidad del suelo
- Aumento materia orgánica y captura de carbono
- Reducción emisiones GEI
- Fomento de la biodiversidad



# Fertilización orgánica

Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

## Descripción de la medida

La fertilización es una práctica fundamental para mejorar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Disponer de un suelo fértil es un aspecto clave para garantizar que las plantas disponen en el momento adecuado, en la cantidad necesaria y de forma asimilable, de todos los macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), nutrientes secundarios (calcio magnesio, sodio, entre otros) y micronutrientes (hierro, manganeso, zinc, cobre, entre otros) necesarios para su correcto desarrollo.

En su sentido más amplio, se considera un fertilizante orgánico a toda **sustancia de origen vegetal, animal o mixto que se incorpora al suelo para mejorar su fertilidad** [30]. En esta ficha nos centraremos en las enmiendas orgánicas dada la capacidad que poseen estos productos de origen natural para aportar nutrientes esenciales al mismo tiempo que incrementan la materia orgánica del suelo, actuando como un sumidero de carbono, y, por tanto, reduciendo la concentración de gases de efecto invernadero. Además, permiten reducir el uso de fertilizantes de síntesis química que son de origen no renovable y su producción está asociada a una importante huella ambiental.

Para que la materia orgánica fresca pueda aportar nutrientes a las plantas debe sufrir un doble proceso de transformación. En primer lugar, se produce la humificación, proceso por el cual la materia orgánica se transforma en humus gracias a la acción de los microorganismos presentes en el suelo. Posteriormente, el humus sufre una segunda degradación mucho más lenta denominada mineralización en la que se liberan los nutrientes disponibles para la planta [30].

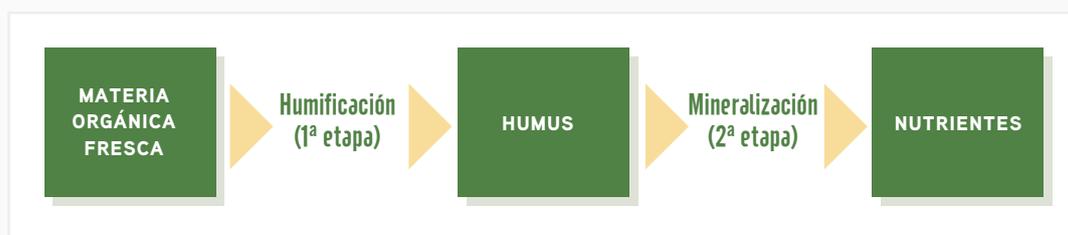


FIGURA 1. Esquema de las transformaciones de la materia orgánica en el suelo.

Aunque la concentración de nutrientes (especialmente N, P, K) de los abonos orgánicos es menor que la contenida en los fertilizantes minerales o sintéticos, aplicados en dosis apropiadas, estos productos permiten lograr los mismos rendimientos que se obtienen con el uso de fertilizantes convencionales [31]. Y la clave está en que además de mejorar la productividad, **incrementan la materia orgánica del suelo**, desencadenando todo un conjunto de beneficios que no aportan los fertilizantes minerales, entre ellos:

1. Mejora la estructura del suelo, factor clave para garantizar la aireación, disponibilidad de agua [32], drenaje y desarrollo radicular de las plantas. Favorece también la formación de agregados que aportan estabilidad al suelo [33].
2. Aumenta la retención de humedad del suelo (la materia orgánica del suelo puede retener casi 20 veces su peso en agua). También regula y mejora la velocidad de infiltración del agua en el suelo, disminuyendo el riesgo de erosión hídrica y favoreciendo la penetración del agua hacia las capas más profundas del suelo.
3. Aumenta la actividad biológica del suelo, permitiendo la descomposición de los diferentes materiales naturales, su mineralización, el reciclado de nutrientes, y generando un entorno más diverso y complejo con mayor resiliencia a las enfermedades, y mejorando la estructura del suelo.
4. Mejora las propiedades del suelo. Por ejemplo, estabilizando el pH, aumentando la capacidad de retener y liberar nutrientes (capacidad de intercambio catiónico) e incrementando el contenido de carbono en suelos.

