

LA REDUCCIÓN DE INSUMOS QUE SE CONSIGUE PODRÍA SUPONER DE LA VIABILIDAD DEL CULTIVO EN ALGUNOS CASOS

Aplicaciones que optimizan el ahorro energético en agricultura de precisión

La demanda de energía en el sector agrícola español ha seguido un ritmo de crecimiento paralelo al de la economía, con sus consecuentes efectos negativos sobre la competitividad (costes) de los productos y sobre el gasto medioambiental (emi-

siones). El nuevo escenario energético obliga al sector a afrontar el desafío que supone el ahorro de energía y la mejora de la eficiencia energética, aspecto que se puede conseguir mediante las técnicas de agricultura de precisión.

Manuel Pérez Ruiz.

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos.
Área de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Sevilla.

Juan Agüera Vega.

Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.

El trabajo humano fue la primera fuente de energía que utilizaron los primeros agricultores, pero a comienzo del siglo XIX fue sustituida por la energía animal provenientes fundamentalmente de caballos, camellos, búfalos e incluso elefantes, suponiendo una primera transformación en la agricultura.

En 1858 la energía mecánica con el desarrollo de la máquina de vapor se convirtió en la principal fuente, pero treinta años más tarde, en 1889, una segunda transformación tuvo lugar, la máquina de vapor dio paso al primer tractor con un motor de combustión interna permitiendo esto un mayor desarrollo de potencia, vehícu-

los más ligeros y un incremento de productividad en el sector agrícola. La llegada de la integración de componentes mecánicos y electrónicos coordinados por una arquitectura de control (mecatrónica) a este sector junto con las técnicas para hacer una agricultura localizada en el espacio y en el tiempo está suponiendo una tercera transformación.

Esta última transformación tiene como objetivo prioritario la reducción de los costes energéticos en las prácticas agrícolas, maximizar los beneficios al empresario agrario y reducir la contaminación medioambiental mejorando la eficiencia de las aplicaciones.

La demanda de energía en el sector agrícola español ha seguido un ritmo de creci-

miento paralelo al de la economía, con sus consecuentes efectos negativos sobre la competitividad (costes) de los productos y sobre el gasto medioambiental (emisiones). El nuevo escenario energético obliga al sector a afrontar el desafío que supone el ahorro de energía y la mejora de la eficiencia energética.

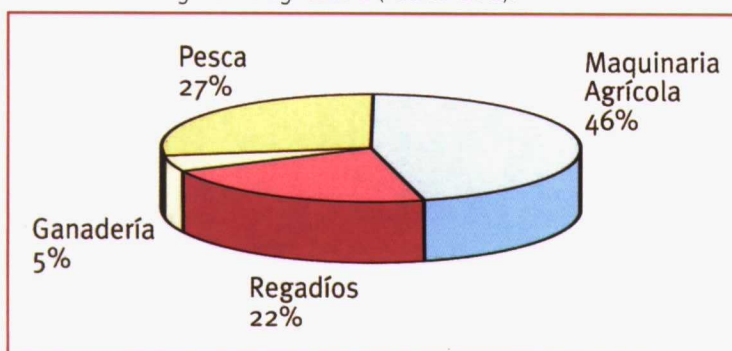
El tractor tal y como se presenta en nuestros días es una máquina muy sofisticada con transmisión hidrostática, servos electrohidráulicos para controlar la fuerza de tiro y la profundidad de trabajo, diseño ergonómico, climatización en la cabina, etc. Todo ello es vital para desempeñar un buen trabajo en campo, pero no se debe olvidar que el consumo de combustible del tractor supone entre el 17 y el

40% de su coste horario total y la maquinaria agrícola supone cerca del 50% del consumo energético del sector, lo que refleja la importancia de la eficiencia energética de ambos aspectos (**figura 1**).

En los últimos años el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) en su misión de fomentar la eficiencia energética y el uso de fuentes de energías renovables y respetuosas con el medio ambiente ha llevado a cabo la rea-

FIGURA 1.

