



Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el cultivo sostenible de maíz (PTAP)



Unión Europea
Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



PNDR
Programa Nacional de Desarrollo Rural

GO MAÍZSOSTENIBLE, actuación con una ayuda total de 532.219,05 €, cofinanciada en un 80% por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) de la Unión Europea y en un 20% por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través de la Dirección General de desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria (DGDRIFA), en el marco del Programa Nacional de Desarrollo Rural 2014-2020.

Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el
cultivo sostenible del maíz (PTAP)



Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el cultivo sostenible del maíz (PTAP)

Manuel Pérez-Ruiz
Estefanía del Rocío Ruiz González
Santiago De Mingo Marín
Manuela Díaz Hidalgo

Edita:
Socios beneficiarios del GO MaízSostenible



GO MAÍZSOSTENIBLE, actuación con una ayuda total de 532.219,05 €, cofinanciada en un 80% por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) de la Unión Europea y en un 20% por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través de la Dirección General de desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria (DGDRIFA), en el marco del Programa Nacional de Desarrollo Rural 2014-2020.

Información de interés:

Responsable del contenido: Socios beneficiarios del grupo operativo

Autoridad de Gestión encargada de aplicación de la ayuda FEADER: Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria (DGDRIFA)

Responsable de FEADER en la Comisión Europea: Desarrollo Rural

Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el Cultivo Sostenible del Maíz (PTAP)

Edita. Socios beneficiarios del GO MaízSostenible

Autores. Manuel Pérez-Ruiz, Estefanía del Rocío Ruiz González, Santiago De Mingo Marín y Manuela Díaz Hidalgo

Diseño, edición de textos y maquetación. CACTUS. INVESTIGACIÓN CUALITATIVA Y COMUNICACIÓN S.L.

ISBN 978-84-09-48296-2

Año 2023

Tipo de entregable	Informe Final
Id	IF3
Nombre	Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el cultivo sostenible del maíz (PTAP)
Actividad/Resultado	Actividad 5 / Resultado 3
Versión	Versión 1
Fecha de entrega	01/12/22
Autor principal	Universidad de Sevilla
Participantes	Vertex Bioenergy, ITACyL, Corteva Agriscience, TimacAgro, Grupo AN, US.
Nivel de difusión	Grupo Operativo

Miembros solicitantes:



Miembros colaboradores:



Contenidos

01. Flujo de trabajo en el Protocolo de técnicas de agricultura de precisión	11
02. Dispositivo de control para la monitorización de tareas en campo y ayuda a la determinación de la emisión de gases de efecto invernadero	12
03. Instalación y puesta en marcha de la estación meteorológica	14
04. Información del suelo a través del sensor de inducción electromagnética. Zonificación	16
05. Zonificación de la parcela a través del histórico de imágenes satélites	19
06. Toma y análisis de muestras de suelo georreferenciadas	21
07. Abonado de aplicación variable	23
08. Siembra variable	25
09. Seguimiento del cultivo por satélite. Teledetección	26
10. Cosecha con monitor de rendimiento	29
11. Riego inteligente	31
12. Cálculo de emisiones de CO ₂	36





Flujo de trabajo en el Protocolo de técnicas de agricultura de precisión

01



02

Dispositivo de control para la monitorización de tareas en campo y ayuda a la determinación de la emisión de gases de efecto invernadero

Debido al cambio climático, el calentamiento global, el creciente efecto invernadero y las nefastas consecuencias que acarrearán todos ellos sobre el planeta, urge tomar medidas para paliar estos efectos negativos.

Los **gases de efecto invernadero** son aquellos que se encuentran en nuestra atmósfera y cuya función es absorber y emitir la radiación procedente de la luz solar dentro del rango del infrarrojo. Hoy en día, la concentración de estos gases se está volviendo demasiado elevada provocando estragos ambientales.

La agricultura también contribuye con las emisiones de gases de efecto invernadero, más concretamente con emisiones de óxido nítrico (N_2O), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Las actividades específicas que contribuyen a las emisiones de N_2O de las tierras agrícolas incluyen

la aplicación de fertilizantes sintéticos y orgánicos, el crecimiento de cultivos fijadores de nitrógeno, el drenaje de suelos orgánicos y las prácticas de riego.

Uno de los factores que más contribuye a la huella de carbono en las explotaciones agrícolas es el uso de la **maquinaria** y los diferentes implementos para realizar las tareas sobre el cultivo. En este sentido, una monitorización dinámica de las tareas que realizan dichos vehículos en campo, del tiempo y consumo de combustible invertido, así como del nivel de emisiones reales que generan, contribuiría de forma decisiva a la certificación del carbono emitido en las parcelas.

Esta monitorización puede conseguirse con sistemas de telemetría avanzados con conectividad en tiempo real (IoT agrícola), montados sobre los vehículos, que actúen en cualquier momento del ciclo del cultivo. De esta forma, mediante un sistema de geofencing o vallado virtual, se puede delimitar la explotación y registrar de forma automática aquellas tareas que se están llevando a



Figura 1 . Linkerbox HD e instalación del mismo

cabo. Posteriormente, se analizarán los datos de tiempos de tareas, consumo real de combustible y datos agregados de posibles emisiones añadidas (transporte, desgaste, etc.) para computar la huella de carbono de dicha tarea.

En esta segunda campaña (2021-2022), se instaló en al menos un tractor por explotación experimental un dispositivo de monitorización de la maquinaria (modelo LinkerBox HD), de fácil instalación (**Figura 1**), con conectividad integrada y conectado

al puerto CAN del tractor. Con ello se registran los rendimientos de las tareas realizadas, la potencia empleada, el combustible consumido por vehículo (**Figura 2**) y otros datos de interés del comportamiento y funcionamiento del vehículo. Esta monitorización de parámetros permite estimar con precisión el consumo de combustible para cada tarea y por tanto la emisión de gases expulsados a la atmósfera.

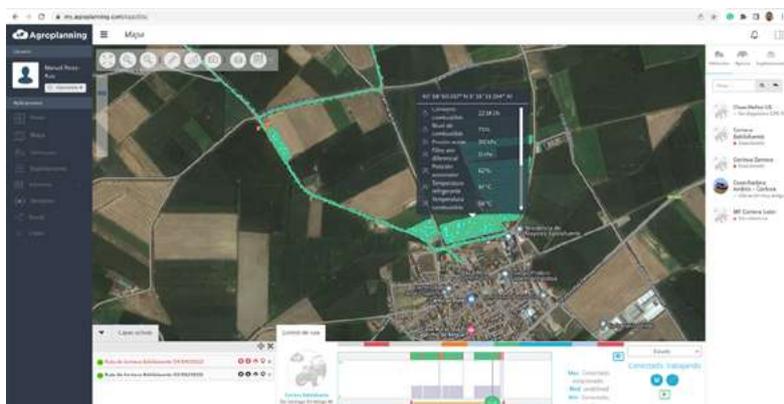


Figura 2. Registro de datos tomados por Linkerbox HD. Agropanning.

03 Instalación y puesta en marcha de la estación meteorológica

Con el fin de determinar de manera precisa las condiciones climáticas y poder realizar un seguimiento más exhaustivo del cultivo, se instaló una estación meteorológica (**Figura 3**) en la parcela en

la que se encuentra el cultivo, siempre y cuando sea posible, o en una ubicación adecuada, lo más cercana posible.



Figura 3. Estaciones meteorológicas.

La estación meteorológica permite ver las mediciones en tiempo real desde un dispositivo móvil a través de una aplicación.

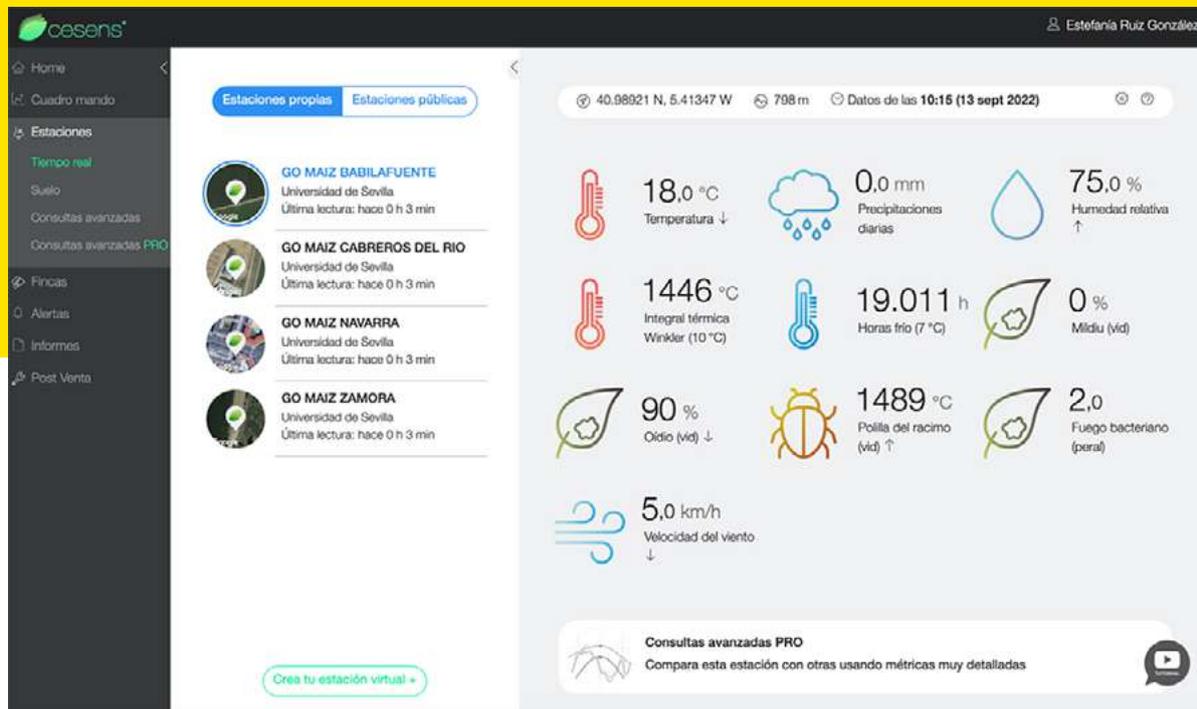


Figura 4. Datos enviados por los sensores de la estación meteorológica

La estación meteorológica cuenta con un anemómetro, veleta, pluviómetro, termómetro e higrómetro. Está conectada a una red que envía los datos que toman los sensores, de manera que se pueden ver las mediciones en tiempo real desde un dispositivo móvil a través de una aplicación. En la mayoría de las marcas comerciales, la aplicación

es capaz de calcular estadísticas de los parámetros medidos y de elaborar informes. (Figura 4)

Con los datos obtenidos, además de realizar un seguimiento del cultivo, podemos calcular las necesidades hídricas del cultivo y ajustar la dotación de riego en función de las condiciones climáticas.

04

Información del suelo a través del sensor de inducción electromagnética. Zonificación

La agricultura de precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales 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.

Para realizar el análisis de la variabilidad espacial, se puede utilizar un sensor de inducción electromagnética, por ejemplo, el del modelo Geonics EM38 mk2 (**Figura 5**).

Los sensores de inducción electromagnética miden la conductividad eléctrica aparente (CEa) de distintos volúmenes de suelo en función de la configuración interna del sensor. La respuesta del



Figura 5. Sensor Geonic EM 38.

sensor dependerá de la capacidad de los componentes del suelo para transmitir la corriente eléctrica a través de ellos. Dado que algunas de las propiedades importantes para la agricultura y para el desarrollo de los cultivos, tales como la concentración de solutos en la solución del suelo, el contenido en arcilla o la humedad, también influyen en la capacidad de este para transmitir electricidad, la CEa es un indicador genérico para la capacidad productiva de un suelo.



Figura 6. Sensor Geonic EM38 arrastrado por un quad.

El principio básico bajo el que funciona esta tecnología consiste en la transmisión de un campo electromagnético primario que induce corrientes eléctricas en el suelo. Estas corrientes generan un campo magnético secundario que son captadas por las bobinas receptoras. La conductividad eléctrica del suelo se mide como la relación entre las intensidades del campo magnético primario y el secundario.

La manera de usar el sensor es arrastrarlo por un quad, modelo Sportsman 570 Agri pro, por el terreno a explorar (**Figura 6**), mientras va haciendo mediciones y georreferenciándolas gracias a una antena GNSS que lleva incorporada. Para realizar esta labor el sensor se monta sobre un soporte que debe ser siempre de un material no conductor, generalmente plástico. Antes de realizar la medición es necesario diseñar el patrón que se va a seguir para la toma de datos.

En este proyecto se realizan pases paralelos por toda la parcela. El sensor realiza seis mediciones por segundo, lo que significa que, manteniendo una velocidad de 4-5 km/h, tenemos un dato aproximadamente, cada 25 cm. Además, cuenta con dos profundidades de exploración, de manera que se obtienen datos de conductividad a 0,5 y 1 m de profundidad.

Tras realizar las mediciones, el resultado se puede tratar mediante un software GIS (Sistema de Información Geográfica). Con el sensor se obtienen una serie de mediciones puntuales (**Figura 7**) que deben interpolarse (**Figura 8**) para cubrir toda la superficie de la parcela, es decir, obtener un dato de cada punto de esta.

Para este proyecto se busca obtener tres zonas de manejo diferenciado, cuyas características sean lo más homogéneas posible.



Figura 7. Datos brutos arrojados por es sensor.

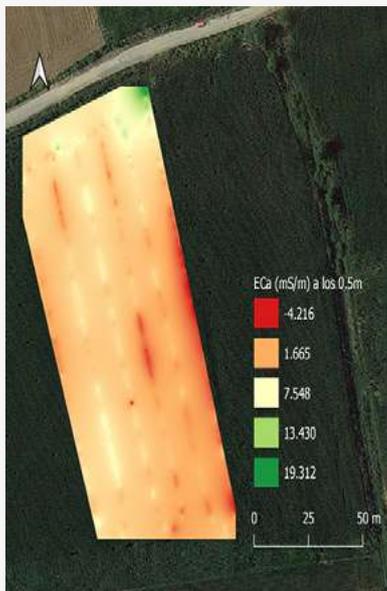


Figura 8. Interpolación de los datos.

La conductividad eléctrica, como se menciona anteriormente, está relacionada con características del suelo que afectan de manera directa a la fertilidad. Así, las tres zonas de manejo representan una zona de conductividad eléctrica alta, media y baja, que consideraremos, respectivamente, como zona de potencial productivo, alto, medio, y bajo (Figura 9).

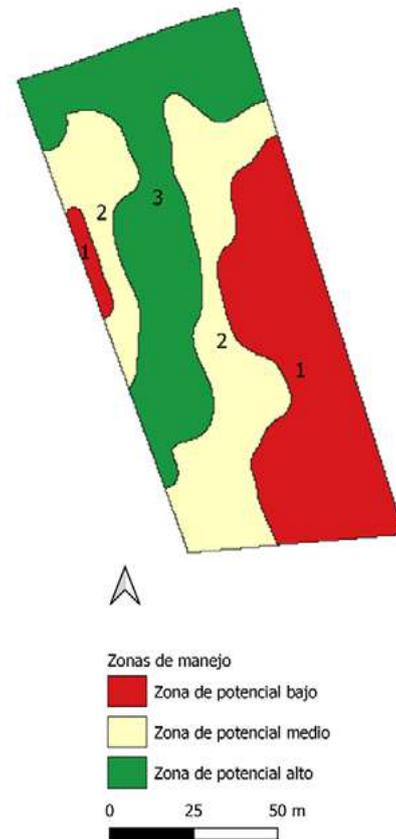


Figura 9. Zonas de manejo basado en conductividad electro-magnética aparente.

Zonificación de la parcela a través del histórico de imágenes satélites

Existe otro método para zonificar a partir de la heterogeneidad presente en el suelo. Se trata de los mapas de potencial productivo (**Figura 10**).

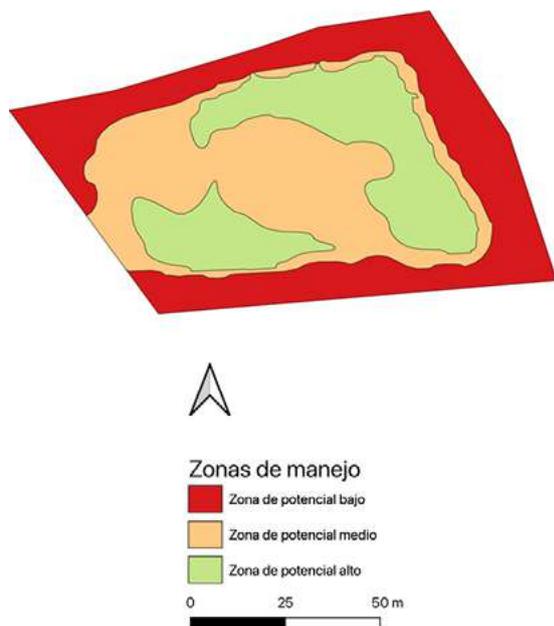


Figura 10. Zonas de manejo basado en potencial productivo.

En esta segunda campaña del **proyecto GO Maíz-Sostenible**, la zonificación de la parcela se ha llevado a cabo a partir del uso de una nueva aplicación, **Granular Link**, que ha desarrollado Corteva Agriscience (<https://link.granular.ag>) (**Figura 11**).



Figura 11. App Granular Link.

La aplicación utiliza series temporales de imágenes multiespectrales adquiridas por satélite o plataformas espaciales de campañas anteriores (últimos 30 años de imágenes). La serie temporal de valores de NDVI, entre otros, obtenida desde la constelación de satélites a utilizar permite definir

la trayectoria a lo largo del tiempo para cada píxel de la parcela, con la suficiente frecuencia. La tecnología detrás del análisis de series temporales no sólo emplea NDVI, sino un agregado de índices de vegetación (**Figura 12**).

Lo ideal, cuando existen años con cultivos diferentes al cultivo con el que se va a trabajar, es retirarlos de la serie temporal para no introducir anomalías por desarrollo diferencial.

La comparación espacial mediante superposición de mapas de variabilidad de una parcela a lo largo de los años permite desvelar, si existe, el patrón espacial común atribuible a factores estructurales.

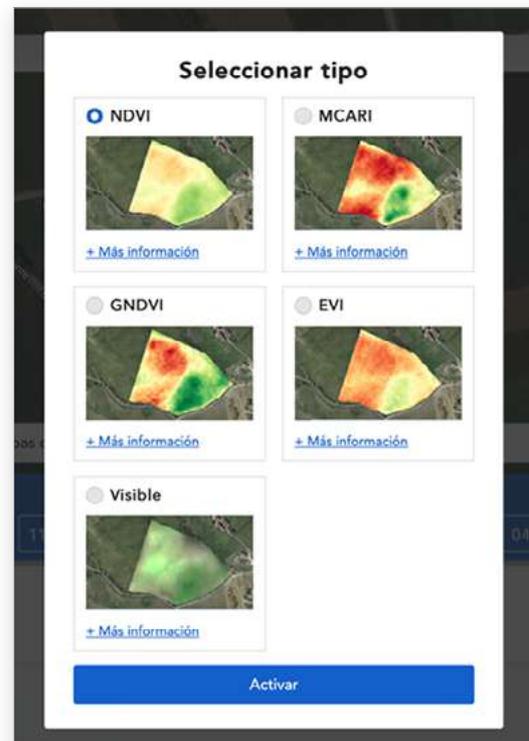


Figura 12. Diferentes índices de vegetación que usa la aplicación.



Toma y análisis de muestras de suelo georreferenciadas

06

El análisis de suelos es una herramienta de gestión ampliamente extendida, tanto en agricultura de precisión como en agricultura convencional. El análisis básicamente mide la cantidad presente en el suelo de los nutrientes más importantes para el desarrollo del cultivo y en qué medida están disponibles para su aprovechamiento por la planta. Además, también mide el pH del suelo, el cual está directamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes.

Basado en la información obtenida por el análisis de suelos se hace un cálculo de la cantidad de fertilizante a aplicar.

La ventaja de realizar un análisis de suelo es que, conociendo los requerimientos nutricionales del cultivo, se puede elaborar un programa de fertilización en el que se apliquen únicamente los nutrientes necesarios en las cantidades precisas.

Esto no solo puede suponer un **ahorro en fertilizante**, sino también un aumento en los **rendimientos** al poder detectar carencias nutricionales antes de que aparezcan y afecten a la planta.

La planificación y ejecución del muestreo de la tierra para realizar una analítica es tan importante como la propia analítica. Se deben hacer una serie de catas por las distintas zonas de la parcela, de manera que el suelo que se analiza en el laboratorio sea lo más representativo posible.

Para este proyecto y en esta segunda campaña se hacen catas en las diferentes zonas de manejo que previamente hemos establecido con los resultados que arroja el sensor de inducción y con los mapas de productividad.



De esta manera tendremos un muestreo de suelo para la zona de potencial bajo, para la zona de potencial medio y para la zona de potencial alto. En este caso el número de las muestras dependerá del tamaño de las subparcelas que hemos establecido como zonas de manejo. El recorrido para tomar las submuestras puede ser totalmente aleatorio, siguiendo líneas diagonales, zig-zag, etc, (**Figura 13**).

Con esta metodología podremos llevar a cabo una estrategia más exhaustiva y precisa en el programa de abonado de cobertera variable que aplicaremos en cada uno de los ensayos.

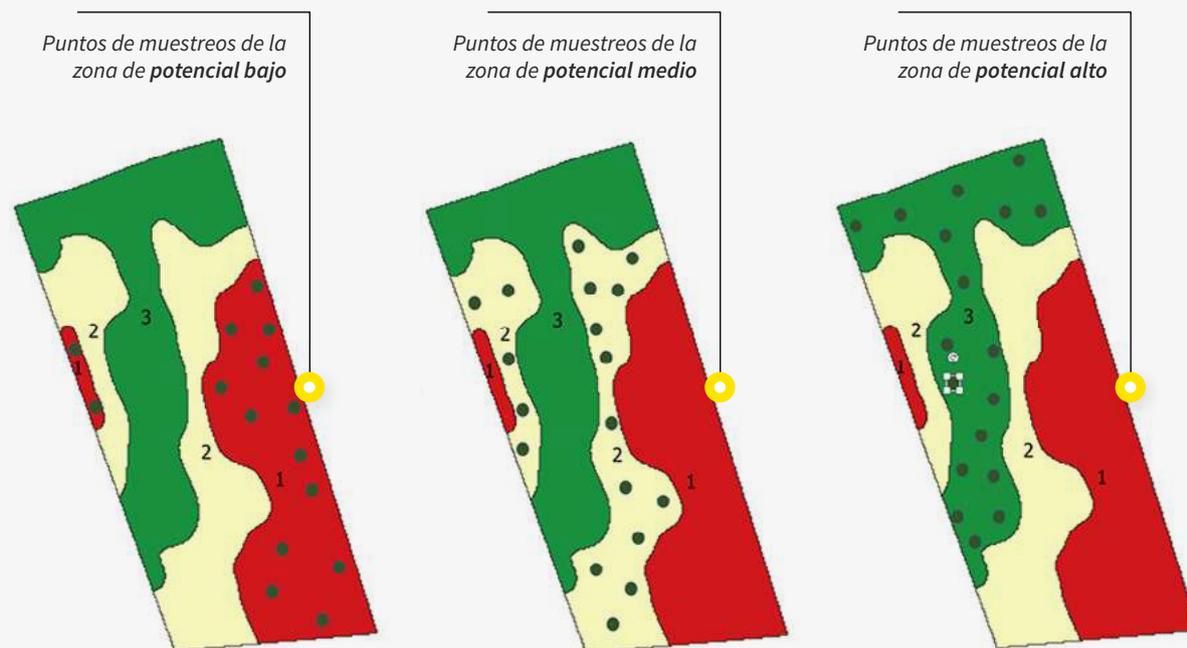


Figura 13. Recogida de muestras en zonas georreferenciadas.

Abonado de aplicación variable

07

La dosificación variable (VRT, por sus siglas en inglés) es una técnica de agricultura de precisión que permite la aplicación variable de fertilizantes adecuados a los requerimientos del cultivo según las zonas de manejo que previamente se han establecido.

Con esta técnica nos aseguramos de que las plantas reciban los nutrientes necesarios con la **dosis conveniente** para cada una de las áreas.

7.1. Abonado de fondo

La aplicación del abonado de fondo se hace siguiendo las técnicas de **agricultura convencional**. Basándose en los resultados del análisis de suelo y en otros datos disponibles como el potencial productivo de la parcela, la presencia de restos del cultivo anterior o el aporte de nutrientes por el agua de riego se elabora el plan de abonado. De este plan se obtienen las necesidades de abonado totales, que se reparten entre el abonado de fondo y el de cobertera.

Una vez que se conocen las unidades fertilizantes a aplicar en fondo y se ha elegido el fertilizante, se realiza la aplicación.

En esta segunda campaña, al igual que en la primera, la aplicación del abonado de fondo se realizó con una dosis fija para toda la parcela y antes de la siembra.

7.2. Abonado de cobertera

El abonado de cobertera se realiza en condiciones normales, eligiendo el fertilizante que mejor se adapte a las condiciones de la parcela y realizando la aplicación en el momento óptimo.

Se realiza un abonado variable, por lo que se necesita una abonadora de aplicación variable y un mapa de prescripción en el que se marquen las distintas zonas de manejo de la parcela y la dosis de fertilizante a aplicar en cada una de ellas.

Para realizar el mapa de prescripción (**Figura 14**) se parte con la información de las zonas de manejo que previamente hemos delimitado, bien con la información que nos ha proporcionado el pase del sensor de inducción electromagnética o bien con el que hemos establecido con la app **Granular Link**

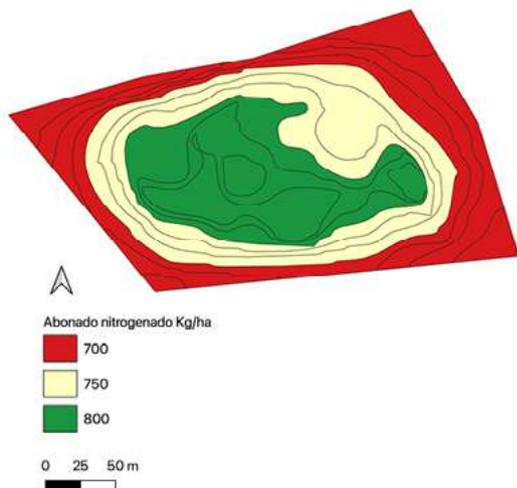


Figura 14. Mapa de prescripción de abonado de cobertera.

a partir de la productividad del suelo a lo largo de una amplia serie temporal.

Por otro lado, con los datos del análisis de suelo y otra información adicional como el potencial productivo de la parcela, el abonado aplicado en fondo o la presencia en la tierra de restos de la cosecha anterior, se calculan las necesidades medias de abonado en cobertera para el cultivo y parcela concretos.

Posteriormente, solo quedaría elaborar el mapa de prescripción, asignando la dosis de fertilizante nitrogenado calculada a la zona de rendimiento potencial medio. Para la zona de rendimiento de potencial productivo alto se establece una dosis un 10% superior a la establecida para la zona de potencial productivo medio y un 10% por debajo a esta dosis para la zona de potencial productivo bajo.

En esta segunda campaña se elaboró el mapa de prescripción para el abonado de cobertera en la aplicación digital de Corteva Agriscience, *Granular Link*.

Finalmente, el mapa de prescripción se exporta en un formato compatible con el controlador de la abonadora (**Figura 15**) y está preparado para ser cargado y realizar el abonado variable de cobertera (**Figura 16**).



Figura 15. Monitor del tractor visualizando el abonado que se está aplicando en ese momento.



Figura 16. Tractor realizando abonado de aplicación variable.

Siembra variable

08

La siembra debe realizarse con una sembradora de siembra variable, es decir, una **sembradora neumática monograno** capaz de variar la dosis de siembra en funcionamiento. Para poder llevar a cabo dicha siembra, además de una sembradora adecuada, hace falta un **mapa de prescripción**, que se carga en el controlador de la sembradora e indica la dosis de siembra en cada una de las zonas de la parcela.

Con el análisis de los datos tomados con el sensor de inducción electromagnética obtendremos parte de la información necesaria para elaborar el mapa de prescripción en el que se delimitan las tres zonas de manejo homogéneo y se establece la densidad de semilla que llevará cada una de estas zonas.

O bien, con el mapa de prescripción de siembra que aporta la herramienta digital (*Granular Link*) que en esta segunda campaña hemos usado (**Figura 17**).

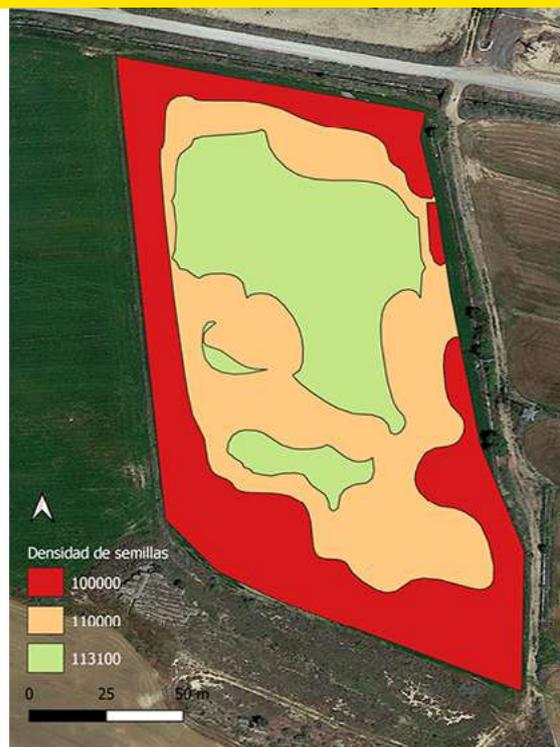


Figura 17. Mapa de prescripción de siembra.



09

Seguimiento del cultivo por satélite. Teledetección

Las técnicas de teledetección por satélite pueden aplicarse en cultivos tanto a pequeña como a gran escala, permitiéndonos generar conocimiento útil y profundo sobre cultivos y plantaciones extrayendo datos sin guardar contacto con los mismos.

Teniendo en cuenta la luz solar y midiendo la reflectancia del cultivo en cada una de las bandas del espectro electromagnético, se pueden generar combinaciones numéricas de bandas relacionadas con propiedades como la presencia, la biomasa y la salud de los cultivos, así como tener un seguimiento temporal de su evolución fenológica. En la actualidad existen diversos **índices de vegetación**:

NDVI

Índice de vegetación de diferencia normalizada. Utiliza una escala de valores en el ámbito agrícola entre 0 y 1 en el que valores bajos indican la no presencia de cultivo (o algún tipo de problema), hasta alcanzar valores altos que implican un alto vigor del cultivo y, en consecuencia, su buen estado de salud y nutrición. Su sencillo cálculo, a través de la siguiente fórmula $(NIR-RED) / (NIR+RED)$, donde NIR es la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano y RED, la de la reflectancia de la parte roja visible.

El **índice de vegetación ajustado al suelo** añade un factor de ajuste al clásico NDVI, que permite minimizar las influencias del brillo y ruidos del suelo. Su uso se extiende principalmente en cultivos jóvenes, donde la cobertura vegetal es parcial.

SAVI

NDMI

Este es el **índice de humedad de los cultivos**, que sirve para medir el contenido de agua de las plantaciones y así poder localizar las zonas que puedan estar sufriendo cierto estrés hídrico.

EVI

Este índice complementa al NDVI y permite ajustar sus valores en función de diversas condiciones atmosféricas, así como minimizar la influencia del suelo, especialmente en zonas con una vegetación densa. Se caracteriza por su robustez y la estabilidad en sus valores en series históricas.

Este índice, de la familia de los índices CARI, **se emplea para medir la ratio de absorción de clorofila** por parte del cultivo. Es muy sensible a las variaciones de clorofila y al índice de área foliar, por lo que resulta muy útil para diferenciar zonas con diferentes estadios nutricionales o carencias dentro de la explotación.

MCARI

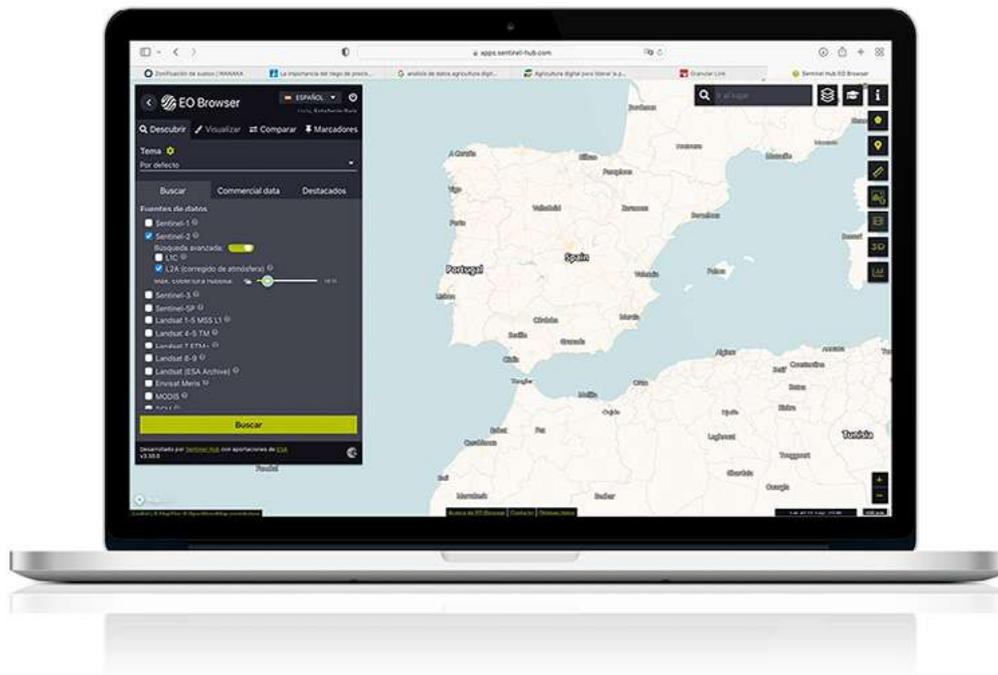


Figura 18. Descarga de imágenes satelitales desde Sentinel-2.

En esta segunda campaña se emplean sistemas de monitorización basados en *data sets* de imágenes de satélite de fuentes públicas como los de la constelación Sentinel 2A y 2B de la Agencia Espacial Europea, (**Figura 18**) para el estudio de la evolución del maíz a lo largo de todo su ciclo de cultivo integrando los índices de vegetación de mayor utilidad (**Figura 19**).

Se procede a la descarga de imágenes cada 15 días aproximadamente para el seguimiento de su estado. De esta forma se puede relacionar este análisis de teledetección con algunas de las técnicas de agricultura de precisión (siembra variable, abonado variable, etc.) que hemos ido aplicando en este proyecto y también estaremos informados de cualquier adversidad que pueda presentar el cultivo.

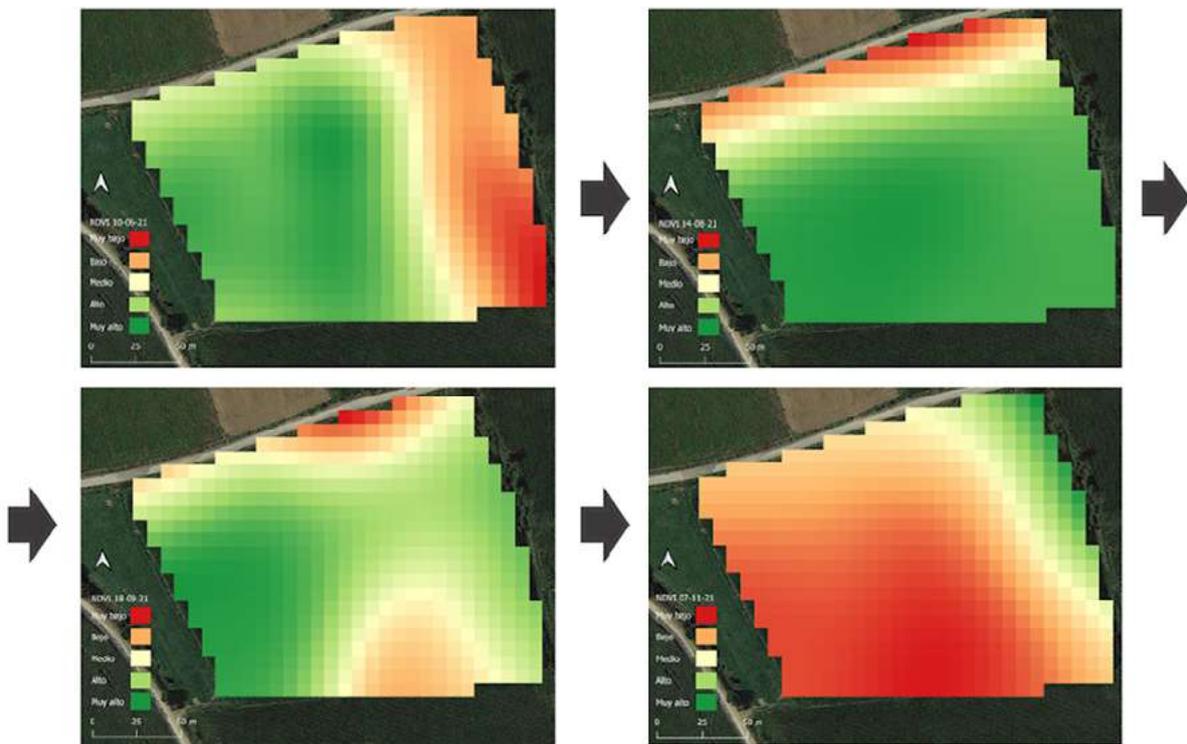


Figura 19. Evolución del NDVI en una parcela de maíz.

Cosecha con monitor de rendimiento

10

La cosecha se lleva a cabo con una cosechadora con monitor de rendimiento (**Figura 20**) cuyo objetivo básico es indicar la cantidad de producto cosechado por cada unidad de superficie que instantáneamente encontramos a medida que vamos cosechando.

Esta información, que varía de unos puntos a otros de la parcela, se actualizará instantáneamente a intervalos de tiempo regulares, normalmente uno, dos o tres segundos. Sin embargo, la indicación en una pantalla numérica del valor instantáneo de producción no resulta suficiente para un estudio



Figura 20. Cosechadora con monitor de rendimiento.

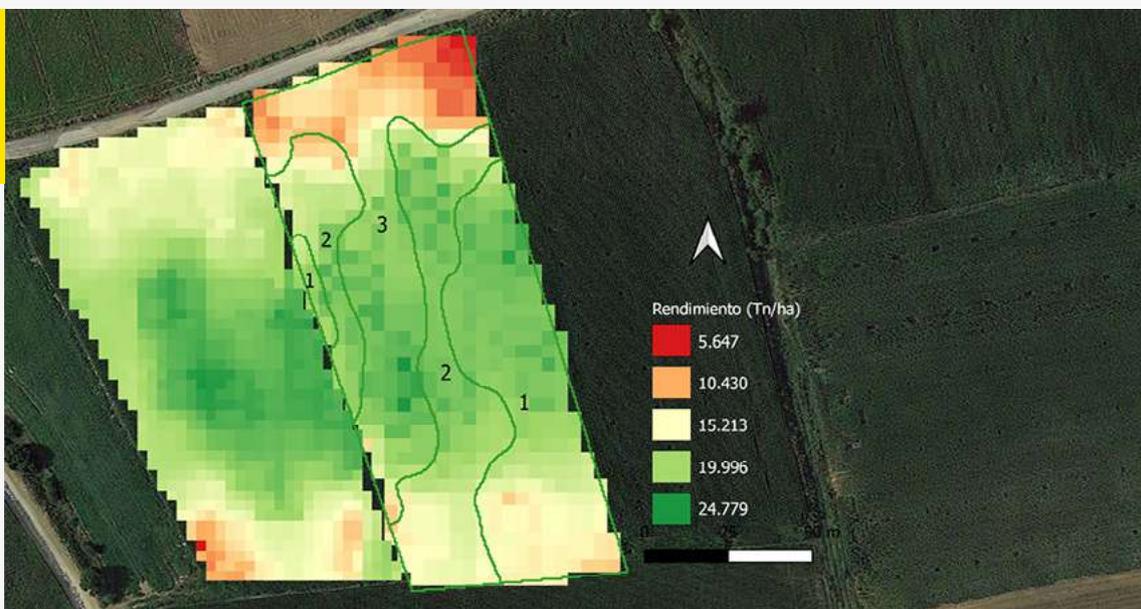


Figura 21. Mapa de rendimiento.

pormenorizado en comparación con la distribución de otras propiedades. Es necesario, por tanto, que la información tomada quede registrada y pueda ser descargada después de la operación en un ordenador para su posterior análisis. De igual manera resulta básico asignar a cada dato del rendimiento instantáneo unas coordenadas (X, Y, Z) que permitan realizar el mapa de distribución espacial del rendimiento (**Figura 21**).

Para el almacenamiento de la información generada, el monitor de rendimiento dispone de **tarjetas de memoria extraíbles** que pueden ser leídas por los ordenadores o dispositivos de mano, mientras que las coordenadas para la localización se obtienen mediante un receptor del sistema de navegación global por satélite (GNSS), mejorando

la precisión si se emplea tecnología diferencial. Hoy en día, algunos sistemas más avanzados de monitorización del rendimiento utilizan sistemas de gestión remota o telemetría para el envío en tiempo real de la información sobre el rendimiento a un servidor. Esto permite el procesado inmediato por parte de un técnico o de la empresa especializada y el acceso a esta información en cualquier momento y desde cualquier dispositivo.

La información referente al rendimiento de cosecha en combinación con otro tipo de información sobre el suelo y el cultivo, reunida de la forma más eficiente posible, son un buen punto de partida para la caracterización de la variabilidad existente en las parcelas.

Riego inteligente

11



Como sabemos, la eficiencia del uso del agua, también llamada productividad del agua, es la relación que existe entre la biomasa presente en un cultivo y la unidad de agua utilizada por éste en un determinado momento.

Es por ello necesario **optimizar y minimizar al máximo la evaporación, el drenaje y la escorrentía**, para que la eficiencia del uso del agua sea la mayor posible.

Se debe tener en cuenta que para conseguir reducir lo máximo posible las necesidades hídricas del cultivo, se pueden sembrar variedades de semillas donde la mejora vegetal haya jugado un papel importante, y así conseguir las mismas o mayores producciones con menos agua, o lo que es lo mismo, que estas semillas presentan más tolerancia al estrés por sequía.

Actualmente, existen numerosos avances tecnológicos que permiten hacer riegos más eficientes que los que se han llevado a cabo tradicionalmente, garantizando de este modo la optimización en el uso del agua sin descuidar la calidad del producto.

Una de las formas para llegar a esa gestión óptima del agua es con el riego de aplicación variable. Esto permite hacer un manejo de precisión, tanto en el agua aplicada, como de los insumos que se pueden aplicar a través de ella. En el cultivo del maíz en España hay tres tipos fundamentales de riego: el **riego por inundación** (ya sea en toda la parcela o por surcos) en el cual el manejo de precisión es prácticamente imposible de conseguir; el **riego por aspersión**, que, dependiendo de si los aspersores son fijos o montados en sistemas móviles como el pivot, la automatización para el manejo del riego de precisión puede llevarse a cabo mediante sensores y válvulas de caudal; y por último el riego localizado o **riego por goteo**, de escasa implantación aún en este cultivo y similar dificultad para convertirlo en riego de precisión que en caso de la aspersión.

El punto clave de esta aplicación variable está en conocer la variabilidad que existe en la zona donde se va a llevar a cabo dicho riego variable, con lo cual regaremos en base a las características de cada zona.

Para hacer esta variación en la aplicación del agua existen **dos tipos de control**:

- **Por velocidad**: el sistema aumenta o reduce la velocidad del pívot para obtener la lámina deseada en un sector particular pero el caudal siempre es el mismo, de forma que, donde necesitemos aplicar más agua, la velocidad será menor que donde queremos aplicar menos. Este sistema implica que, al variar la velocidad por una zona de la parcela que así lo precise, toda la longitud del pívot debería variar su velocidad para mantener la alineación de las torres, pudiendo generar otras superficies de la parcela en las que no es conveniente esta modificación de la dosis de riego.
- **Por zonas**: los aspersores están agrupados en zonas y son accionados por electroválvulas para proporcionar la lámina deseada en cada zona. El caudal es variable y las boquillas de los aspersores tienen reguladores de presión que harán que aporten más o menos agua según las necesidades de cada zona. Las boquillas van agrupadas y cada grupo tiene su regulador de presión. Este sistema necesita una mayor inversión que en el controlado por la velocidad, pero es de mucha mayor precisión y actúan en sectores más pequeños.

La tarea difícil en este sistema es sacar el mapa de variabilidad, que el agricultor tendrá el poder de decidir si lo quiere en base a análisis de suelo, tipo de suelo, rendimientos, etc.

Las condiciones climáticas influyen en la frecuencia de riego, pero la dosis estará relacionada con las características del suelo.

Para poder llevar este tipo de riego se tiene que contar con una infraestructura y unas características especiales que no se dan en todas las zonas de regadío. Lo ideal sería un diseño desde el inicio, pero en la mayoría de los casos es muy difícil llegar a poder adoptar estas tecnologías, y es por ello por lo que para conseguir optimizar el agua de riego se puede llevar a cabo otra serie de pasos que detallamos a continuación.

Para poder actuar de forma acertada sobre el aumento de la eficiencia del uso del agua mediante innovaciones agronómicas o herramientas digitales y llevar a cabo métodos de programación de riego, hay que tener en cuenta tres puntos donde podemos **actuar**:

- Medida o estimación de las necesidades hídricas del cultivo, en base a medidas climáticas, sin medir nada de la explotación.
- Medida del estado hídrico del suelo, es decir, actuando en la monitorización del suelo.
- Medida del estado hídrico del cultivo, es decir, actuando en la monitorización de la planta.

Para hacer una buena programación del riego se necesitan sensores, además de estaciones climáticas, para poder llevar a cabo métodos de predicción meteorológica fiable para el día o días siguientes en los que tendrá lugar el evento de riego. De esta forma el riego es mucho más eficiente al tomar datos fiables y más exactos, de manera que se elabora el programa pensando en lo que va a acontecer (**Figura 22**), y no lo que ha acontecido, es decir, el programa de riego no se basa en datos históricos si no en pronósticos.

Para hacer una buena programación del riego se necesitan sensores, además de estaciones climáticas, para poder llevar a cabo métodos de predicción meteorológica fiable.

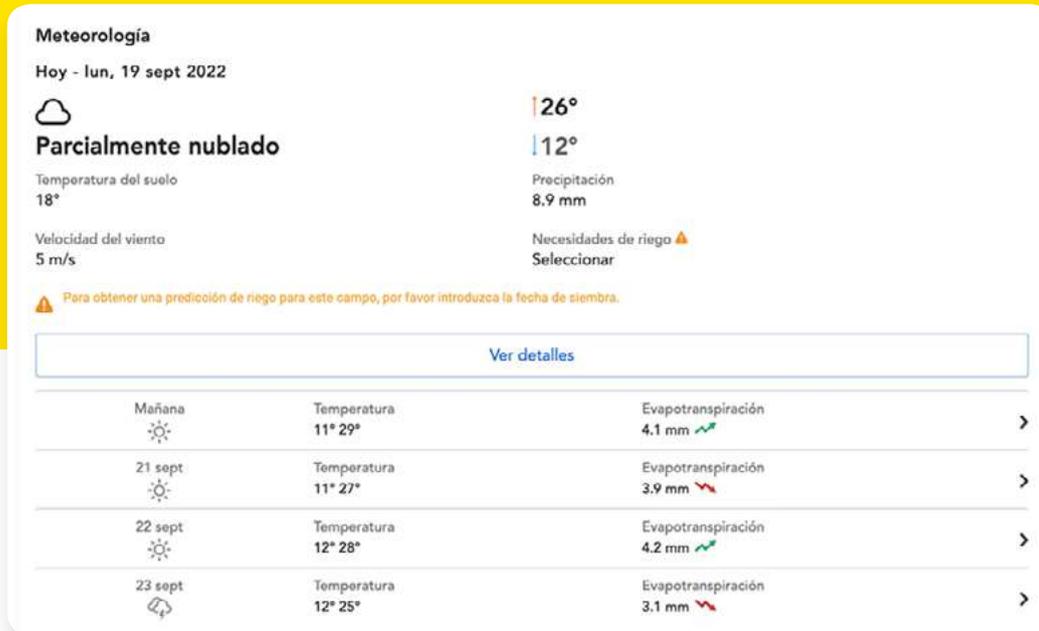


Figura 22. Previsión de la meteorología para el programa del riego.

Por otra parte, si tenemos en cuenta las medidas del estado hídrico del suelo podemos decir que en este punto se mide el **contenido de humedad** o el **potencial matricial** del suelo, así se lleva a cabo la determinación de las necesidades de riego elaborándose pues un programa de riego.

Las ventajas que encontramos con este método son muchas; entre otras, que son fáciles de aplicar, que son bastantes precisos, que existen muchos

sistemas comerciales disponibles, que los sensores son fácilmente automatizables... Aunque también encontramos algunos inconvenientes, como la heterogeneidad que presentan los suelos, lo que nos lleva al uso de un alto número de sensores, también nos encontramos con dificultades para seleccionar la posición correcta de la instalación del sensor, además de que la respuesta del cultivo a un estado hídrico del suelo determinado varía con la demanda atmosférica.



Hay que tener en cuenta que se le saca mucho más partido a esta sensorica cuando se instalan desde el principio de la plantación.

Por nombrar algún ejemplo de sensores que podemos usar para medir el estado hídrico del suelo citamos las sondas capacitivas de humedad (contenido volumétrico del agua) o las de conductividad eléctrica, entre otros muchos.

Por último, si nos centramos en el **estudio del estado hídrico de la planta o del cultivo** podemos decir que es el método más fiable con respecto a los nombrados anteriormente, debido a que la planta actúa de intermediario entre el suelo y la atmósfera, es decir, el estado hídrico del cultivo integra tanto factores edáficos como climáticos, además de saber con exactitud qué estamos midiendo y dónde a diferencia de la incertidumbre existente en los sensores de suelo.

La desventaja que presenta esta técnica es que es difícil la interpretación de las medidas, debido al número de factores que influyen en ellas (estado hídrico del suelo, factores climáticos, respuesta fisiológica de cada especie, factores agronómicos, etc.).

Entre los más convencionales (medidas puntuales y manuales) destacamos aquellos sensores que son capaces de medir el potencial hídrico foliar (se suele hacer al amanecer en hojas o tallos), llamados también cámaras de Scholander, la cual mide la energía con la que el agua está retenida dentro de la célula de manera que esta energía aumenta cuando la planta está deshidratada y disminuye cuando la planta está suficientemente hidratada.

Dentro de los métodos convencionales también podemos nombrar los sensores que miden la conductancia estomática (salida del agua desde los estomas hasta la atmósfera), es el indicador que antes responde al estrés de sequía.

En cuanto a **sensores automáticos** y de medidas continuas podemos destacar:

a) Aquellos que hacen medidas del contenido de agua en el tronco y los que miden las variaciones de potencial eléctrico en la planta, aunque tienen poco uso.

b) Y por otro lado, otros más desarrollados y de bastante más usos son los que se engloban en dos grupos:

» Sensores que están en contacto con la planta:

- Flujo de savia.
- Dendrómetros, miden la variación en el diámetro del tronco.
- Presión de turgencia de las hojas.

» Sensores que toman medidas remotas:

- Contenido de agua en las hojas con espectroscopia NIR.
- Temperatura de la copa con termometría y termografía.

Para este proyecto, debido a la inexistencia de equipamiento especializado para un riego sectorizado, se ha llevado a cabo un riego homogéneo tanto para la parcela optimizada como la testigo, además en cada ensayo se ha regado según la dotación de agua que el agricultor tuviera concedida y siguiendo el programa que habitualmente el agricultor realiza.

A partir del conocimiento de la cantidad de agua total empleada para el ciclo del cultivo del maíz en cada ensayo se ha calculado la evapotranspiración del cultivo (ETc) mediante técnicas de *remote sensing* o teledetección para la obtención de una serie temporal de imágenes y poder obtener de esta forma la evolución de la cubierta vegetal mostrando la variabilidad espacial y temporal de los factores fisiológicos.

Con esta metodología se calculan índices de vegetación como el NDVI a partir del cual somos capaces de calcular el coeficiente de cultivo.

Teniendo en cuenta estos datos se calcularon índices de riego para comprobar si el riego aplicado por cada agricultor fue deficiente, suficiente o excesivo.

Del mismo modo se calculó la eficiencia del uso del agua tanto en la parcela optimizada como en la testigo, obteniendo de este modo una comparativa entre ambas en función de los rendimientos obtenidos y la distribución de las semillas.

 Existen numerosos avances tecnológicos que permiten hacer riegos más eficientes que los que se han llevado a cabo tradicionalmente, garantizando la optimización del agua sin descuidar la calidad del producto.

12 Cálculo de emisiones de CO₂

Para **calcular las emisiones de gases de efecto invernadero** medidas en kilogramos de CO₂ equivalente por tonelada de materia seca (KgCO₂eq/ tdm) en un cultivo, es conveniente utilizar una **calculadora de emisiones de GEI**, siguiendo la metodología de cálculo del *Esquema voluntario de sostenibilidad* de International Sustainability and Carbon Certification (ISCC)(ISCC 205, emisiones de gases de efecto invernadero) basado en la Directiva EU 2018/2001 que entró en vigor el 1 de julio de 2021 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. La herramienta de cálculo ha sido validada por el equipo de expertos en cálculos de emisiones de gases de efecto invernadero de Control Union.

La calculadora tomada como ejemplo se divide en diferentes apartados divididos por cinco categorías: **productos, entrada de materia, fertilizantes y fitosanitarios, energía y emisiones totales.**

1. **Productos:** refleja la cantidad de cereal cosechado por hectárea y año y la humedad de este para el cálculo de las toneladas de cereal seco.
2. **Entrada de materia prima:** indica la cantidad de semillas sembradas por hectárea y año y según el factor de emisión (FE) de las semillas se calculan sus emisiones de KgCO₂eq/tdm.

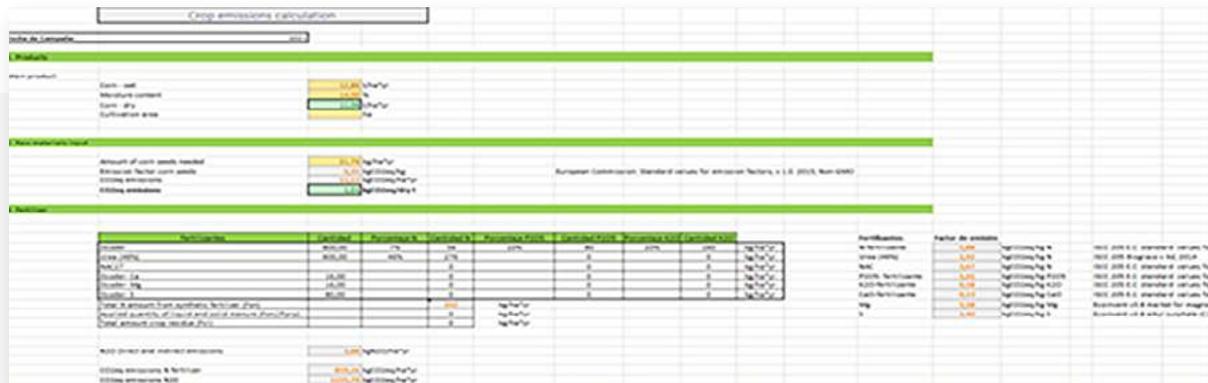


Figura 23. Ejemplo de calculadora de CO2 basada en programa Excel.

3. Fertilizantes y fitosanitarios está dividido en dos apartados:

- Fertilizantes: indica el porcentaje de producto que compone cada fertilizante para fertilizantes nitrogenados y no nitrogenados. En los nitrogenados se muestra la cantidad de nitrógeno (N) en el fertilizante por su FE, y las emisiones de óxido nitroso (N₂O), las cuales se calculan según las directrices del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). En los no nitrogenados se muestra la cantidad de fertilizante por su FE.
- Fitosanitarios: utiliza un FE general para todos los fitosanitarios del ISCC donde se suma la cantidad de todos los fitosanitarios utilizados y se multiplican por el FE.

4. Energía: agrupa tres tipos de emisiones. Las emisiones por el consumo de electricidad, que incluye las derivadas del manejo y alma-

cenamiento del cereal, así como de las tareas de riego. Las emisiones por el consumo de gas natural, que incluye las emisiones del manejo y almacenamiento de cereal además del consumo del secadero. Por último, las emisiones por el consumo de diésel, que incluye el consumo de la maquinaria utilizada para la preparación de la tierra, siembra, aplicación de agroquímicos y la cosecha.

5. Emisiones totales: es la suma de las emisiones de todos los apartados anteriores expresados en KgCO₂eq/tdm que mediante factor de conversión también calcula las emisiones en gCO₂eq por MJ de etanol.

Los **datos necesarios para la calculadora** de emisiones del cultivo del maíz, y que se deben de obtener de los resultados de la cosecha, la combinación de las TAP y los datos obtenidos de las mismas, según los apartados en la calculadora tomada como ejemplo, son los siguientes:



3

Fertilizantes y pesticidas

- » Fertilizantes
 - **Kg por ha** de fertilizantes usados **según el porcentaje de cada componente activo (N-P-K)**.
- » Pesticidas
 - Cantidad de pesticidas totales utilizados en **kg/ha*año**.

4

Energía

- » Electricidad consumida por el manejo y almacenamiento del cereal, así como de las tareas de riego (**kWh/ha*año**).
- » Consumo de gas natural debido al manejo y almacenamiento de cereal además del consumo del secadero (**kWh/ha*año**).
- » Consumo de Diesel por maquinaria utilizada para la preparación de la tierra, siembra, aplicación de agroquímicos y cosecha (**l/ha*año**).

Con toda la información de los apartados anteriores ingresada en la herramienta de cálculo, se obtendrá el resultado de las **emisiones totales (KgCO₂eq/tdm)**.



Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el cultivo sostenible del maíz (PTAP)

© Socios beneficiarios del GO MaízSostenible

© Los/as autores/as

Año 2023



Protocolo de técnicas de agricultura de precisión para el cultivo sostenible del maíz (PTAP)

Diciembre 2022