En cultivos anuales, como los cereales, se recomienda su aplicación en fondo (entre 7 y 15 días antes de la siembra) y su posterior incorporación a suelo. Esto ayuda a minimizar las pérdidas gaseosas de nitrógeno y azufre que pueden ocurrir con aplicaciones demasiado tempranas, además de reducir el riesgo de daño al cultivo por una distribución o incorporación deficiente [30]. Durante el ciclo vegetativo también pueden realizarse aplicaciones foliares de productos orgánicos para complementar las aplicaciones de fondo.

Existen diferentes tipos de enmiendas orgánicas, algunas de las cuales se muestran en el siguiente cuadro:

Enmienda orgánica	Riqueza: N (%)	Comentarios
<b>Compost</b>	1.5% - 3.5%	Aporta nutrientes equilibrados, mejora la estructura del suelo y la capacidad de retener agua. Muy versátil y de lenta liberación.
<b>Estiércol</b> (vaca, oveja, caballo)	0.5% - 1.5%	Rico en materia orgánica, mejora la estructura del suelo, pero puede variar mucho su contenido de nitrógeno dependiendo del tipo de animal y su alimentación.
<b>Gallinaza</b>	3% - 4.5%	Muy rica en nitrógeno, de liberación rápida. Se debe usar con cuidado para evitar excesos que puedan "quemar" las plantas.
<b>Humus de lombriz</b>	2% - 3%	Excelente para mejorar la vida microbiana del suelo, con nutrientes de fácil absorción y disponible rápidamente para las plantas.
<b>Abonos verdes</b> (leguminosas)	2% - 3%	Se cultivan para incorporarlos al suelo y fijar nitrógeno, mejorando su contenido sin erosionarlo. Además, aportan materia orgánica.
<b>Sustrato de champiñón</b>	1.5% - 2.5%	Rico en nutrientes, incluyendo nitrógeno, fósforo y potasio. Mejora la estructura del suelo y la vida microbiana.
<b>Lodo de depuradora</b>	3% - 6%	Muy rico en nitrógeno, pero su uso está regulado por el riesgo de contener metales pesados y otros contaminantes.
<b>Pellets o granulados orgánicos</b>	1-12%	Productos comerciales con distintas formulaciones

**TABLA 1.** Listado de enmiendas orgánicas y su contenido de nitrógeno (%), para posible uso en cereales de invierno.

Por último, es importante recalcar que, la fertilización orgánica, además, es una **práctica clave para valorizar subproductos renovables de la ganadería y la industria agroalimentaria**, como son las deyecciones ganaderas, cuyo excedente debe gestionarse en determinados territorios.



### Consideraciones /Riesgos

- La aplicación de enmiendas orgánicas no puede prescribirse si entender los niveles de nutrientes disponibles en el suelo, la riqueza en NPK de la enmienda utilizada y las necesidades del cultivo. Ambos parámetros son fundamentales para hacer una fertilización racional. Recordemos que un exceso de nutrientes puede generar problemas en el cultivo, y que los niveles de nutrientes en suelos y enmiendas son extremadamente variables.
- Presencia de microelementos o metales pesados y biodisponibilidad de éstos que pueden limitar la dosis a utilizar [30].
- Contenido de humedad, para evitar problemas asociados a la dificultad de aplicación o de almacenaje de estas enmiendas [30].

### Otros beneficios ambientales

- **Control de la erosión**
- **Mejora de la biota del suelo (biodiversidad edáfica)**
- **Captura de carbono (mitigación)**
- **Reutilización de subproductos animales y/o vegetales**



### 5.1.3. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

## A LARGO PLAZO

El siguiente conjunto de medidas incluye prácticas cuya implantación requiere de una planificación y esfuerzo sostenido, con efectos positivos que se observan a largo plazo.