Consumo de energía en la agricultura (Fuente IDAE).



lización de hasta once documentos técnicos, donde se desarrollan algunos métodos de reducción de energía en el sector agrícola:

- Documento nº 1: Consumos Energéticos en las Operaciones Agrícolas en España.
- Documento nº 2: Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío.
- Documento nº 3: Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas.
- Documento nº 4: Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola.
- Documento nº 5: Ahorro, Eficiencia Energética y Estructura de la Explotación Agrícola.
- Documento nº 6: Ahorro, Eficiencia Energética y Fertilización Nitrogenada.
- Documento nº 7: Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos.
- Documento nº 8: Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos. Auditoría energética de un invernadero para cultivo de flor cordata en Mendigorría.
- Documento nº 9: Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes.
- Documento nº 10: Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes.
- Documento nº 11: Ahorro y Eficiencia Energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura.

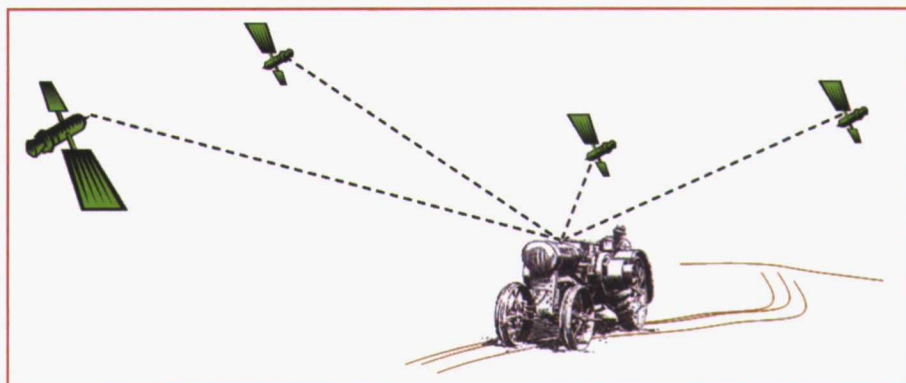
Estos documentos contemplan aspectos como una elección adecuada del tractor según operación a realizar, el laboreo y aperos más apropiados para cada labor agrícola, velocidad de trabajo adecuada, etc. Todo ello unido a los nuevos desarrollos tecnológicos en materia de automatización de tractores, sistema GPS, sistemas inteligentes para la aplicación de agroquímicos, monitorización del rendimiento, sensores remotos, eliminación de mala hierba de forma mecánica, distribución variable y monitorización del rendimiento de campo de las operaciones mecanizadas, pueden ayudar a conseguir un modelo energético agrícola sostenible con el medio ambiente y una reducción de los costes de producción de las explotaciones agrícolas.

GPS, el elemento clave en la reducción de insumos

Para conseguir un tratamiento diferenciado es imprescindible el uso de un sistema que sea capaz de manera precisa de identificar la posición de la maquinaria trabajando en el campo (latitud, longitud, altitud, etc.). Esto fue posible debido a la aparición del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que

FIGURA 2.

Localización de la maquinaria agrícola mediante la constelación de satélites GPS (Fuente: Universidad de Sevilla).



comenzó en EE.UU., en los años setenta cuando el Departamento de Defensa creó un sistema de posicionamiento mediante satélites para conocer la ubicación de objetivos militares. Este sistema proporciona continuamente información de posicionamiento y tiempo en cualquier lugar del mundo y bajo cualquier condición climática (figura 2).

El principio físico utilizado por un GPS es bastante simple. Si las distancias desde un punto de la tierra (receptor GPS montado en un vehículo agrícola) a tres satélites GPS se conocen, la ubicación de ese punto se puede determinar simplemente aplicando el principio geométrico de la triangulación. Pero, ¿cómo se puede obtener la distancia a los satélites?

