

**TÉCNICAS AGRARIAS
SOSTENIBLES
MITIGADORAS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO
LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN**





6

**¿QUÉ ES LA
AGRICULTURA DE
PRECISIÓN?**

7

**NUEVAS
TECNOLOGÍAS
AGRÍCOLAS.
AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**

13

**CICLO DE LA
AGRICULTURA
DE PRECISIÓN**

14

**ADQUISICIÓN
DE DATOS EN
AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**



20
ANÁLISIS DE LA
INFORMACIÓN

21
TOMA DE
DECISIONES

23
APLICACIONES
CON DOSIS
VARIABLE

28
INFLUENCIA DE
LOS SISTEMAS
DE AGRICULTURA
DE PRECISIÓN
EN EL AHORRO
DE ENERGÍA EN
LA EXPLOTACIÓN
AGRARIA

31
BIBLIOGRAFÍA



EDITA

Asociación Española Agricultura de Conservación. Suelos Vivos (AEAC.SV)

COORDINACIÓN GENERAL

Emilio J. González Sánchez (AEAC.SV), Jesús A. Gil Ribes (Universidad de Córdoba),
Rafaela Ordóñez Fernández (IFAPA)

AUTORES

Juan Agüera Vega y Francisco Márquez García
Esta ficha ha sido realizada en el marco del proyecto Life + AGRICARBON: Agricultura sostenible
en la aritmética del carbono (LIFE08/ENV/E/000129)

Depósito Legal: CO-864-2012

ISBN: 978-84-695-6406-6

PRÓLOGO

Actualmente desde ningún estamento científico o político se pone en entredicho la existencia de una alteración grave del clima terrestre cuyas inciertas consecuencias podrán ocasionar graves daños medioambientales y socio-económicos en la mayor parte de las regiones del planeta. Así, desde el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) se concluye que el aumento de las temperaturas, con más de un 90% de certeza, es el resultado del importante incremento de gases de efecto invernadero originado por la actividad humana, producido principalmente desde mediados del siglo pasado hasta nuestros días (IPCC, 2007).

La agricultura es una actividad con gran relevancia dentro de los factores que intervienen en el cambio climático, ya que el suelo es la mayor reserva de carbono existente. Acumula alrededor de 2500 Gt, esta reserva es dos veces superior a la de la atmósfera y 2,8 veces a la de la masa biótica (Lal, 2004), de ahí la importancia de un correcto manejo de mismo de cara a favorecer la captura de este elemento, convirtiéndolo en un sumidero, y no su emisión a la atmósfera en forma de CO₂ como ocurre en los suelos labrados.

Pero la agricultura no sólo se presenta como una solución al problema, sino que también es parte del mismo, pues alrededor del 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero provienen de la actividad agrícola (Kassan et al., 2012). El origen de estos gases depende del tipo de cultivo, aunque en la mayoría de las ocasiones provienen de la utilización de fertilizantes nitrogenados, fitosanitarios y del consumo de combustible (Gil et al., 2012).

Ante este escenario, optimizar el uso de estos insumos agrícolas se presenta como una necesidad de primer orden. Desde el sector agrícola existen técnicas que mediante la implantación de las nuevas tecnologías al agro permiten obtener estos resultados perseguidos. Así, la Agricultura de Precisión, que mediante la adaptación de sistemas informáticos y electrónicos al ámbito agrario permite un uso más eficiente de los insumos agrarios, como se tratará en esta ficha técnica, reduce el consumo de combustible, abono y productos fitosanitarios, ayudando no sólo a mitigar el cambio climático, sino también a luchar contra otros graves problemas medioambientales como la contaminación de aguas superficiales.

Jesus A. Gil Ribes

Responsable UCO Proyecto Life+ AGRICARBON.

Catedrático de la Universidad de Córdoba.

Responsable del Grupo de Investigación AGR-126 Mecanización y Tecnología Rural

¿QUÉ ES LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN?

La Agricultura de Precisión es un compendio de técnicas que permiten optimizar el uso de insumos, las labores realizadas al cultivo y la producción final, reduciendo los costes de producción y el impacto sobre el medio ambiente. Se configura como un conjunto de herramientas que permiten realizar cada una de las tareas que componen la actividad agrícola con el mayor nivel de homogeneidad y eficiencia. Estas herramientas están basadas generalmente en las nuevas tecnologías y su aplicación abarca desde la toma minuciosa de datos del cultivo, hasta la ejecución de las operaciones mecanizadas mediante maquinaria agrícola.



Aunque cualquier parte del ciclo productivo agrícola de todos los cultivos es susceptible de ser realizado ayudándose de técnicas de Agricultura de Precisión, no es necesario aplicarlas abarcando todo él. Pueden orientarse exclusivamente a una parte como: la fertilización, la realización de labores, al riego, o al calendario y zonificación de la cosecha como ocurre en la vendimia para vinos de calidad.

Todas estas herramientas van encaminadas a una reducción bien: de los tiempos operacionales, los solapes en las distintas labores, el uso de insumos, etc. Repercutiendo directamente en el agricultor, que ve aumentada la rentabilidad económica de su explotación, e indirectamente al medioambiente y a la sociedad en general, que ven reducida de manera importante la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo energético fruto de la optimización de la producción agrícola, entre otros beneficios medioambientales.

NUEVAS TECNOLOGÍAS AGRÍCOLAS. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La agricultura, al igual que la gran mayoría de sectores productivos, es una actividad que evoluciona continuamente con la aparición de nuevas tecnologías. Si bien es cierto, quizás en el sector agrícola la adopción de las mismas no es tan rápida como en otros, como el industrial, y muchos de los avances surgen generalmente en distintos ámbitos y son adaptados para su uso agrícola. Así por ejemplo, el desarrollo de los sistemas de posicionamiento global (GPS), base principal de la Agricultura de Precisión, son el resultado de un desarrollo militar que después fue adaptado a diversos sectores.

Por tanto, la Agricultura de Precisión supone el desembarco de las nuevas tecnologías en las tareas agrícolas, y no sólo como podría pensarse en un principio, limitándose a los aspectos de la gestión de la contabilidad, subvenciones, impuestos, etc., sino también en el día a día de los trabajos a pie de parcela, en el control de la maquinaria, de los riegos o permitiéndonos el acceso a información anteriormente difícil de conseguir, sobre todo aportando al agricultor herramientas para tomar decisiones en cuanto a la forma de abonar, aplicar herbicida, sembrar, etc.

Los elementos claves que han posibilitado el desarrollo la Agricultura de Precisión son: la informática, los sistemas de control electrónico y muy especialmente los GPS. Estos últimos nos permiten identificar de manera precisa la posición de la maquinaria o georreferenciar cualquier



punto de evaluación de diversos parámetros: propiedades físico-químicas del suelo, malas hierbas, productividad, etc.

El Sistema de Posicionamiento Global comenzó en Estados Unidos en los años 70 como un sistema de posicionamiento mediante satélite para uso militar que desarrolló el Departamento de Defensa. Esta señal debido a su uso militar, se encontraba degradada, conociéndose esta degradación como Disponibilidad Selectiva (S.A.), que proporcionaba errores de +/- 100 m. Pero el interés de este sistema para infinidad de sectores productivos de la vida civil hizo que se deshabilitara la S.A. en el año 2002.