- **Cosecha de agua: Laboreo en línea clave o *Keyline***
- **Creación y mantenimiento de infraestructuras verdes** (setos, bosquetes) **en las inmediaciones de parcelas de cereal** (lindes, ribazos)



# Cosecha de agua: laboreo en línea clave o *Keyline*

Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



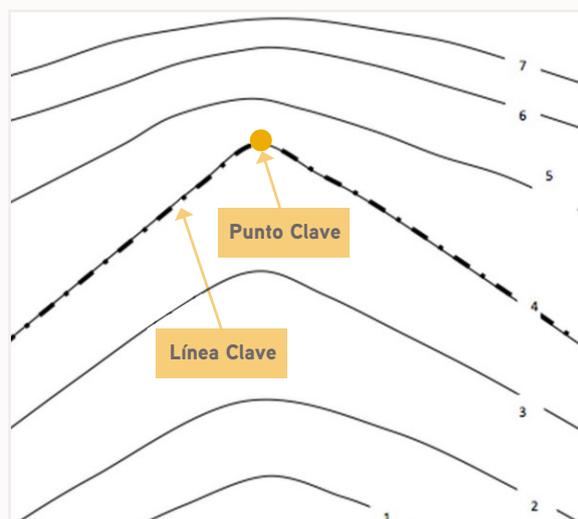
Enfermedades

## Descripción de la medida

La línea clave (Keyline), desarrollado en los años 50 en Australia por P. A. Yeomans, es un método de diseño que estudia, analiza y modifica el movimiento del agua desde su entrada en el sistema (paisaje-cuenca hidrográfica, finca o parcela) en forma de precipitación hasta su salida en forma de escorrentía [34]. Su objetivo principal es incrementar el aprovechamiento del agua y la productividad de la tierra [35]. Aplicado a los sistemas agrícolas, el método Keyline permite diseñar y manejar un patrón de laboreo del suelo a escala de parcela para distribuir eficientemente el agua en superficie y maximizar su captación y el almacenamiento en el suelo [34,36].

De forma natural, el agua de lluvia se distribuye por gravedad de las partes altas del terreno (crestas) a las partes bajas (valles). Con el diseño hidrológico en Línea Clave se consigue invertir este patrón natural del agua, consiguiendo redistribuir el agua hacia las partes más altas del terreno (normalmente más secas) mejorando de esta forma el agua disponible en estas zonas de mayor pendiente [36].

Para su implementación, se utilizan las curvas de nivel de la parcela agrícola. En el mapa topográfico de la parcela se identifican los denominados *Key Points* (*Puntos Clave* donde las curvas de nivel cambian visiblemente su distancia entre sí). La curva de nivel que pasa por el Punto Clave se denomina *Línea Clave* o *Keyline*, y es la base para desarrollar el diseño hidrológico del terreno. El empleo del método de la Línea Clave en una parcela agrícola de cereal implica simplemente realizar el laboreo del suelo y la siembra del cultivo de forma paralela a la Línea Clave, tanto hacia arriba como hacia abajo de la misma. De esta forma, se garantiza que el recorrido del agua de lluvia se distribuya de forma más uniforme, evitando el encharcamiento y mejorando la infiltración.



**FIGURA 1.** Localización del Punto Clave y Línea Clave en el plano de una parcela. **Fuente:** Cortés & Ramírez (2013) [36].



**FIGURA 2.** Comparación entre el laboreo en Línea Clave y el laboreo convencional en su efecto sobre la infiltración del agua en el suelo. Las imágenes reflejan el impacto de ambos sistemas tras un evento de lluvia.  
Fuente: Cortés & Ramírez (2013) [36].

### Impacto a...

Corto plazo  
Medio plazo  
Largo plazo

### Coste



### Requerimientos técnicos



### Consideraciones

- Para implementar correctamente el diseño Keyline y satisfacer las necesidades del cultivo es necesario realizar previamente un estudio de la parcela e identificar las entradas de agua (escorrentía y precipitaciones) así como su distribución en la parcela.
- Sin que la precipitación implique restricciones para su aplicación, el método muestra mayores impactos en áreas con lluvia anual en el rango de 350 a 700 mm.
- Su ejecución requiere de un arado Yeomans. No obstante, se puede fabricar una adaptación de este usando un arado de cinceles; lo que se busca es abrir el suelo sin voltearlo y dejar una especie de túnel subsuperficial por donde fluirá el agua.
- Este enfoque de trabajar con la forma del terreno y su topografía hace que el diseño en línea clave sea adaptable y pueda integrarse sin interferir con técnicas de mínima labranza y conservación del suelo como la siembra directa.