Cada satélite GPS está transmitiendo continuamente señales de radiofrecuencia desde su órbita. En el momento que esta señal es recibida por la antena del receptor GPS montado en la máquina agrícola que se encuentra en la superficie terrestre se genera una esfera imaginaria que envuelve al satélite. El propio satélite actuará como centro de

la esfera, por tanto, el radio de la esfera será igual a la distancia que separa al satélite del receptor. A partir de este instante el receptor GPS medirá la distancia que lo separa de, al menos, dos satélites más. Para ello tendrá que calcular el tiempo que tarda cada señal en viajar desde los satélites hasta el punto donde se encuentra situado y realizar los correspondientes cálculos matemáticos. Para la determinación exacta de un punto es necesario que tengamos tres esferas imaginarias creadas por tres satélites, dos esferas se cortan en una circunferencia, pero tres lo hacen en dos puntos, uno de los cuales resulta absurdo como solución, por quedar dentro de la corteza terrestre o a una altura de ésta que nos situaría en el espacio exterior.

Debido al uso militar, el Gobierno de los EE.UU. en un principio degradaba la señal de Posicionamiento Global por Satélites (GPS). Esta degradación se denominaba Disponibilidad Selectiva (SA) y proporcionaba errores en la precisión de unos +/- 100 m, pero pronto el interés de la aplicación del sistema GPS en muchos campos de la vida civil hizo que el Gobierno deshabilitara la SA en 2000. Para mejorar el sistema GPS que existía hasta entonces se construyó el sistema DGPS. El fundamento del DGPS ó GPS diferencial radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual a los receptores situados próximos entre sí. Si suponemos que un receptor basándose en otras técnicas conoce muy bien su posición, si este receptor recibe la posición dada por el sistema GPS será capaz de estimar los errores producidos por el sistema GPS. Si este receptor transmite la corrección de errores a los re-

El sistema de guiado RTK-GPS mejora la calidad de siembra y ahorra recursos al disminuir los solapes en valores superiores al 6%



Foto 1. Maíz sembrado en círculo bajo pivót con un sistema RTK-GPS (Fuente: Trimble Navigation). **Foto 2.** Preparación del terreno y plantación de lechuga con un sistema guiado automático RTK-GPS (Fuente: Trimble Navigation).

ceptores próximos a él, éstos podrán corregir también los errores producidos por el sistema.

Para conseguir precisiones centimétricas en operaciones de campo (pulverización, alomado, siembra, fertilización, plantaciones, monitorización del rendimiento, etc.) es fundamental la utilización al menos de un sistema de GPS diferencial y en los casos de alta precisión un sistema RTK-GPS (**fotos 1 y 2**).

En los últimos tiempos con el desarrollo de vehículos más grandes y más rápidos en la agricultura, los trabajos donde el conductor de una máquina agrícola necesita conseguir pasadas paralelas son cada vez más complicados. Desde hace una década se vienen utilizando receptores GPS como herramienta para la ayuda al guiado en vehículos agrícolas, obteniéndose resultados muy interesantes desde el punto de vista de ahorro de insumos y por ende la reducción en el gasto energético.

Estudios preliminares a la aplicación de la tecnología GPS en la conducción de los vehículos agrícolas demostraron que los conductores tienden a producir solapes entre una pasada y la contigua, con el gas-

to de insumos que esto supone. De estos primeros trabajos se concluyó que se produce un solape próximo del 10% de la anchura de la pasada, dependiendo del ancho de la máquina o apero (Nieminen y Sampo, 1993).

Comparativa en una siembra de trigo

En la Universidad de Córdoba se han realizados trabajos comparativos, de la operación de siembra de trigo de invierno, con dos tratamientos diferentes: realizando la siembra de forma convencional (sin guiado GPS) y realizando la siembra con un sistema de guiado automático (RTK-GPS). Se han obtenido porcentajes de ahorro de insumos para dos años consecutivos de 6,16% y 6,31% (Pérez y Agüera, 2007). Con estos resultados se ha generado el **cuadro I**, considerando los mismos precios de combustible y kg de semilla para los dos años.

Del **cuadro I** se puede extraer que el equipo de guiado automático instalado en el tractor produce para el primer año un ahorro de los insumos especificados de 6,45 €/ha y para el segundo año de 7,26 €/ha. Como conclusión puede decirse que el sistema de guiado RTK-GPS mejora la calidad de siembra y ahorra recursos al disminuir los solapes

en valores superiores al 6%. Además facilita la posterior realización de tratamientos entre líneas y la recolección al mantenerse las líneas completamente paralelas incluso las correspondientes a pasadas contiguas. Otra ventaja apreciada durante los ensayos, aunque no evaluada en este trabajo, es la reducción del tiempo de la siembra y la mejora ergonómica para el conductor, por el hecho de disminuir la atención en la conducción en largos trayectos durante la siembra.

Precisión de la señal de corrección diferencial

También en la Universidad de Córdoba y en colaboración con la Universidad de Sevilla se ha desarrollado una metodología para evaluar las diferentes precisiones que se pueden alcanzar en las operaciones agrícolas utilizando las diferentes correcciones diferenciales disponibles en España. De este estudio se ha podido establecer la siguiente clasificación del error proporcionado (mayor a menor): Egnos > Rasant > IP > OmniStar > estación base propia. Esta clasificación permite al agricultor español seleccionar la señal de corrección diferencial a utilizar en función de la precisión requerida para la operación a realizar (más información **Vida Rural** n°260, 2007).

Comparativa en giros en cabeceras

Bochtis y Bougioukas (2008), en la Universidad Griega de Thessaloniki, han estudiado los metros recorridos durante los giros del vehículo agrícola en las cabeceras. Analizando los datos registrados por un sistema DGPS han obtenido para los tres tipos de tratamientos estudiados unos valores de distancia

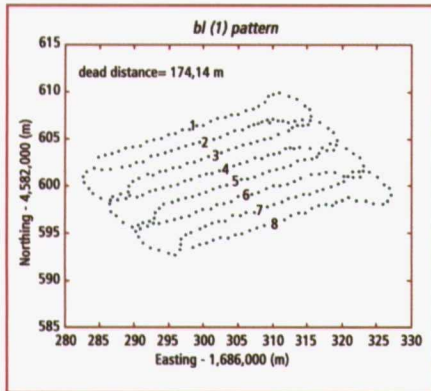
CUADRO I.

Costes de la operación de siembra de trigo.

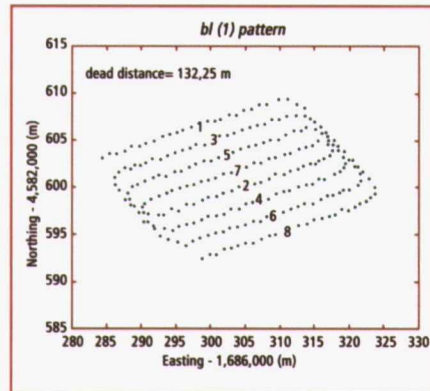
	AÑO 1		AÑO 2	
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Combustible (l/ha)	7,57	7,14	7,59	7,14
Semilla de trigo (€/ha)	114,02	108,00	114,81	108,00
Coste (€/ha)	121,59	115,14	122,40	115,14
Tratamiento 1: Operaciones convencionales (sin guiado GPS)				
Tratamiento 2: Operaciones con el sistema de guiado automático (RTK-GPS)				

FIGURA 3.

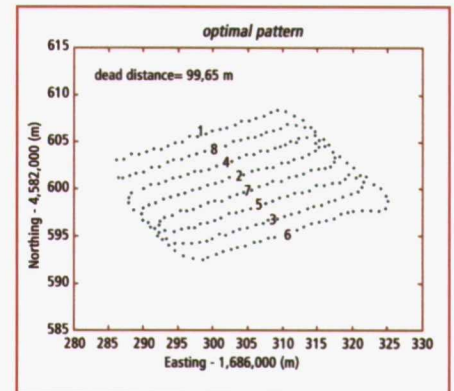
Configuración 1, distancia muerta en cabecera 174,4 m.
(Fuente Aut. Emerg. Technologies).

**FIGURA 4.**

Configuración 2, distancia muerta en cabecera 132,25 m.
(Fuente Aut. Emerg. Technologies).

**FIGURA 5.**

Configuración 3, distancia muerta en cabecera 99,65 m.
(Fuente Aut. Emerg. Technologies).



muerta en cabeceras de 174,4 m (**figura 3**), 132,35 m (**figura 4**) y 99,65 m (**figura 5**).

Tecnología de aplicación variable

A día de hoy, se han desarrollado tres tipos diferentes de metodología para afrontar las aplicaciones de dosis variable: aplicación variable basada en mapas, aplicación basada en sensores y una combinación de ambas. Las tres metodologías están dentro del área conocida como agricultura de precisión, pero se diferencian de forma sustancial:

- Aplicación variable basada en mapas. El vehículo agrícola de distribución de agroquímicos modifica la dosis en función de la información consultada del mapa de variabilidad de las propiedades de la parcela. Este tipo de aplicación presenta el inconveniente de que nos fija la dosis, y dado que transcurre un cierto tiempo entre el análisis del mapa y la aplicación, puede que la dosis prefijada no co-

rresponda exactamente con la que se necesita en el momento de la aplicación si el análisis se ha basado en propiedades que varían rápidamente: contenido de nitratos en el suelo, contenido de humedad en el terreno, mala hierba, etc.

- Aplicación variable basada en sensores. El equipo de distribución, con un sensor o varios, detecta sobre la marcha la información necesaria (nitratos en el suelo, estado del cultivo, mala hierba, etc.), que es utilizada para la regulación de la dosis adecuada de agroquímicos.

- Una combinación de ambas metodologías. Podría ser usada, por ejemplo, para una fertilización nitrogenada. Un mapa nos podría facilitar la información de la cantidad necesaria de nitrógeno a poner en cada zona de la parcela para conseguir una determinada producción, mientras que un sensor montado en el mismo vehículo nos puede indicar la cantidad de nitrógeno existente en ese momento en el suelo. Haciendo esto el vehículo distribuidor

sólo tendría que poner en el suelo la cantidad adicional correspondiente.

Los autores de este artículo han llevado a cabo un proyecto de optimización de aplicación de agroquímicos en olivar tradicional. Han mejorado un pulverizador hidroneumático con un sistema RTK-GPS, un equipo de adquisición de datos, un controlador de la aplicación y seis electroválvulas, para proporcionar un volumen de aplicación adaptado a las características del árbol, sin reducir la calidad del tratamiento, consiguiendo de esta forma un ahorro de insumos para el empresario agrícola que implica este tipo de tratamientos con valores cercanos al 20%.

Para cultivos extensivos, recientemente han aparecido de forma comercial los equipos de control automático de tramos para barras de tratamientos (**figura 6**). Utilizan un sistema DGPS para conocer su posición y velocidad de avance, y de esta forma evitan realizar solapes permitiendo aumentar la velocidad de aplicación, consiguiendo un mejor trabajo en menos

COSECHADORAS DE OCASIÓN



www.enriquesegura.com

Polígono industrial Sector 4, nº 9
50830 Villanueva de Gállego (Zaragoza). España
Tfno.: 976 18 50 20 • Fax: 976 18 53 74

Móvil: 609 300 299 • E-mail: enrique@enriquesegura.com

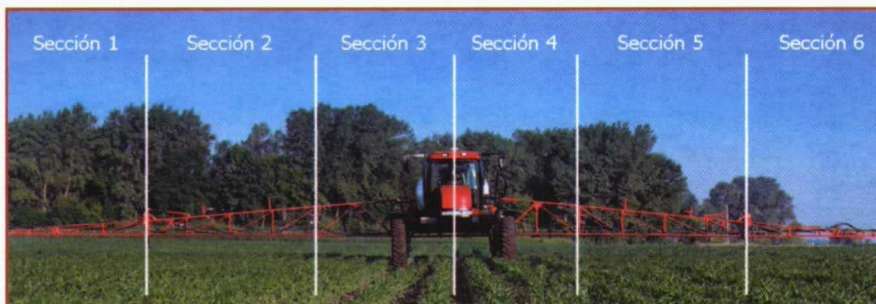


FIGURA 6.

Equipos de control automático de tramos para barras de tratamientos
(Fuente Trimble Navigation Ltd.).

**FIGURA 7.**

Vehículo autopropulsado de 24 m de ancho de trabajo con un controlador automático de tramos instalado (Fuente Universidad de Sevilla).



tiempo. Este sistema permite el control de forma automática de hasta diez secciones, proporcionando una aplicación más precisa y rápida que el ordenador habitual. La empresa Trimble Navigation, nos ha proporcionado resultados de sus últimos ensayos con un equipo automático de control de tramos en un pulverizador; usando este equipo el área tratada es de 44,43 ha y no usándolo de 47,23 ha, produciéndose esta diferencia por una cantidad de sobapes del 6,3% (figura 7).

De todo lo anterior, se puede deducir que este tipo de tecnología se puede usar en tratamientos de herbicidas, siembra, laboreo del suelo, fertilización, etc., y que en todas estas operaciones se produce una reducción de insumos, que en algunos casos podría suponer de la viabilidad del cultivo.

Usando algunas áreas de las disciplinas de automatización y robotización, se puede conseguir una mayor reducción de insumos e incluso en algunos casos se pueden llegar a eliminar por completo los tratamientos herbicidas.



Foto 3. Cuchilla GPS cerrada eliminando la mala hierba existente entre plantas de tomate (Fuente: University of California, Davis). Foto 4. Cuchilla GPS abierta saltando la planta de tomate (Fuente: University of California, Davis).



En la Universidad de Davis (California) y en colaboración con la Universidad de Sevilla se ha desarrollado un sistema que permite eliminar la mala hierba que crece entre plantas de forma mecánica, sin ningún tipo de aplicación química. Para ello, en primer lugar se ha montado un equipo RTK-GPS en una transplantadora convencional de tomate, que permire obtener un mapa con la georreferenciación de cada una de las plantas, justo en el mismo momento de hacer la plantación. Posteriormente este mapa es usado como información para poner en funcionamiento una cuchilla neumática. Cuando esta cuchilla se desplaza por la línea de tomate y encuentra la coordenada registrada (planta de tomate) ésta se abre y unos centímetros después de pasarla vuelve a cerrarse y a eliminar toda la mala hierba que crece entre plantas de tomate, a la espera de encontrar la siguiente planta de tomate y volverse a abrir (fotos 3 y 4). ●

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto INIA N° RTA 2006-00058-C03-03 y al Department of Agricultural and Biological Engineering, University of California, Davis, por su colaboración en los trabajos de investigación.

Renuncia de responsabilidad

La mención de productos comerciales, servicios, marcas, fabricantes, organizaciones, o estudios de investigación en esta publicación no implica la aprobación por parte de los autores, o de las Universidades a las que pertenecen. El no mencionar otros productos, servicios, marcas, fabricantes, organizaciones, o estudios de investigación similares no implica la discriminación hacia éstos.

BIBLIOGRAFÍA

Boto Fidalgo, J.A., Pastrana Santamarta, P.Y Suárez de Cepeda Martínez, M. 2005. Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España. IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). www.idae.es.

Bochtis, D.D. and Vougioukas, S.G. 2008. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. Biosystems Engineering 101 (2008)1-12.

Nieminen y Sampo, 1993. Unmanned Vehicles for Agricultural and Off Highway Applications. In: 1993 International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition SAE Technical Paper Series 932475 (1993).

Pérez M., Agüera J. y Gil J. 2007. Desarrollo, evaluación y análisis de técnicas de agricultura de precisión para la optimización de insumos en cultivos característicos del valle del Guadalquivir. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba. Dpto. de Ingeniería Rural.

Rodríguez, F. and Berenguel M. 2004 Control y robótica en agricultura. Universidad de Almería, ISBN: 84-8240-739-2