Estos sistemas se posicionan utilizando la constelación de satélites que orbitan alrededor de la tierra, ver figura 1, calculando así su latitud, longitud y altura. Aunque en vehículos que se encuentren en movimiento también se conoce su velocidad. El método de funcionamiento es el siguiente: los receptores GPS calculan la distancia a la que se encuentran de cada uno de los satélites disponibles en el horizonte en ese momento, ese cálculo se realiza a partir del retraso con que reciben las señales respecto al momento en que fueron emitidas.



Figura 1. Constelación de satélites orbitando alrededor de la tierra

Un ejemplo práctico: Supongamos que un satélite se encuentra a una distancia de 22.000 km de la superficie terrestre. Por tanto, la maquinaria que se encuentre trabajando en la superficie de la tierra estará sobre un punto de la esfera imaginaria, de radio 22.000 km, que tiene como centro el satélite. Como los satélites recorren órbitas estables y predecibles, la situación del satélite y de la esfera es conocida en cada instante. Para la

situación exacta de un punto serán necesarios 3 esferas imaginarias creadas por 3 satélites. Dos esferas se cortan en una circunferencia, pero 3 lo hacen en dos puntos, ver figura 2. Sin embargo uno de ellos será absurdo, ya que estaría situado a miles de kilómetros de la superficie terrestre en el espacio exterior. En la práctica debido a las imperfecciones de los circuitos temporizadores de los receptores, el número mínimo de satélites para obtener una señal correcta es de 4, aunque por norma general los aparatos trabajan con un número mínimo de 6 y normalmente con 10 u 11 satélites a la vez.

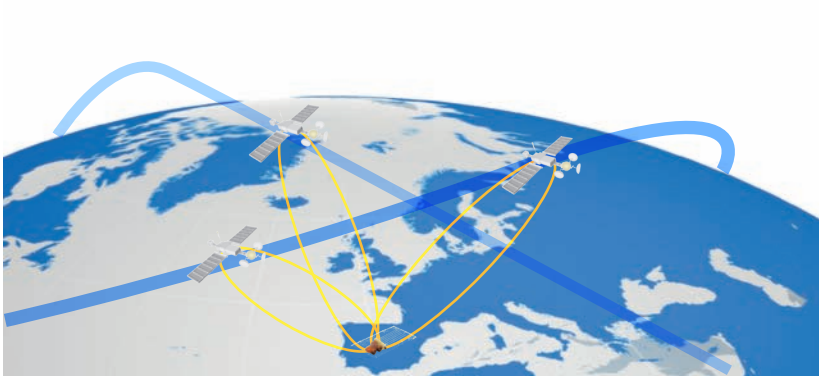


Figura 2. Triangulación para conocer las coordenadas de un punto terrestre

Para mejorar la precisión de esta señal GPS, se recurre al Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS), que se basa en que todos los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual a todos los receptores próximos entre sí. Supongamos que un receptor conoce con exactitud su posición, por lo que cuando estime su posición calculada por la señal GPS será capaz de calcular el error con la que está siendo emitida. Por tanto, si este error se transmite a los receptores próximos a él, estos podrán corregirlo de manera instantánea, ver figura 3.

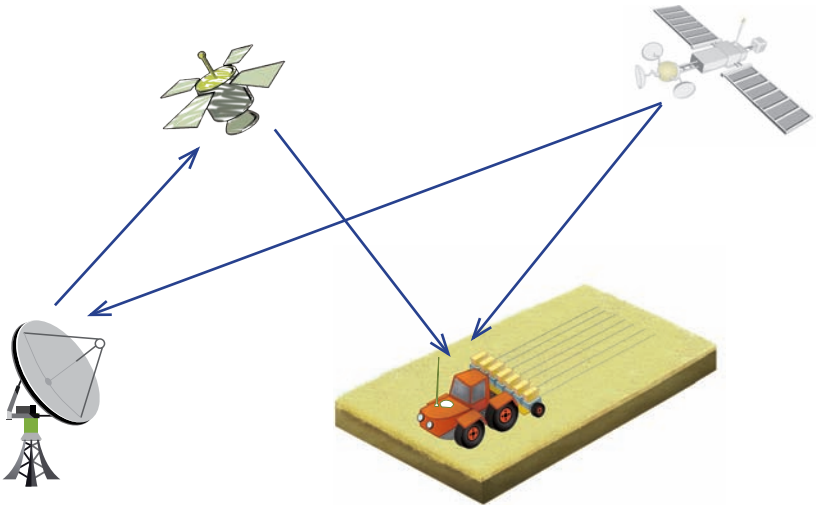


Figura 3. Tractor usando correcciones DGPS con un satélite geoestacionario

Actualmente existen diversas formas de corregir estas señales GPS, entre ellas las más comunes son:

CORRECTORES DIFERENCIALES CON RECEPTORES MONOFRECUENCIA

Las señales para este tipo de correcciones pueden ser gratuitas aunque suelen ser de pago, si bien es cierto que no son de demasiada precisión. Las dos más utilizadas normalmente son EGNOS, de la Agencia Espacial Europea, y OMNISTAR, a nivel mundial. En ambos casos los datos de corrección son adquiridos de varios receptores fijos distribuidos principalmente por Europa para el caso de EGNOS, ver figura 4, o por todo el mundo para el caso de OMNISTAR, ver figura 5. Estas ubicaciones pueden estar relativamente distantes del lugar del receptor móvil, dando una calidad submétrica.

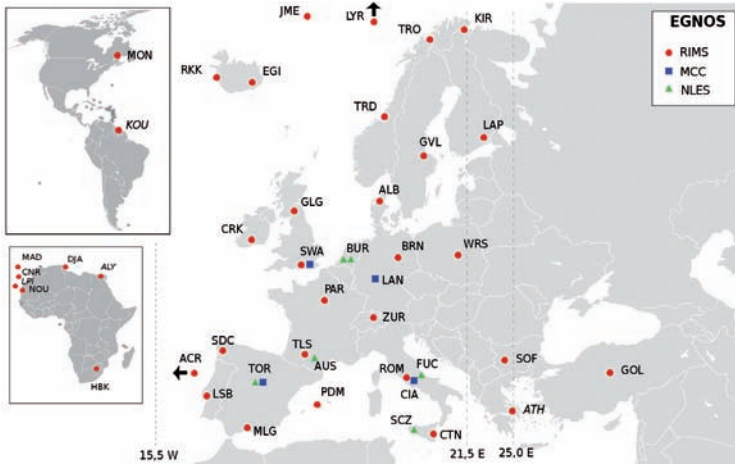


Figura 4. Red de estaciones base para EGNOS



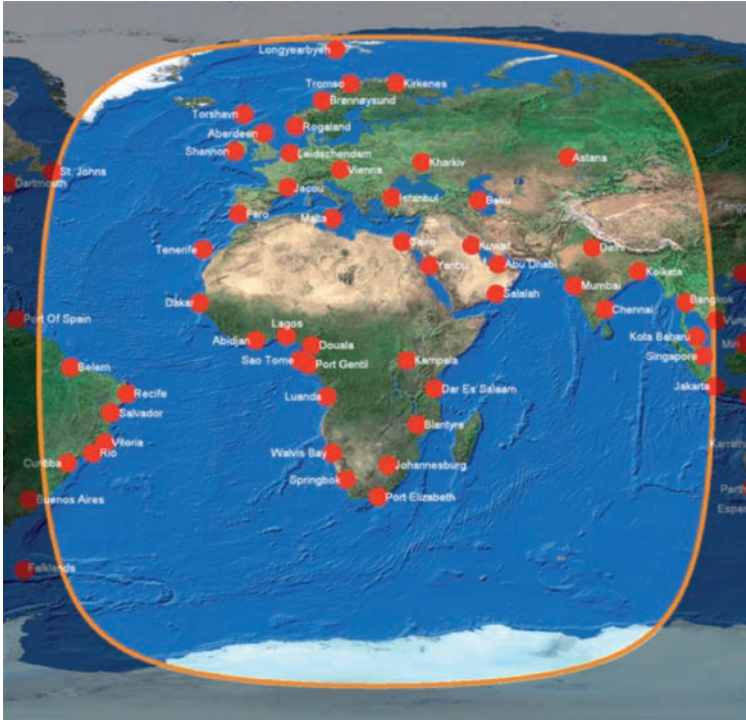


Figura 5. Red de estaciones base para OMNISTAR

Una posibilidad poco utilizada en Europa, aunque si más desarrollada en Estados Unidos, es utilizar las señales gratuitas emitidas por la red de radiofaros, que son bastante fiables y precisas.



CORRECCIONES DIFERENCIALES CON RECEPTORES BIFRECUENCIA

El empleo de dos frecuencias distintas se debe a que la atmósfera proporciona un cierto retardo en la propagación de las ondas, siendo este retraso función de la frecuencia. Al utilizar dos distintas se puede conocer ese desfase y compensarlo. Con este tipo de receptores se llega a una precisión aproximada de 25 cm y la señal más utilizada es OMNISTAR HP, de pago.


CORRECCIONES DIFERENCIALES CON RTK

Esta opción implica la adquisición de un segundo receptor para ser utilizado en un punto base, además de un enlace para transmitir los datos de corrección al receptor móvil (ver figura 6). Aunque esta tecnología actualmente está siendo sustituida por señales vía internet que son enviadas al receptor móvil mediante GPRS. Probablemente el mayor inconveniente que pueda encontrar el agricultor es su elevado desembolso inicial. Además, dependiendo de la orografía del terreno y de la calidad de la señal recibida, la cobertura puede ser un problema. No se deben utilizar estos equipos a más de 10 km de distancia de la fuente emisora de correcciones, ya que a partir de esa distancia, la señal se degrada.



Figura 6. Estacion base para correcciones RTK





Por tanto, una de las preguntas más frecuentes del agricultor o cualquier usuario de esta tecnología es la de *¿Cuál señal es la que debo usar?* Las alternativas son varias en función de los distintos sistemas de guiado que utilicemos o la finalidad de los mismos. Con sistemas de barras de ayuda al guiado para tratamientos herbicidas y abonados, que más adelante se explicarán detenidamente podemos usar correcciones monofrecuencia. Para guiados automáticos utilizados con tratamientos herbicidas y abonados podríamos recurrir a señales bifrecuencia ya que esa calidad de señal sería más que suficiente. Sin embargo para guiados automáticos utilizados en operaciones de siembra o plantación deberíamos recurrir a correcciones RTK.

CICLO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

El resultado final de un cultivo, en cuanto a beneficio obtenido, depende en parte de las decisiones de manejo adoptadas, a lo largo del ciclo de éste, de cómo se han llevado a cabo éstas, y diversos factores externos al agricultor, muy especialmente las condiciones meteorológicas de la campaña agrícola. Las decisiones a tomar comienzan con el sistema de manejo de suelo a realizar, agricultura de conservación o laboreo convencional, y dentro de este: labores profundas o someras. Sigue con la dosis del abonado de fondo, herbicidas, siembra, abonado de cobertera, riegos, etc.

Históricamente los agricultores han basado la toma de decisiones en una serie de conocimientos empíricos o normas de prácticas habituales de la zona, que en muchas ocasiones proporcionan un buen comportamiento local, pero no tienen ningún soporte técnico. Sin embargo, las decisiones en Agricultura de Precisión se basan en estudios de los diversos factores relacionados con la producción. Así por ejemplo, se realizan mapas de diversas propiedades físico-químicas del suelo (compactación, humedad, nutrientes, materia orgánica, etc., ver figura 7), para después contrastarlos con los mapas de producción obtenidos mediante monitores de rendimiento instalados en las cosechadoras.

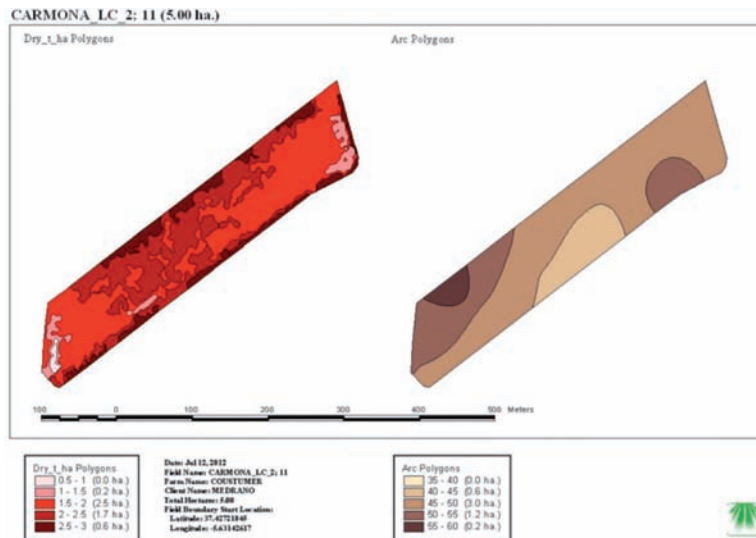


Figura 7. Mapa de rendimiento de un cultivo de habas y mapa de contenido en arcilla de esa parcela

ADQUISICION DE DATOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La Agricultura de Precisión presta una serie de herramientas al agricultor para facilitarle la toma de decisiones, basándose ésta en la generación de información derivada de diversos indicadores de los cultivos. Las formas de muestrear estos indicadores y procesar la información es diversa y se detalla a continuación:

MAPEOS DE SUELO

El suelo es la base sobre la que se implanta el cultivo y uno de los parámetros más influyentes en la producción, junto con la climatología. No sólo es interesante conocer sus propiedades físicas (compactación, textura, distribución de humedad, etc.), por su capacidad como factor limitante en la cosecha, sino que también es conveniente estudiar las químicas (materia orgánica, nitrógeno, fósforo, capacidad de intercambio catiónico, etc.) como factor importante en la prescripción por ejemplo, de dosis de abonado.

La forma de testear el suelo es diversa, pudiendo recurrir a muestreos manuales mediante el uso de barrenas, figura 8, muy útil cuando la superficie a caracterizar es pequeña. Cuando el tamaño de la parcela es mayor se pueden utilizar quads automatizados específicos para muestrear suelo, figura 9. La manera de trabajar es sencilla, se debe dividir el campo a muestrear en una malla imaginaria, normalmente cuadrada, aunque puede ser rectangular, en función de la forma de la parcela, en la que se toman los muestreos en el centro de esta superficie. El tamaño de estas divisiones varía en función del tamaño de la besana. Para

campos pequeños <10 ha podríamos muestrear mallas de unos 0,5 ha. Para superficies mayores deberíamos realizar retículas entre 1 y 2 ha. La forma de hacer estas particiones es diversa, aunque son de gran utilidad el uso de pocket pcs o diversos dispositivos móviles a los que se les pueden instalar programas específicos como el EZ Maps, ver figura 10.



Figura 8. Muestras simultáneas con barrena para caracterizar una parcela experimental



Figura 9. Quad preparado para muestrear suelo



Figura 10. Pocket pc con programa EZ Maps para toma de muestreos en campo.

Cuando las superficies son aún mayores, o se quiere muestrear todo el terreno de forma continua, se puede recurrir a dispositivos móviles que mediante campos electromagnéticos son capaces de muestrear distintas propiedades del suelo, humedad, textura, etc. Uno de estos instrumentos diseñado especialmente para estudios en agricultura es el EM38. Puede cubrir grandes áreas rápidamente sin electrodos en el terreno. Provee profundidades de penetración de 0.75 m y 1.5 m en los modos de dipolo vertical y horizontal respectivamente. Las mediciones normalmente se hacen poniendo el instrumento sobre el suelo y leyendo el indicador, aunque se puede adaptar a una caja y ser propulsado por un quad, figura 11. Se pueden realizar mediciones continuas o discretas, en este modo de operación se pueden tomar fácilmente 3000 lecturas por hora.

MAPAS DE COSECHA

Posiblemente la variable más importante a estudiar sea la variabilidad espacial de la producción. Para ello, se realizan mapas de cosecha con la ayuda de cosechadoras dotadas con monitor de rendimiento. Estas son capaces de medir la cantidad de producto que están cosechando instantáneamente, conocer las coordenadas geográficas donde se encuentran y guardar esta información punto a punto de la parcela para posteriormente generar mapas de variabilidad de la cosecha mediante variaciones colorimétricas que indican los diferentes rendimientos obtenidos y su superficie asociada, ver figura 12.



Figura 11 Sonda EM38 arrastrada por quad.

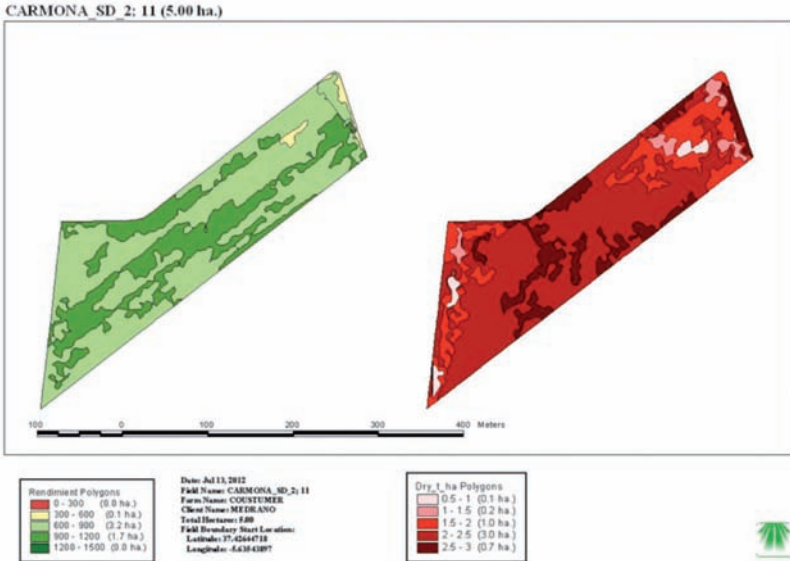


Figura 12. Mapa de cosecha de una parcela cultivada en siembra directa (SD) con cultivo de girasol en la campaña 2009-10, izquierda, y habas en la 2010-11, derecha.

El principio de funcionamiento de estos instrumentos varía en función del modelo utilizado, aunque por norma general tienen un sistema que mide el grano que va pasando en cada momento y la humedad del mismo. Bien mediante pesada, conociendo el volumen que fluye, etc., ver figura 13. Además tienen una consola en la cabina que muestra diversos parámetros: rendimiento instantáneo, rendimiento medio, humedad, superficie trabajada, etc., ver figura 14.

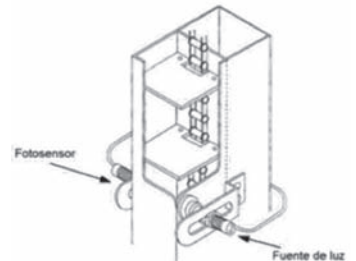


Figura 13. Sistema de medida de rendimiento mediante fotosensores que miden el volumen de grano que pasa instantáneamente.

Al igual que ocurre con los mapas de la variabilidad de las propiedades físico-químicas del suelo, los muestreos puntuales georreferenciados se transforman en mapa de la variable indicada mediante el empleo de técnicas y programas de geoestadística, en muchas ocasiones específicos para agricultura.



Figura 14. Consola de monitor de rendimiento Ceres.

MAPEOS DE CULTIVO

Además de los mapas de suelo y de cosecha se puede generar más información complementaria, muchas veces igual o más valiosa que la obtenida por los dos primeros. Normalmente para obtenerla se utilizan sensores remotos, que nos proporcionan diversa información con la que podemos conocer desde posibles infestaciones de malas hierbas, el estado nutritivo del cultivo, etc.

Estos sensores remotos son dispositivos capaces de obtener imágenes a distancia mostrando detalles no perceptibles por el ojo humano, ya que son sensibles a la luz reflejada por los cultivos en longitudes de onda más allá del visible.

Normalmente estos sensores remotos están dotados de cámaras que toman fotografías a diversas longitudes de onda, siendo muy utilizadas el infrarrojo cercano y el visible, obteniendo diversos índices colorimétricos como por ejemplo el conocido con el anglicismo "NDVI" (Índice de vegetación de diferencia normalizada). Éstos pueden estar montados en satélites obteniendo imágenes a gran escala, en aeronaves tripuladas o a control remoto, ver figura 15, muy útiles para trabajar a escala de parcela. Por último, incluso existen diversos dispositivos montados en el tractor que van obteniendo instantáneamente estos índices permitiendo variar por ejemplo, la dosis de abono a aplicar. Un ejemplo comercial es el Greenseeker para diversas aplicaciones variables de abono, ver figura 16.





Figura 15. Avión con cámara incorporanda volando sobre parcela de muestreo



Figura 16. Sistema de montaje de greenseeker en barra de aplicación variable de abono líquido

El análisis de la información suministrada por estos sensores permite la localización temprana de zonas de cultivo sometidas a algún tipo de estrés: carencia de nutrientes, malas hierbas, plagas, falta o exceso de humedad, etc., permitiendo una solución rápida antes de que dicha problemática pueda afectar gravemente a la producción de los cultivos.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El resultado de todos los métodos o sistemas de adquisición de datos descritos anteriormente es una gran cantidad de información referida a puntos o zonas concretas de las parcelas. Toda este conocimiento sobre diversas propiedades físicas- químicas o productivas de nuestras explotaciones o cultivos contiene información valiosa para la toma de decisiones cara a futuras campañas. Sin embargo, es necesario recurrir a programas informáticos, ya que el gran volumen de datos a trabajar imposibilita el tratamiento manual de los mismos.

En el mercado existen diversos programas enfocados para el tratamiento de datos agrícolas georreferenciados que se conocen con el nombre de “Sistemas de Información Geográfica para Agricultura” (AgGIS), algunos programas comerciales muy utilizados específicos para la agricultura son el SSToolbox o el Farm Works.

Estos programas nos permiten hacer un estudio estadístico de toda la información almacena, cruzando los datos de tal manera que conseguimos conocer los orígenes de la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos.

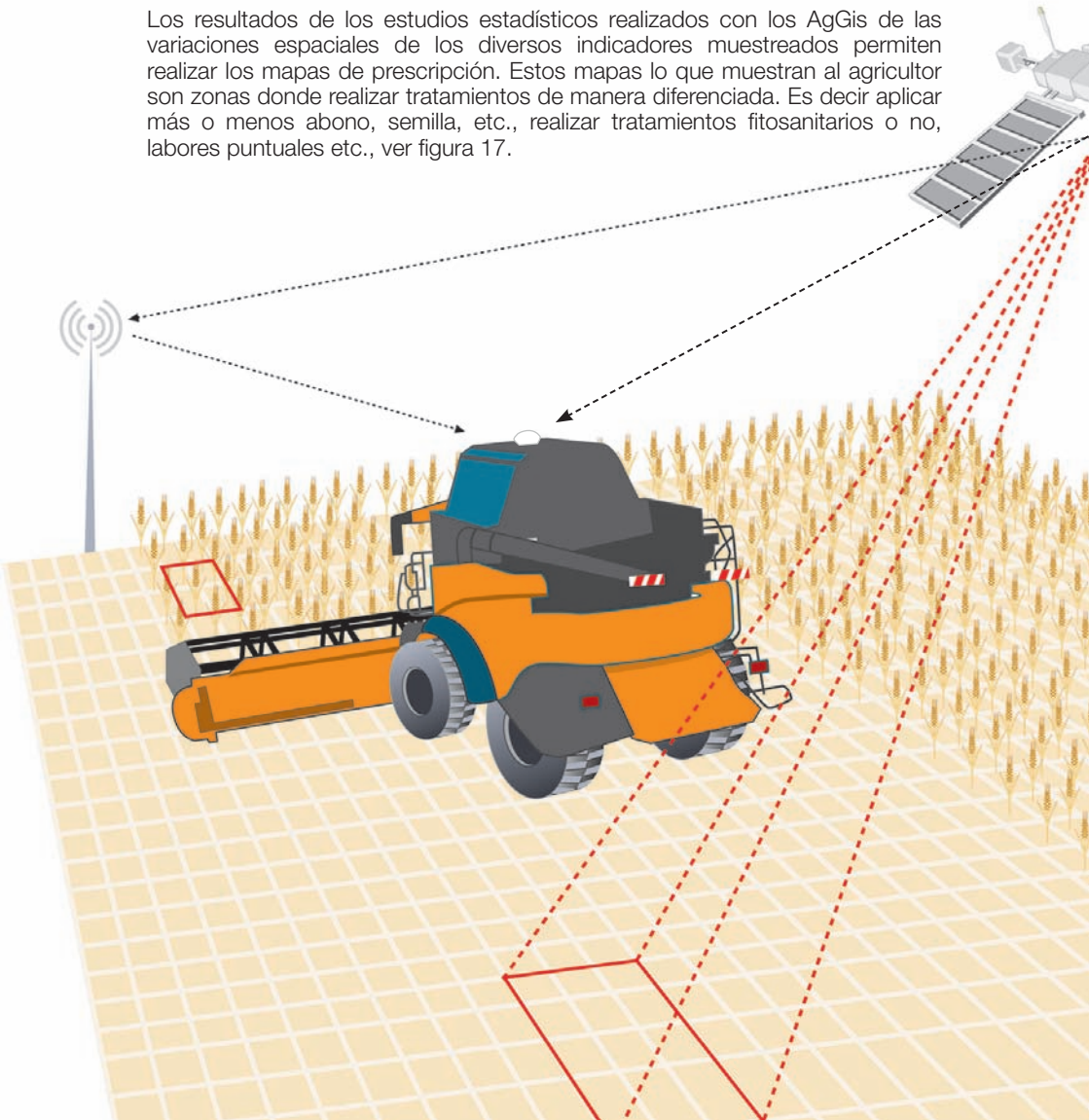
A modo de ejemplo, imaginemos que tenemos datos de la textura del suelo de nuestra parcela, de cantidad de nitrógeno, compactación y la variabilidad de las producciones durante 5 campañas. El modo de actuar con estos programas sería: primero realizar con los datos obtenidos los mapas de los diversos indicadores estudiados, segundo cruzar la información de la variabilidad productiva de las 5 campañas buscando un patrón en la producción de la parcela, es decir ver cuales zonas estadísticamente siempre producen más que y cuales menos. Una vez obtenemos el patrón de la variabilidad espacial del rendimiento debemos conocer cuáles son las principales causas de ésta, por lo que debemos cruzar los datos obtenidos con los mapas de las propiedades físico-químicas del suelo citados anteriormente.

Normalmente en aquellos suelos muy homogéneos texturalmente, las variabilidad espacial del rendimiento vendrá marcada por las características topográficas de la parcelas, zonas bajas con riesgo de inundación, o por variaciones en la distribución de nutrientes del suelo. Sin embargo, en parcelas muy heterogéneas con diferencias texturales importantes, o por ejemplo alternancia de lomas con zonas bajas más ricas, éstas características serán las preponderantes en la variación espacial del rendimiento, ya que ocasionarán cambios en la compactación del terreno, su humedad y su contenido nutricional.

Especial atención requiere la compactación producida por el paso reiterado de maquinaria agrícola, que también influye de manera negativa en la producción de los cultivos. En el caso de aparecer ésta, además de tenerlo en cuenta a la hora de estudiar los mapas, se han de tomar medidas para combatirla, como el uso de neumáticos de alta flotación o el tráfico controlado mediante sistemas de guiado.

TOMA DE DECISIONES

Los resultados de los estudios estadísticos realizados con los AgGis de las variaciones espaciales de los diversos indicadores muestreados permiten realizar los mapas de prescripción. Estos mapas lo que muestran al agricultor son zonas donde realizar tratamientos de manera diferenciada. Es decir aplicar más o menos abono, semilla, etc., realizar tratamientos fitosanitarios o no, labores puntuales etc., ver figura 17.



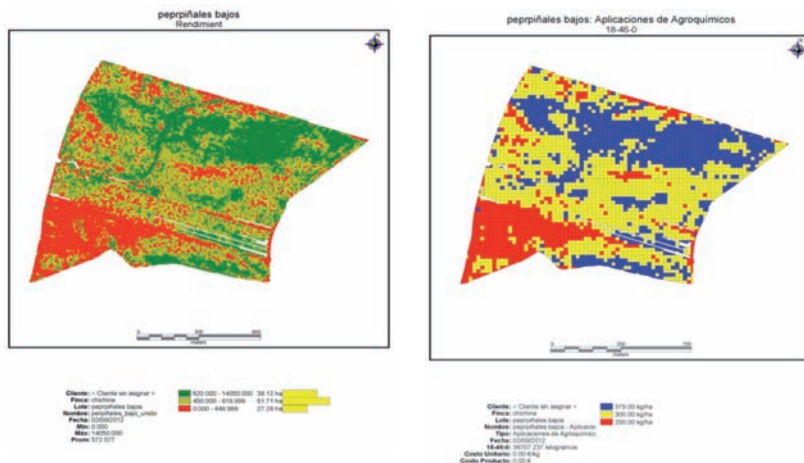


Figura 17 Mapa de prescripción de abonado variable, izquierda, realizado en función de la producción de la parcela, derecha.

En la actualidad estos mapas se utilizan preferentemente para realizar abonados variables en función de la producción obtenida y de las diversas características físico-químicas del terreno, como se ha comentado anteriormente. Sin embargo, uno de los mayores cuellos de botella que se encuentran los agricultores o los técnicos a la hora de aplicar estas técnicas es que no existen modelos fiables del comportamiento de los cultivos frente a diversos insumos. Es decir, la respuesta del cultivo, por ejemplo, a la aplicación de abono es muy variable y depende de gran cantidad de factores globales: tipo de abono, variedad de semilla, climatología de la zona, etc., y también de carácter local, meteorología del año agrícola, tipo y fertilidad del suelo, actividad enzimática del mismo, etc., por lo que no existen reglas generales que permitan conocer de forma certera la respuesta del cultivo a esa aplicación de fertilizante.

Debido a la problemática asociada a la incertidumbre generada por la gran cantidad de factores que intervienen en los procesos agronómicos, se está desarrollando diversa tecnología que ayude a corregir y validar estos mapas de prescripción en campo a tiempo real mientras se realiza la operación o de manera anterior a la misma. Normalmente se recurre a sensores hiperespectrales (cámaras) que miden diversas longitudes de onda, siendo muy habituales las que toman el infrarrojo cercano “NIR” y el visible, y calculan índices colorimétricos. Por ejemplo para el caso de las aplicaciones de abono se utilizan sensores que calculan el NDVI del cultivo y lo correlacionan con el estado nutritivo de la planta, corrigiendo a la baja o al alza la aplicación del mapa de prescripción en función del color que tenga en esa zona el cultivo, figura 18.



Figura 18. Sistema de aplicación de abono líquido variable autocorregido con sensor hiperespectral "Greenseeker" que calcula el índice de verdor del cultivo (NDVI)

APLICACIONES CON DOSIS VARIABLE

La aplicación con dosis variable requiere dotar a las diversas máquinas de una tecnología específica que logre variar la cantidad de producto a aplicar en función de la señal que esté recibiendo en cada momento. Para ello existe distinta tecnología que varía en función del tipo de máquina o labor a realizar.

Dentro de las operaciones más comunes en las que se realiza distribución variable se encuentran la siembra, la aplicación de abono y de herbicida. Aunque la primera está menos desarrollada que las dos últimas.

Para la distribución variable de semillas se suelen utilizar mecanismos que actúan en la distribución de semilla, bien variando su apertura, aumentando o



Figura 19. Sembradora adaptada a la distribución variable de semilla

disminuyendo su caudal, más utilizado en sembradoras de chorrillo, figura 19, o su velocidad de giro, más común en las de precisión que varía la velocidad de giro de los platos que distribuyen las semillas.

ABONADORAS DE DOSIS VARIABLE

Existen diversos métodos para aplicar abono de forma variable, aunque primeramente se ha de atender a la forma en la que se presenta el abono. En el caso de ser fertilizante líquido la solución es mucho más sencilla, ya que con la mera instalación de un caudalímetro que mida instantáneamente la cantidad de líquido que está pasando se podría solucionar el problema, figura 20, variando la dosis a aplicar en función de los requerimientos del mapa de prescripción o de los sensores multiespectrales.

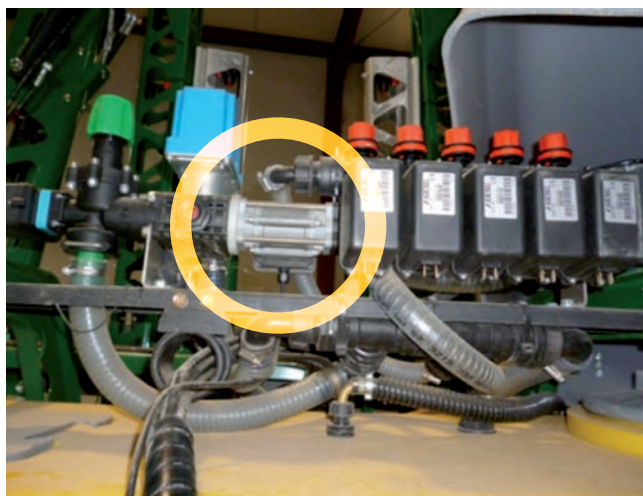


Figura 20. Caudalímetro aforador instalado en una barra de aplicación preparada para la dosificación variable de abono líquido

En el caso del abono sólido, bien granulado o en polvo, la dosificación se complica, debido a la dificultad de medir la masa de abono por unidad de tiempo que se está aplicando. Lo primero que se ha de conocer es el caudal másico que fluye por la abonadora en función de la superficie de apertura del distribuidor. Éste variará en función del tipo de abono y de abonadora, ver figura 21.



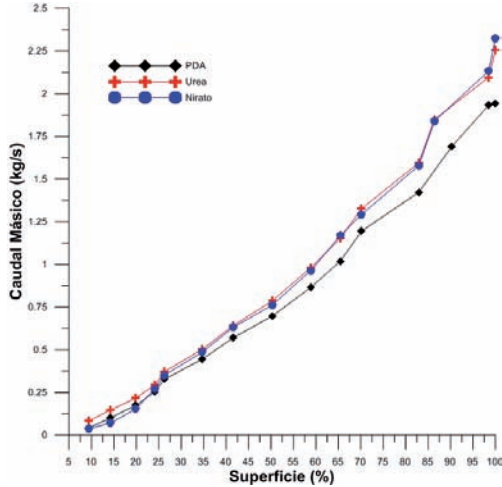


Figura 21. Caudal máscico en función de de la superficie de apertura de los tres principales abonos utilizados en el cultivo de cereal: Fosfato diamónico "PDA", Urea y Nitrato amónico "Nitrato"

Además estas máquinas han de tener algún tipo de sistema que permita abrir y cerrar las trampillas de caída del abono en función de la dosis a aplicar. Se suele disponer un actuador, por lo general eléctrico, en cada trampilla que la abre o cierra en función de las necesidades de abono, ver figura 22.



Figura 22. Actuadores eléctricos para la apertura y cierre automáticos de las trampillas de caída de abono



Figura 23. Célula de carga instalada en abonadora.