### Otros beneficios ambientales

- Control de la erosión
- Mejora de la microbiología del suelo



# Creación y mantenimiento de infraestructuras verdes (setos, bosquetes) en las inmediaciones de parcelas de cereal (lindes, ribazos)

Esta medida es eficaz ante...



Estrés térmico



Estrés hídrico



Estrés por exceso de humedad / encharcamiento



Estrés por heladas



Plagas



Enfermedades

## Descripción de la medida

La presencia de setos, parches forestales, linderos o vegetación dispersa en el paisaje agrícola enriquece la vida en todo el entorno y proporciona beneficios ambientales y económicos. En este sentido, cuanto más se parezca un agroecosistema en estructura y función al ecosistema natural de la región donde se encuentra mayor es la probabilidad de que el agroecosistema sea sostenible. Tradicionalmente, los remanentes de vegetación natural y semi-natural coexistían con las áreas agrícolas al localizarse en las zonas poco productivas del territorio (lindes, ribazos, bordes de camino, entre otros). De este modo, la creación y/ o mantenimiento de **Infraestructura Verde (IV)** (setos o bosquetes) es una medida que permite conciliar la producción agrícola con la biodiversidad del entorno, alcanzando beneficios positivos para el cultivo del cereal al protegerlo frente a efectos adversos producidos por eventos climáticos como las heladas o el aumento de las temperaturas.

El principal beneficio de la IV en los cereales radica en su capacidad para proteger el cultivo de la acción del viento, la radiación solar excesiva y las heladas. Esta protección incluye la reducción del efecto abrasivo de las partículas arrastradas por el viento, disminuyendo el riesgo de enfermedades causadas por la entrada de patógenos. Además, ayuda a reducir el encamado del cereal, ya que se ha demostrado que las barreras vegetales pueden proteger al cultivo en un área de hasta 20-30 veces su altura [37]. Entre otros beneficios destacan [38]: (1) la creación de una brisa suave entre las zonas soleadas y umbrías atenuando los rigores del clima; (2) amortiguación de temperaturas extremas del aire y del suelo en regiones cálidas, (3) reducción de las pérdidas de agua por evapotranspiración, (4) mejora en la retención de nutrientes y humedad del suelo; y (5) aumento de la infiltración de agua en el suelo, especialmente en zonas con pendiente. Por último, cabe destacar su efecto positivo sobre el control biológico de plagas, ya que, mediante la creación de un hábitat adecuado, se conservan e incrementan las poblaciones de enemigos naturales de los principales insectos-plaga que atacan al cultivo del cereal.



**FIGURA 1.** Mantenimiento de Infraestructuras verdes en una parcela de avena (Navarra)

Impacto a...	Coste	Requerimientos técnicos
<p>Corto plazo</p> <p>Medio plazo</p> <p>Largo plazo</p>		

## Incentivos /Subvenciones

PAC-Ecorregímenes-Agroecología: **Espacios de biodiversidad en tierras de cultivo (P5)**. Ececorregímen íntimamente relacionado con la condicionalidad, BCAM 8, que establece dejar un porcentaje de elementos no productivos en las tierras de cultivo de la explotación y el mantenimiento de los elementos del paisaje. Se exige un porcentaje adicional al de la BCAM 8 de un 7% de elementos no productivos en las tierras de secano y de un 4% en las tierras de cultivo de regadío.

## Consideraciones

- Las plantaciones realizadas deben ser lo más diversas posible, utilizando especies nativas, principalmente de arbustos acompañados de matas y el intercalado puntual de árboles de mayor porte para evitar el excesivo sombreado del cultivo [39].
- La densidad de plantación de los setos debe ser alta (de al menos 0.5 plantones/m<sup>2</sup>) y su anchura debe estar comprendida entre los 2-5 m para disminuir el riesgo de marras y conseguir lo más rápido posible una estructura vegetal en forma de barrera que sea efectiva para la protección del cultivo (se recomienda su plantación al tresbolillo (dos líneas de plantación) o patrón de 5 de oros (tres líneas de plantación) [39]. La apertura del surco de plantación puede realizarse de forma fácil y barata utilizando un subsolador acoplado a una estructura de dos o tres rejonos.
- Los islotes e islas forestales deben tener un tamaño comprendido entre los 25 m<sup>2</sup> y los 400 m<sup>2</sup> [39].
- Junto al seto, hasta una distancia de dos veces la altura del seto, el rendimiento de los cultivos herbáceos puede verse reducido hasta en un 29%. Sin embargo, más allá de esta distancia, hasta 20 veces la altura del seto, el rendimiento de los cultivos herbáceos aumenta en un 6%, compensando con creces esta potencial pérdida inicial de rendimiento [37].

## Otros beneficios ambientales

- **Control de la erosión**
- **Mejora de la biodiversidad**
- **Polinización**
- **Producción y conexión de hábitats**
- **Provisión de productos adicionales**
- **Secuestro de carbono**

# Bibliografía

06

# Bibliografía

1. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rotter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., et al. (2014). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5, 143–147.
2. Bennett D., Izanloo A, Reynolds M., Kuchel H., Langridge P., Schnurbusch T. (2012). Genetic dissection of grain yield and physical grain quality in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under water limited environments. *Theor Appl Genet* 125: 255–271.
3. Yu Q, Li L, Luo Q, Eamus D, Xu S, Chen C, Wang E, Liu J, Nielsen DC. (2014). Year patterns of climate impact on wheat yields. *Int J Climatol* 34:518–528.
4. Sarto, M. V. M., Sarto, J. R. W., & Rampim, L. (2017). Wheat phenology and yield under drought: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 11(8), 941. 946.
5. Libardi, V. C. M., & Costa, M. B. (1997). Consumo de água da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.). *Revista FZVA*, 4, 17–22.
6. Touzy, G., Rincént, R., Bogard, M., Lafarge, S., Dubreuil, P., Mini, A., Deswarte, J.. C., Beauchêne, K., Le Gouis, J., & Praud, S. (2019). Using environmental clustering to identify specific drought tolerance QTLs in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 132 (10), 2859–2880.
7. van Dongen, J. T., y Licausi, F. (2015). Oxygen sensing and signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 66, 345–367.
8. Magra, G., Senn, J., Martín, R. (2005). Evaluación del daño provocado por heladas tardías en trigo. Publicación cuatrimestral de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario.
9. Hunter, M. D. (2001). Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect–plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology*, 3(3), 153.
10. Hamilton, J. G., Dermody, O., Aldea, M., Zangerl, A. R., Rogers, M., Berenbaum, M. R., & DeLucia, E. (2005). Anthropogenic changes in tropospheric composition increase susceptibility of soybean to insect herbivory. *Environmental Entomology*, 34(2), 479–485.
11. Quesada Moraga, E. (2011). Plagas de insectos y cambio climático. *Phytoma España*, (232), octubre, 21. 31.
12. Fussmann, K. E., Schwarzmüller, F., Brose, U., Jousset, A., & Rall, B. C. (2014). Ecological stability in response to warming. *Nature Climate Change*, 4(3), 206–210.
13. Thomson, L. J., Macfadyen, S., & Hoffmann, A. A. (2010). Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52(3), 296–306.
14. Jiménez Díaz, R. M. (2008). Impactos del cambio climático en las enfermedades de las plantas. En *Repercusiones del cambio climático en la agricultura* (pp. 143–162).
15. Prank, M., Kenaley, S. C., Bergstrom, G. C., Acevedo, M., & Mahowald, N. M. (2019). Climate change impacts the spread potential of wheat stem rust, a significant crop disease. *Environmental Research Letters*, 14(12).
16. Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X. B., Epstein, P. R., & Chivian, E. (2001). Climate change and extreme weather events. Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change & Human Health*, 2(2), 90. 104.
17. Caubel, J., Launay, M., Ripoche, D., Gouache, D., Buis, S., Huard, F., Huber, L., Brun, F., & Bancal, M. O. (2017). Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop. disease model in a French regional application. *European Journal of Agronomy*, 90, 53–66.