Debido a que por lo general la granulometría de los abonos es muy variable y depende mucho de la partida adquirida, se ha de instalar algún tipo de sistema que testea la cantidad de fertilizante que se está realmente aplicando. Un buen sistema, puede ser la instalación de células de carga que cada cierto tiempo calcule el peso de la abonadora y recalculen realmente la dosis que está aplicando la misma, ver figura 23.

Cabe reseñar que todos estos sistemas son automáticos y están gobernados por diverso hardware colocados en la cabina del tractor, no necesitando la actuación del tractorista, salvo para cargar el mapa de prescripción.

SISTEMAS DE APLICACIÓN DE HERBICIDA

Para los sistemas variables de aplicación de herbicida existe diversa tecnología comercial que permite llevar a cabo estas técnicas in situ en el momento de realizar la operación. También se están realizando estudios, como por ejemplo fotografiar con vuelos aéreos la zona e identificar las malas hierbas mediante análisis de imágenes, aunque esta tecnología no está disponible de manera comercial.



Figura 24. Sensores multiespectrales "Weed-seeker" acoplado en barra de tratamientos

Los sistemas acoplados a las barras de tratamiento son los más comunes, ver figura 24, aunque por su elevado coste no han sido muy adoptadas en nuestras condiciones. Sin embargo, en otros países como Estados Unidos son mucho más habituales. Son sensores multiespectrales que se usan en aplicaciones de presiembra o entrelíneas de cultivo y que detectan la actividad fotosintética y abren o cierran las boquillas de aplicación.

Al igual que sucedía con el abonado variable estos sistemas no requieren la participación del tractorista salvo para decidir la dosis de producto a aplicar.

Como complemento a estos sistemas se han de dotar a los tractores de **sistemas de guiado** que facilitan la conducción, ya que las operaciones agrícolas plantean cuatro grandes inconvenientes desde el punto de vista del operario:

1. Agotamiento del conductor sometido a una tarea rutinaria como es la conducción monótona y la supervisión de la labor realizada
2. Necesidad de visualizar marcas de referencia que permitan seguir la trayectoria deseada
3. Imposibilidad de trabajar en condiciones de poca luz, niebla, polvo, etc.
4. Los errores cometidos son acumulativos y repercutirán sobre el pase siguiente que también va a resultar desviado

Los sistemas de guiado surgen con el objeto de resolver estos inconvenientes, presentando entre otras las siguientes ventajas:

Beneficios

Conductor	Reducción de la fatiga
	Mayor atención al desarrollo de la labor
	No se necesita una gran experiencia
Económicos	Mayor rendimiento de campo al aumentar la velocidad y reducir los tiempos muertos
	Posibilidad de trabajar de noche o en condiciones de poca luz
	Reducción de costes fijos del tractor al aumentar el número de horas trabajadas al año
	Eliminación de solapes y huecos entre pasadas (menor gasto en agroquímicos)
Ambientales	Menor compactación, al poder realizar tráfico controlado
	Menor uso de agroquímicos

Como inconveniente cabe reseñar la mayor necesidad de formación del personal, aunque por lo general son equipos bastante intuitivos y además un desembolso inicial elevado, aunque esta tecnología está en continua evolución y cada vez a precios más asequibles.

La forma de trabajo de los sistemas de guiado no es más que una imitación del procedimiento normal que un conductor lleva a cabo; en cada momento compara su situación y trayectoria con las que debería tener y que previamente fueron establecidas mediante unas marcas de referencia, corrigiendo en uno u otro sentido en caso de que la divergencia supere un umbral. Lo que ocurre es que en el caso de los sistemas de guiado estas correcciones son aportadas por los sistemas de posicionamiento global.

Existen dos alternativas en función de los requerimientos del agricultor:

1. **Sistemas de ayuda al guiado.** También se conocen con el nombre de barra de luces, y consisten en una pantalla que mediante un código de colores nos va indicando si llevamos el rumbo adecuado, normalmente color verde, o si nos estamos separando de la trayectoria de amarillo a rojo en función

de la desviación, ver figura 25. En esta alternativa las desviaciones han de ser corregidas por el tractorista, por lo que a pesar de que se disminuyen los solapes aún siguen existiendo errores de carácter humano.



Figura 25. Sistema de ayuda al guiado mediante barra de luces, arriba, y monitor de rendimiento, abajo, montado en cosechadora

2. Sistemas de guiado automático.

Estos sistemas son más caros que los anteriores pero más precisos ya que actúan directamente corrigiendo la trayectoria del tractor sin necesidad de interacción con el operario. Existen dos alternativas: sistemas móviles que permiten instalarlos en diversos equipos y que actúan sobre el volante, ver figura 26, o sistemas fijos, “autopilot”, que actúan directamente sobre el sistema de dirección de la máquina, por lo general en el sistema hidráulico de la dirección.

La elección de estos sistemas viene condicionada normalmente por las características de los trabajos a realizar. Así por ejemplo, en operaciones con mucho ancho de trabajo como los abonados o barras de tratamientos se puede recurrir a la ayuda al guiado, pero en el caso de realizar siembras o plantaciones de árboles es el guiado automático el que nos proporcionará mejores resultados.



Figura 26. Sistema de guiado automático móvil “EZSteer” acoplado al volante del tractor

INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL AHORRO DE ENERGÍA EN LA EXPLOTACIÓN AGRARIA

Los sistemas de Agricultura de Precisión debido a la optimización que aportan en el uso de insumos propician un importante ahorro de energía y por consiguiente, se muestran como un sistema eficaz en la lucha contra el cambio climático.

Estos ahorros se consiguen por diversas vías:

La primera y más directa es el ahorro energético asociado a la reducción en el uso de combustible e insumos que los sistemas de guiado aportan al reducir los solapes. Así por ejemplo, en la tabla 1 se muestran algunos resultados obtenidos dentro del proyecto "Life+AGRICARBON", apreciándose como en las operaciones de laboreo existen unos elevados solapes, especialmente para la grada de discos una de las labores más comunes. Estos se pueden disminuir con los sistemas de guiado como se observa para las operaciones de abonado y barra de tratamientos en las que se han utilizado sistemas de ayuda al guiado y el solape se ha reducido un 42 y 63% respectivamente respecto a las mismas operaciones sin guiado, tabla 1. En el caso de la siembra se recurrió a sistemas de guiado automático ocasionando una reducción del solape del 35%, menor que los anteriores. Pero cabe reseñar que esta situación se debe al bajo

Operación	Consumo de Combustible (l/ha)	Solape
Vertedera	22,5±4,1	16,2±3,7
Chisel	14,1±0,8	16,2±11,6
Semichisel	6,7±3,1	4,7±1,3
Grada de discos	7,7±1,1	35,1±7,8
Cultivador	6,1±1,2	12,5±11,3
Sembradora AP	7,7±1,0	5,5±5,9
Sembradora LC	6,0±1,6	8,4±7,0
Barra de tratamientos AP	1,1±0,3	7,4±7,2
Barra de Tratamientos LC	1,1±0,4	12,7±9,7
Abonadora AP	0,9±0,4	5,5±3,6
Abonadora LC	0,9±0,5	14,7±9,7
Cosechadora AP	11,4±0,9	-
Cosechadora LC	10,0±0,7	-
Empacadora	5,2±0,2	-

Tabla 1. Consumo de combustible y solapes de las labores más comunes en los cultivos de secano. AP "Agricultura de Precisión", LC "Laboreo Convencional"

solape en la siembra convencional ya que esta operación en cualquier sistema de manejo se lleva a cabo con gran cuidado. Sin embargo, en la Agricultura de Precisión el solape fue tan sólo de un 5%, prácticamente despreciable y con una alineación perfecta de la siembra.

También se reducirá la energía utilizada de manera aún más importante al utilizar técnicas de aplicación variable de insumos. Aunque esta disminución dependerá de diversos factores entre ellos el tipo de cultivo. Como se aprecia en la figura 27 la distribución del consumo energético de las diferentes fases productivas varía de manera muy importante en función del cultivo elegido. Así en el trigo en mayor gasto energético se realiza en la aplicación de fertilizante, por lo que será especialmente interesante la aplicación variable de abono.

En los cultivos de girasol y leguminosa el consumo de abono es menor, siendo el mayor gasto energético en la energía directa, consumo de gasoil. Por tanto, es especialmente interesante en estos cultivos utilizar sistemas de guiado que optimicen la realización de las labores y también aplicación variable de agroquímicos, especialmente herbicida, tanto por la reducción energética, como por motivos medioambientales debido al gran potencial contaminante de éstos.

Además las reducciones energéticas obtenidas al aplicar de forma variable el herbicida y el abono dependerán de diversos factores: heterogeneidad de la explotación, distribución de malas hierbas, etc. Así en fincas heterogéneas con

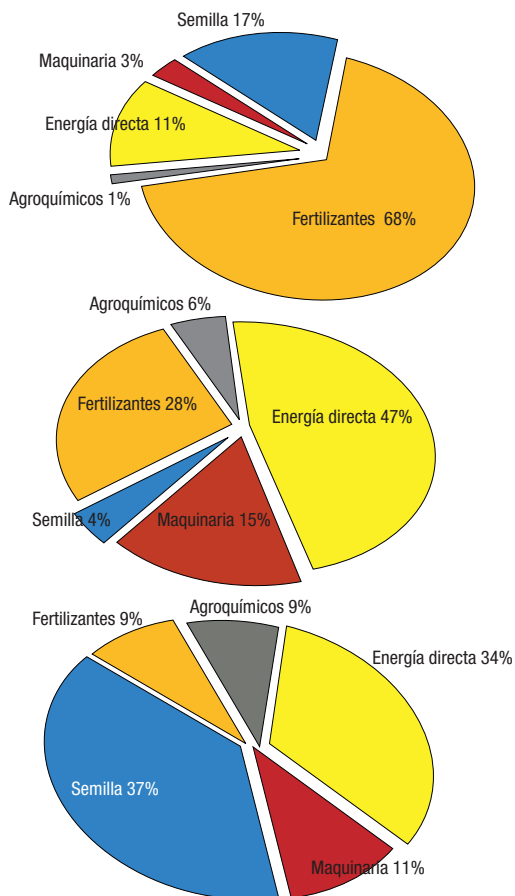


Figura 27. Consumo medio de energía por cultivo y sistema de manejo

grandes variaciones productivas asociadas al tipo de suelo, se podrían conseguir ahorros de abono de hasta un 20-30%. En el caso de los herbicidas las reducciones pueden ser mucho mayores, siendo muy dependientes de la distribución en la aparición de malas hierbas, aunque en muchas ocasiones pueden llegar al 50-60%.

BIBLIOGRAFÍA

Álvaro, J., Cantero, C., López, M.V.; Arrué, J.L. (2010). Fijación de Carbono y reducción de emisiones de CO₂. AC: Aspectos agronómicos y medioambientales. Eumedia (eds.). Spain. 89-96.

Auernhammer H. (2001). Precision farming- the environmental challenge. *Comp. Elect. Agric.* 30:31-43.

Bertocco, M., Basso, B., Sortori, L., Martin, E.C. (2008). Evaluating energy efficiency of site-specific tillage in maize in NE Italy.

Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía. (2011). Estadísticas agrarias 2010. <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/servicios/estadisticas/estadisticas/agrarias/superficies-y-producciones.html> (accessed 15-04-2011)

ESYRCE (2010). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. MAGRAMA. Available at: http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletinWeb2010_tcm7-191027.pdf. (accessed 26-04-2012).

Gil-Ribes, J.A, Agüera, J., Márquez-García, F., González-Sánchez, E.J., Blanco, G., Márquez-García, J. (2012). Remote Monitoring of Operations in Conservation plus Precision Agriculture, Respect Conventional Tillage as a Method to Study the Reduction of Greenhouse Gasses Emission. *Proceedings CIGR-AgEng 2012*. Valencia. Spain.

Green, M.B. (1987). Energy in pesticide manufacture, distribution and use. *Energy in plant nutrition and pest control*. Z.R. Helster (eds.). Netherlands.

Hernanz, J.L., Girón, V.S., Cerisiola, C. (1995). Long-term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. *Soil Till. Res.* 35:183-198.

Hernanz, J.L. (2005). Agricultura de conservación: Una revisión a la rentabilidad energética. Libro de actas del congreso internacional sobre agricultura de conservación. *Asoc. Esp. Agric. Con.* (eds). Spain.173-182.

International Panel on Climate Change (2007). Summary for Policymakers. In: IPCC (Ed.), *Climate Change 2007. The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.

Jat, M.L., Gathala, M.K., Ladha, J.K., Saharawat, Y.S., Jat, A.S., Kumar V., Sharma, S.K., Gupta, R. (2009). Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: water use, productivity, profitability and soil physical properties. *S. Till. Res.* 105:112-121.

Kassan, A., Friedrich, T., Derpsch, R., Lahmar, R., Mrabet, R., Basch, G., González-Sánchez, E.J., Serraj, R. (2012). Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. *Field Crop Res* 132: 7-17.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Sci* 304: 1623-1627.

McKibben, B. (2007). La crisis del carbono. *National Geographic Society*, 21-5: 2-7.

Ministerio de Medio Ambiente. (MMA). (2007). Nota sobre emisiones GEI por comunidades autónomas a partir del inventario español.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (MAGRAMA). (2012). Resumen Avance del Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2011.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivo. Resultados nacionales y autonómicos 2009.

Perea, F., Gil-Ribes, J.A. (2006). Consumo de Gasoil agrícola y tiempos de trabajo de la maquinaria agrícola. *Agricultura de conservación*, 3:23-26.

Safa, M., Samarasinghe, S., Mohssen, M. (2011). A field study of energy consumption in wheat production in Canterbury, New Zealand. *Ener. Conver. And Manag.* 52: 2526-2532

Sánchez-Girón, V., Serrano, A., Suárez, M., Hernánz, J.L., Navarrete, L. (2007). Economics of reduce tillage for cereal and legume production on rainfed farm enterprises of different sizes in semiarid conditions. *S. Till. Res.* 95:149-160

Triplet, G.B., Warren, A. (2008). No-Tillage crop production: A revolution in Agriculture!. *Agron. J.* 100: S-153-S-165.

United States Department of Agriculture. (USDA). (1998). Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff (eds). *Agriculture Handbook*. Washington DC. USA.