- 18. Resco P.** (2022). Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española. Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos (COAG).
- 19. Mohr S., Kunz M., Geyer B.** (2015). Hail potential in Europe based on a regional climate model hindcast. *Geophysical Research*, 42(24), 10. 904.
- 20. Nature.** (2014). Warming climate threatens crops. *Nature* 507,277. [www.doi.org/10.1038/207277c](http://www.doi.org/10.1038/207277c)
- 21. Lorite IJ., Gabaldón. Leal C., Porras R., Santos C., Sillero J.**(2019). Impacto del cambio climático sobre la agricultura andaluza: Trigo. IFAPA. [www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/CC\\_Trigo\\_Divulgacion\\_06.02.2019.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/CC_Trigo_Divulgacion_06.02.2019.pdf)
- 22. Al. Karaki, G. N.** (2012). Phenological development. yield relationships in durum wheat cultivars under late. season high. temperature stress in a semiarid environment. *International Scholarly Research Network*, 2012, 1–7.
- 23. Carranza, G., G., Guzmán, G. I., Aguilera, E., González de Molina, M., García. Ruiz, R.** (2016). Contribución de las variedades tradicionales de trigo a la mitigación del cambio climático en agroecosistemas mediterráneos de secano. *Agroecología* 11 (2), 7. 22.
- 24. Roldán Cañas, J.** Mejora del uso del agua en el regadío. La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto.171. 184.
- 25. Guía Riego. Baja presión** (Action C4.2. LIFE. IP NAdapta. CC).
- 26. Jones, C.** (2006). Carbon and catchments: Inspiring REAL CHANGE in natural resource management. Managing the Carbon Cycle, National Forum, 22–23 November 2006.
- 27. Baver, L.D.** (1965). *Soil physics*. 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons), 489 pp.
- 28. Asociación Española de Agricultura de Conservación y Suelos Vivos (AEACSV) (s.f.).** [www.agriculturadeconservacion.org](http://www.agriculturadeconservacion.org)
- 29. Cox, W.J., Zobel, R.W., van Es, H.M., & Otis, D.J.** (1990). Tillage effects on some soil physical and corn physiological characteristics. *Agronomy Journal*, 82(6), 806. 812.
- 30. Jiménez, P. G. S.** (2011). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marítimo.
- 31. Hirzel, J. C., Salazar, F. S., Ovalle, C., & Quiroz, M.** (2021). Manejo sustentable de la fertilidad del suelo: Recomendaciones para el uso de enmiendas orgánicas. Manual de prácticas agrícolas para una agricultura sustentable. *Boletín INIA*, 426, 33. 65.
- 32. Costa, J. M., Egipto, R., Sánchez. Virosta, A., Lopes, C. M., Chaves, M. M.** (2019). Canopy and soil thermal patterns to support water and heat stress management in vineyards. *Agric. Water Manage.* 216, 484–496.
- 33. Shaxson, F., & Barber, R.** (1995). Optimización de la Humedad Del Suelo Para la Producción Vegetal: El Significado de la Porosidad Del Suelo (Boletines de Suelos de la Fao) (Vol. 79). Food & Agriculture Org.
- 34. Gras, E.** Cosecha de agua y tierra. *Diseño con Permacultura, 1st ed.; Ediciones Ecohabitar, Visiones Sostenibles S.L.: Teruel, Spain.* (2012); p. 240.
- 35. del Carmen Ponce. Rodríguez, M., Carrete. Carreón, F. O., Núñez. Fernández, G. A., de Jesús Muñoz. Ramos, J., & Pérez. López, M. E.** (2021). Keyline in bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for soil and water conservation. *Sustainability*, 13(17), 9982.
- 36. Cortés Torres, H., & Ramírez Luna, J.** (2013). Diseño hidrológico del terreno (sistema Keyline), en parcelas agrícolas con precipitación limitada: manual técnico.
- 37. Bert, R., Steven, B., Victoria, N., Paul, P., & Kris, V.** (2017). Ecosystem service delivery of agri. environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 244, 32. 51
- 38. Rey Benayas, J.M., Gómez Crespo, J.I. y Mesa Fraile, A.V.** (2016). Guía para la plantación de setos e islotes forestales en campos agrícolas mediterráneos. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas, Madrid.
- 39. Rey. Benayas, J. M.** Establecimiento de islas forestales y otras actuaciones de revegetación estratégica en paisajes agrícolas como mecanismo de adaptación al cambio climático.



# Agri Adapt

Con el apoyo de:



VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Fundación Biodiversidad



Organiza:

