

Agricultura de precisión

Cesar Fernández-Quintanilla

Resumen.

La Agricultura de Precisión (AP) es un conjunto de técnicas de cultivo que utilizan tecnologías de la información para ajustar el uso de semillas y de agroquímicos en función de la diversidad del medio físico y del medio biológico. Esto conlleva una reducción de los costes de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio. Este concepto es el inicio de una revolución en la gestión de los recursos naturales y en pocos años puede introducir a la agricultura a la era digital. Sin embargo, y aunque el motor del desarrollo de la AP han sido una serie de tecnologías de la era espacial (GPS, sensores, Sistemas de Información Geográfica, ...), el efecto final es, de alguna manera, volver a recuperar algunas de las características de la agricultura tradicional. En el ámbito concreto del manejo de la vegetación arvense, la detección de rodales de malas hierbas mediante el empleo de sensores o de técnicas de teledetección y la planificación y realización de tratamientos herbicidas localizados puede suponer una notable disminución en el consumo de herbicidas. Uno de los cuellos de botella para conseguir esta meta es mejorar nuestros conocimientos sobre la heterogeneidad espacial de las poblaciones arvenses y su dinámica temporal. Palabras clave: Agricultura de precisión, Malas hierbas, Heterogeneidad espacial, Teledetección, Tratamientos localizados.

¿Qué es la agricultura de precisión?

La Agricultura de Precisión (AP) es el inicio de una revolución en la gestión de los recursos naturales. Basada fundamentalmente en las tecnologías de la información, en pocos años va a introducir a la agricultura a la era digital.

Según una reciente definición del National Research Council de los EEUU, la Agricultura de Precisión es un conjunto de técnicas de cultivo que utiliza tecnologías de la información para ajustar el uso de semillas y de agroquímicos considerando la diversidad del medio físico y del medio biológico (NRC, 1997). Esto conlleva una reducción de los costes de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio. Este concepto tiene, en principio, un atractivo indudable. Pocos se opondrían a una filosofía de manejo que trata de engarzar los insumos aportados con las necesidades exactas. Además, esta filosofía se ajusta perfectamente a los principios científicos de la gestión de suelos, cultivos y plagas.

Este nuevo concepto ha sido posible gracias al desarrollo experimentado en los últimos años por una serie de tecnologías (Pierce y Nowak, 1999)

- Sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS), que permiten localizar exactamente (con 1-2 metros de error) las variaciones existentes dentro de la parcela y la posición de las máquinas agrícolas.
- Sensores de cosecha que permiten conocer exactamente los rendimientos obtenidos en cada unidad de terreno (Fig. 1); sensores de humedad o de fertilidad del suelo; sensores multispectrales y sistemas de teledetección que permiten conocer el estado de la vegetación y la presencia de malas hierbas.
- Sistemas de información geográfica (GIS) y sistemas de soporte a la decisión (SSD) que permiten manejar y relacionar bases de datos estructuradas espacial y temporalmente y utilizar esta información en la toma de decisiones (Fig. 2).

- Maquinaria agrícola (sembradoras, abonadoras, pulverizadores) con mecanismos más precisos de ajuste y control que permiten una distribución localizada y variable de los diferentes insumos en función de las características específicas de cada zona (Fig. 3).

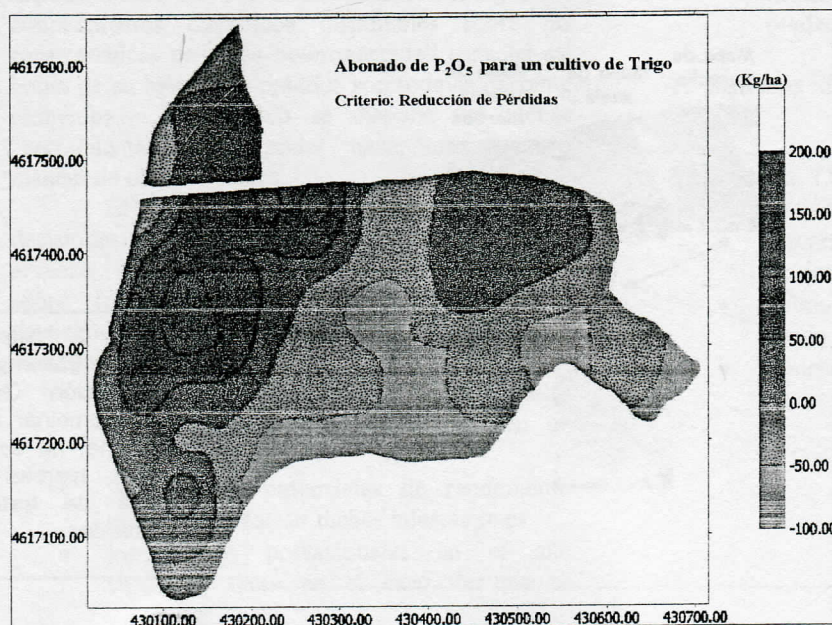


Figura 1 Mapa de abonado fosfórico en trigo, realizado en base al mapa de cosecha obtenido en la campaña previa y a la previsible extracción de nutrientes

Aunque el motor del desarrollo de la AP han sido estas tecnologías de la era espacial, el efecto final es, de alguna manera, volver a recuperar algunas de las características de la agricultura tradicional (Plant, 2001). Antiguamente, la mayoría de las prácticas agrarias se realizaban a mano, en campos de un tamaño reducido, dando la oportunidad al agricultor de observar directamente el progreso de cada parte del campo. En estas condiciones, los cultivos eran manejados siguiendo prácticas “de precisión”, gestionando de distinta manera las zonas bajas del campo que las del altozano, aplicando algo más de abono a las zonas en las que el cultivo parecía más débil, o escardando las zonas más enmalezadas. Según se fue incrementando el tamaño de las parcelas individuales, la heterogeneidad de las mismas se incrementó paralelamente. A pesar de ello, el agricultor gestiona sus campos como si fueran unidades homogéneas, bien sea porque desconoce la existencia de esas diferencias (cada vez es más frecuente que explote tierras que no le son propias), porque la creciente reducción de la población rural le obliga a una máxima simplificación de las prácticas agrarias (cada vez menos agricultores manejan más tierras) o bien porque hasta la fecha no existían medios técnicos para llevar a cabo una gestión más precisa.

Evidentemente, la agricultura de precisión no es aplicable a todo tipo de situaciones. Para que empleo de estos sistemas esté justificado se tienen que cumplir cuatro requisitos:

- Que exista una considerable variabilidad espacial dentro del campo en los factores que determinan el rendimiento del cultivo
- Que las causas de esta variabilidad puedan ser identificadas y medidas
- Que la información sobre esas medidas pueda ser empleada para modificar las

prácticas de manejo del cultivo

- Que los costes asociados a la determinación y gestión de la variabilidad no sean superiores a los ahorros conseguidos o a las mejoras de producción.

La agricultura de precisión, tal y como se la entiende hoy en día, requiere un grado de tecnificación en la maquinaria y en la explotación que no todos los agricultores pueden asumir. De hecho, si bien el empleo de estas tecnologías se ha popularizado rápidamente en varias zonas de los EEUU (el 63% de los agricultores del medio-oeste utilizan ya alguna de estas técnicas) en otras zonas de este mismo país está todavía poco extendida. Estos sistemas están también bastante extendidos en Australia y norte de Europa (Dinamarca, Gran Bretaña y Alemania principalmente). Aunque hasta la fecha se han aplicado fundamentalmente a cultivos extensivos sembrados en grandes superficies (maíz, soja, trigo) las oportunidades de aplicación a cultivos mediterráneos (olivo, viña, frutales, cítricos) son enormes. Dado que este terreno está prácticamente virgen, aquí existe un campo de trabajo prometedor. En nuestro país, la introducción de estas tecnologías está teniendo lugar principalmente en cultivos extensivos y en explotaciones relativamente grandes del Valle del Guadalquivir, meseta central y Valle del Ebro. Estudios de mercado realizados por empresas de maquinaria agrícola indican que en todas estas zonas existen superficies importantes en las cuales las prácticas de Agricultura de Precisión pueden tener un interés económico a corto o medio plazo.

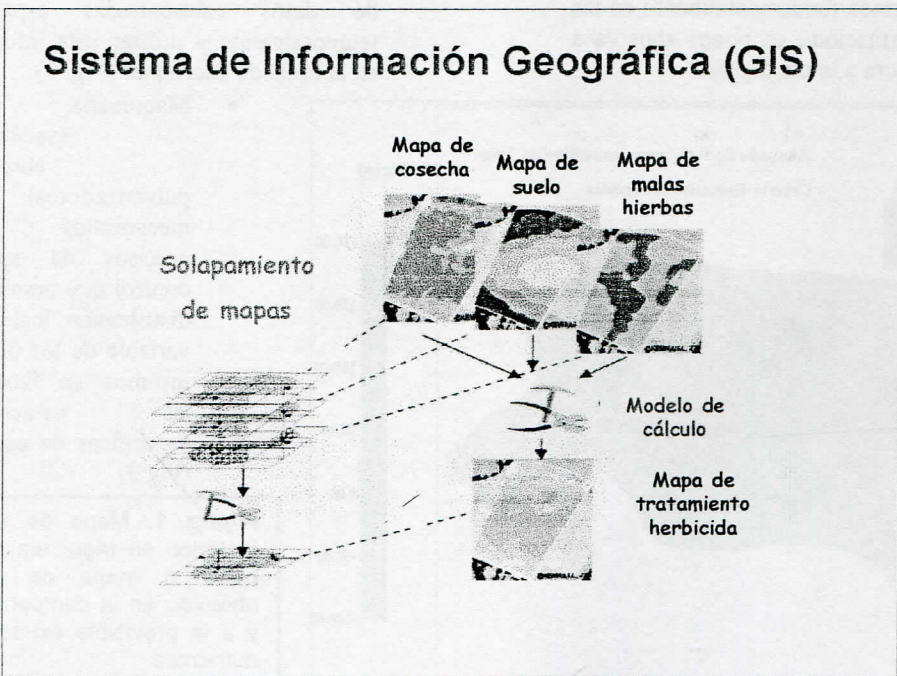


Figura 2. Utilización de un Sistema de Información Geográfica para combinar datos de cosecha, de suelo y de malas hierbas en un mapa de tratamientos herbicidas

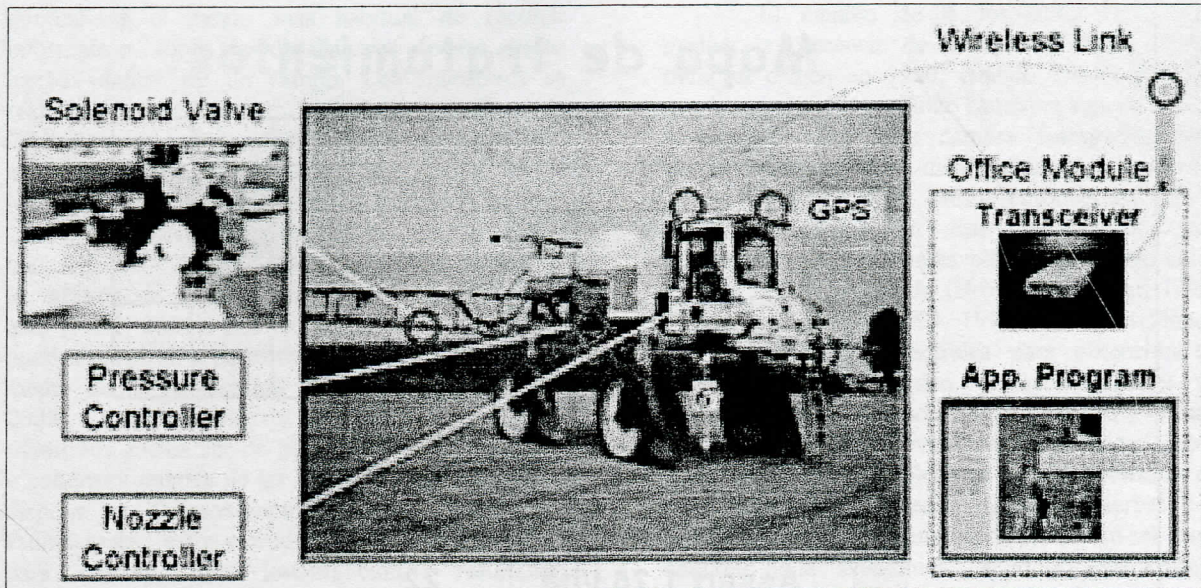


Figura 3. Equipo de pulverización para realización de tratamientos a dosis variables

¿Qué es el manejo de precisión de la vegetación arvense?

Una de las posibles aplicaciones de los sistemas de Agricultura de Precisión es el manejo de la vegetación arvense que invade los cultivos, las comunmente llamadas “malas hierbas”. El hecho de que las malas hierbas están irregularmente distribuidas dentro de los campos salta frecuentemente a la vista. Los agricultores son conscientes de la presencia de “*rodales*” de malas hierbas dentro de sus cultivos. Sin embargo, los conocimientos científicos disponibles sobre las características de dicha heterogeneidad espacial así como de su relevancia práctica son todavía bastante reducidos. Y tampoco se dispone de buenas “herramientas” para poder hacer un correcto manejo de dichos rodales.

El agricultor, en su proceso de toma de decisiones relativas al manejo de la vegetación arvense, necesita hacer unos ciertos pronósticos sobre los riesgos asociados a las diversas situaciones. Para realizar dichos pronósticos necesitaría estimar:

- el tamaño de las poblaciones de malas hierbas que se van a establecer en un determinado año
- las pérdidas potenciales de rendimiento que podrían causar dichas infestaciones
- los niveles poblacionales en el año siguiente, tanto en el caso de que se

aplique una medida de control (p.ej. un herbicida) como en el caso de que no se realice ningún control

Para poder llevar a cabo estas estimaciones y realizar unas predicciones fiables, sería necesario disponer:

- de unas tecnologías que permitan evaluar la situación actual del problema
- de unos conocimientos científicos que permitan relacionar los parámetros medidos con los parámetros que desea predecir

1. Sistemas de detección de rodales de malas hierbas

Senay et al. (1998) distinguen tres formas básicas de medir variabilidad espacial dentro de un campo:

- discretamente (p.ej. muestreos puntuales de densidad de plantas)
- continuamente (p.ej. estimación visual desde un vehículo sobre el terreno)
- remotamente (p.ej. cobertura vegetal a partir de sensores remotos)

Aunque el motor del desarrollo de la AP han sido estas tecnologías de la era espacial, el efecto final es, de alguna manera, volver a recuperar algunas de las características de la agricultura tradicional (Plant, 2001). Antiguamente, la mayoría de las prácticas agrarias se realizaban a mano, en campos de un tamaño reducido, dando la oportunidad al agricultor de observar directamente el progreso de cada parte del campo. En estas condiciones, los cultivos eran manejados siguiendo prácticas “de precisión”, gestionando de distinta manera las zonas bajas del campo que las del altozano, aplicando algo más de abono a las zonas en las que el cultivo parecía más débil, o escardando las zonas más enmalezadas. Según se fue incrementando el tamaño de las parcelas individuales, la heterogeneidad de las mismas se incrementó paralelamente. A pesar de ello, el agricultor gestiona sus campos como si fueran unidades homogéneas, bien sea porque desconoce la existencia de esas diferencias (cada vez es más frecuente que explote tierras que no le son propias), porque la creciente reducción de la población rural le obliga a una máxima simplificación de las prácticas agrarias (cada vez menos agricultores manejan más tierras) o bien porque hasta la fecha no existían medios técnicos para llevar a cabo una gestión más precisa.

Evidentemente, la agricultura de precisión no es aplicable a todo tipo de situaciones. Para que empleo de estos sistemas esté justificado se tienen que cumplir cuatro requisitos:

- Que exista una considerable variabilidad espacial dentro del campo en los factores que determinan el rendimiento del cultivo
- Que las causas de esta variabilidad puedan ser identificadas y medidas
- Que la información sobre esas medidas pueda ser empleada para modificar las

prácticas de manejo del cultivo

- Que los costes asociados a la determinación y gestión de la variabilidad no sean superiores a los ahorros conseguidos o a las mejoras de producción.

La agricultura de precisión, tal y como se la entiende hoy en día, requiere un grado de tecnificación en la maquinaria y en la explotación que no todos los agricultores pueden asumir. De hecho, si bien el empleo de estas tecnologías se ha popularizado rápidamente en varias zonas de los EEUU (el 63% de los agricultores del medio-oeste utilizan ya alguna de estas técnicas) en otras zonas de este mismo país está todavía poco extendida. Estos sistemas están también bastante extendidos en Australia y norte de Europa (Dinamarca, Gran Bretaña y Alemania principalmente). Aunque hasta la fecha se han aplicado fundamentalmente a cultivos extensivos sembrados en grandes superficies (maíz, soja, trigo) las oportunidades de aplicación a cultivos mediterráneos (olivo, viña, frutales, cítricos) son enormes. Dado que este terreno está prácticamente virgen, aquí existe un campo de trabajo prometedor. En nuestro país, la introducción de estas tecnologías está teniendo lugar principalmente en cultivos extensivos y en explotaciones relativamente grandes del Valle del Guadalquivir, meseta central y Valle del Ebro. Estudios de mercado realizados por empresas de maquinaria agrícola indican que en todas estas zonas existen superficies importantes en las cuales las prácticas de Agricultura de Precisión pueden tener un interés económico a corto o medio plazo.

Sistema de Información Geográfica (GIS)

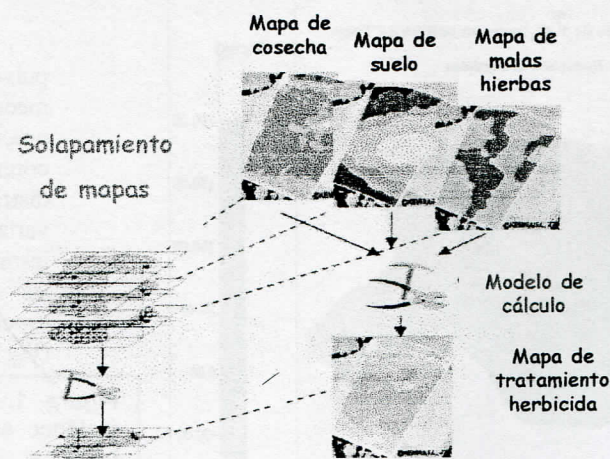


Figura 2. Utilización de un Sistema de Información Geográfica para combinar datos de cosecha, de suelo y de malas hierbas en un mapa de tratamientos herbicidas

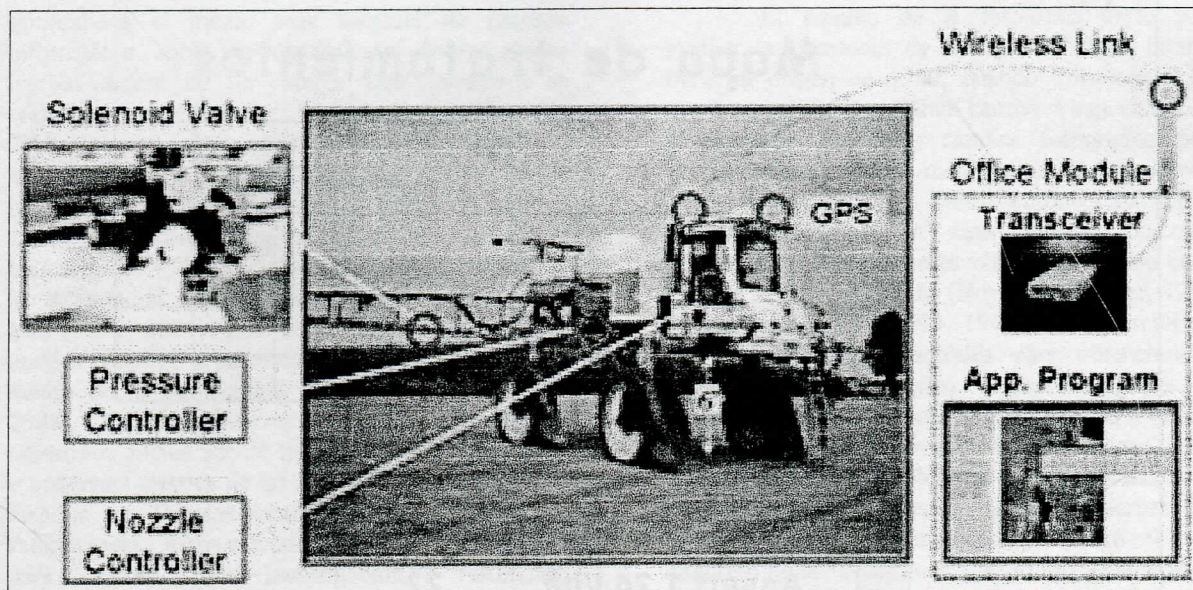


Figura 3. Equipo de pulverización para realización de tratamientos a dosis variables

¿Qué es el manejo de precisión de la vegetación arvense?

Una de las posibles aplicaciones de los sistemas de Agricultura de Precisión es el manejo de la vegetación arvense que invade los cultivos, las comunmente llamadas “malas hierbas”. El hecho de que las malas hierbas están irregularmente distribuidas dentro de los campos salta frecuentemente a la vista. Los agricultores son conscientes de la presencia de “*rodales*” de malas hierbas dentro de sus cultivos. Sin embargo, los conocimientos científicos disponibles sobre las características de dicha heterogeneidad espacial así como de su relevancia práctica son todavía bastante reducidos. Y tampoco se dispone de buenas “herramientas” para poder hacer un correcto manejo de dichos rodales.

El agricultor, en su proceso de toma de decisiones relativas al manejo de la vegetación arvense, necesita hacer unos ciertos pronósticos sobre los riesgos asociados a las diversas situaciones. Para realizar dichos pronósticos necesitaría estimar:

- el tamaño de las poblaciones de malas hierbas que se van a establecer en un determinado año
- las pérdidas potenciales de rendimiento que podrían causar dichas infestaciones
- los niveles poblacionales en el año siguiente, tanto en el caso de que se

aplique una medida de control (p.ej. un herbicida) como en el caso de que no se realice ningún control

Para poder llevar a cabo estas estimaciones y realizar unas predicciones fiables, sería necesario disponer:

- de unas tecnologías que permitan evaluar la situación actual del problema
- de unos conocimientos científicos que permitan relacionar los parámetros medidos con los parámetros que desea predecir

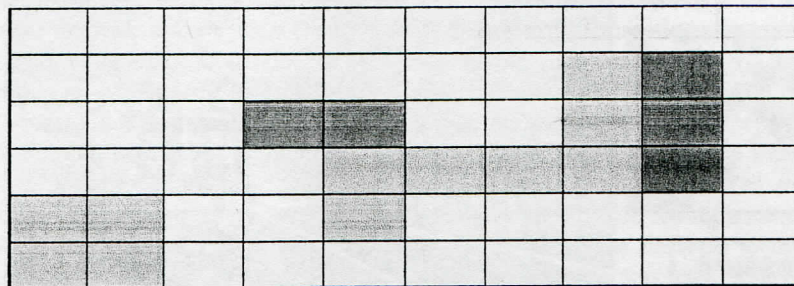
1. Sistemas de detección de rodales de malas hierbas

Senay et al. (1998) distinguen tres formas básicas de medir variabilidad espacial dentro de un campo:

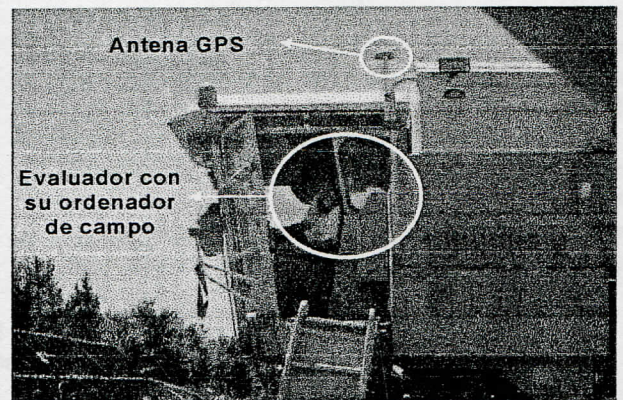
- discretamente (p.ej. muestreos puntuales de densidad de plantas)
- continuamente (p.ej. estimación visual desde un vehículo sobre el terreno)
- remotamente (p.ej. cobertura vegetal a partir de sensores remotos)

C)

Mapa de tratamientos

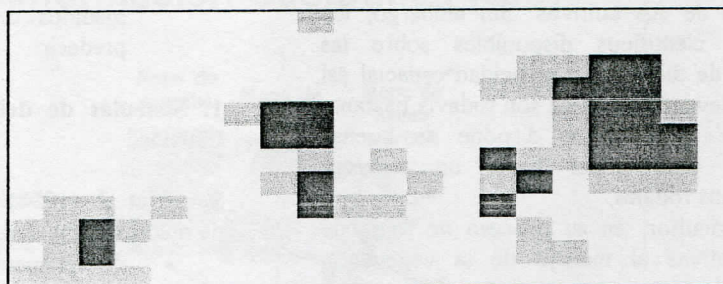


Tratamientos:	% de superficie:
	Ninguno 28
	Assert 0,6 l/ha 43
	Assert 1,25 l/ha 22
	Assert 2,5 l/ha 7



B)

Mapa de infestación



Nivel de infestación:	
	0 (<0,1 panículas/m2)
	1 (0,1-1 panículas/m2)
	2 (1-10 panículas/m2)
	3 (> 10 panículas/m2)

Figura 4. A) Procedimiento utilizado para detectar los rodales de "avena loca" en un campo de trigo, B) "mapa de infestación" obtenida y C) consiguiente "mapa de tratamientos" calculado

Muestras discretas. El sistema de muestreo puntual es el medio más habitual de recoger información sobre la distribución de las malas hierbas dentro de un campo. Los muestreos se realizan, generalmente, utilizando mallas de diferentes dimensiones (desde 5m x 5m hasta 50m x 50m) según el tamaño del campo y la heterogeneidad de la infestación (Rew y Cousens, 2001). Este patrón de muestreo ha demostrado ser más sencillo y eficiente (en el sentido de minimizar la varianza de las muestras) que los muestreos al azar (Plant, 2001). Los mapas de malas hierbas se pueden construir a partir de muestreos discretos por medio de interpolaciones (Jurado-Exposito et al., 2002). Los parámetros estimados en estos muestreos suelen ser de tipo cuantitativo: densidad o cobertura relativa de las malas hierbas. Aunque se dispone de diversos métodos para realizar estas estimaciones, estos métodos han sido desarrollados para usos de investigación, resultando excesivamente laboriosos y costosos para ser empleados por agricultores (Rew et al., 2001). Esta es la razón por la que el desarrollo de tecnologías para una adquisición más rápida y sencilla de datos espaciales es hoy en día un foco de considerable atención.

Muestras continuas. La detección de malas hierbas en forma continua requiere tomar datos sobre la superficie completa del campo, siendo estos datos de tipo cualitativo, frecuentemente ordenados en varias categorías (cero/bajo/medio/alto) o de tipo ordinal (presencia/ausencia). Este sistema se ha utilizado en varios estudios experimentales (Colliver et al., 1996; Rew et al., 1996; Lamb et al., 1999). En los estudios llevados a cabo por nuestro equipo investigador se ha visto como es posible detectar con notable precisión los rodales de "avena loca" (*Avena sterilis*) presentes en cultivos de cereales utilizando un método relativamente simple (Barroso et al., 2001). Dicho método está basado en la evaluación visual llevada a cabo desde la cabina de una cosechadora utilizando cuatro categorías poblacionales. La tecnología necesaria para poder llevar a cabo estas evaluaciones (sistema GPS, equipo PC portátil, programas informáticos de adquisición de datos) ha sido ya puesta a punto y puede utilizarse a nivel comercial.

Teledetección. La teledetección ha mostrado ya en numerosos campos de aplicación sus posibilidades para obtener información de gran calidad para la mejor gestión del medio ambiente y los recursos naturales. Entre sus aplicaciones más importantes está el estudio de las cubiertas vegetales para el que la teledetección presenta una serie de propiedades muy interesantes, tales como la observación cíclica que proporciona, la transmisión de datos en tiempo real, la información sobre regiones no visibles del espectro, la visión sinóptica, su cobertura

exhaustiva del territorio, y el formato digital de los datos (Chuvieco, 1996).

El empleo de la fotografía aérea para evaluar la presencia de rodales de malas hierbas tiene su origen en 1990, cuando Thornton et al. usaron un globo aerostático cautivo a baja altura

equipado con una cámara fotográfica para obtener imágenes de la distribución de *Avena fatua* en un campo de trigo. Desde entonces ha habido diversos estudios en esta misma dirección, empleando fotografía aérea color e infrarrojo color y vídeo aerotransportado (Brown y Steckler, 1995; Everitt et al., 1992, 1993, 1994). En la actualidad, los sistemas multispectrales para obtención de imágenes aéreas pueden ofrecer imágenes de vegetación con una resolución submétrica y de una forma rápida y relativamente económica. Estos sistemas han sido empleados para la detección de rodales de varias especies de malas hierbas con unos resultados bastante favorables. En el caso concreto de la "avena loca" (*A. fatua*), evaluaciones realizadas cuando el cultivo de cereal estaba en el estado de tres hojas permitían detectar rodales de esta mala hierba siempre que tuvieran una densidad superior a 20 plantas/m² (Lamb et al., 1999).

2. Conocimientos sobre la heterogeneidad espacial de las malas hierbas y su dinámica temporal

La agregación espacial existente en las poblaciones arvenses ha sido demostrada claramente en el caso de varias especies perennes con crecimiento clonal, tales como el "cardo cundidor" (*Cirsium arvense*) o la "cañota" (*Sorghum halepense*) (Donald, 1997, Horowitz, 1973). Los trabajos realizados en estos últimos años por diversos investigadores españoles han mostrado que numerosas malas hierbas anuales de los cereales y del girasol presentan también una clara distribución en rodales (Jurado-Exposito et al., 2001, 2002; Ruiz et al., 2001). Este hecho, aparentemente casi trivial, puede tener importantes implicaciones de cara al control de esta vegetación indeseada.

Los conocimientos sobre la estabilidad temporal de los rodales de malas hierbas tienen un elevado interés de cara a determinar su evolución en el tiempo y las implicaciones de manejo a largo plazo. Si la posición de los rodales es estable a lo largo de varios años, los "mapas de infestación" establecidos solo necesitarían ser reconstruidos cada cierto número de años, lo cual simplificaría (y haría más rentable) la utilización de estos sistemas. Diversos autores han estudiado la dinámica espacio-temporal de los rodales de distintas especies de malas hierbas. La principal conclusión obtenida es que en el caso de especies con un crecimiento clonal, de especies que dispersan sus semillas antes de la recolección del cultivo o bien de especies de porte muy bajo que no llegan a ser alcanzadas por la cosechadora, los rodales son bastante estables (Webster et al., 2000 a y b). Sin embargo, cuando las semillas son afectadas por las

diversas operaciones culturales (recolección, riego, etc) la posición de los rodales no presenta estabilidad en el tiempo (Ballare et al., 1987, Zanin et al., 1998).

La comprensión de los factores ambientales que dan origen a la presencia de rodales podría facilitar el manejo de dichas zonas y de todo el campo en general. Trabajos recientes realizados en cultivos de maíz y soja en la zona central de los EEUU muestran la elevada asociación entre el relieve del terreno y algunas propiedades del suelo (materia orgánica, fertilidad) con la presencia y abundancia de diversas malas hierbas (Dieleman et al., 2000; Medlin et al., 2001). En base a los resultados obtenidos, Dieleman et al. (2000) propone que dichas asociaciones son debidas a la interacción de las prácticas agronómicas (labores, tratamientos herbicidas) con las propiedades de cada zona, creando una heterogeneidad de humedad y fertilidad de suelo y de concentración de herbicida que, en último término, condiciona el crecimiento, reproducción y capacidad competitiva de ambos, el cultivo y la mala hierba. En estudios realizados por nuestro equipo investigador se ha constatado que la heterogeneidad espacial de la avena loca esta asociada a las diferencias de nivel de fertilidad de suelos y, en algún caso, a la existencia de zonas de pseudogley (Ruiz et al., 2002). Por el contrario, el patrón de dispersión del vallico (*Lolium rigidum*) parece estar primariamente asociado a los cordones de paja dejados por las cosechadoras, si bien se ha observado también una cierta asociación con el contenido de N y K en el suelo (Izquierdo et al., 2001).

3. Planificación y ejecución de tratamientos localizados con herbicidas

Una vez detectada la posición de los rodales de malas hierbas (“mapas de infestación”) y establecidos los riesgos –pérdida de cosecha, crecimiento poblacional- asociados a dichas

poblaciones (“mapas de riesgos”), el siguiente paso es la planificación de “tratamientos localizados” ajustados a las necesidades específicas de cada zona. La disponibilidad actual de Sistemas de Información Geográfica (GIS) que permiten procesar rápidamente toda esa información y la reciente aparición de equipos de pulverización a dosis variable, hacen que esta posibilidad sea hoy en día una realidad (Fig. 4).

El concepto de tratamientos localizados ha sido evaluado tanto experimentalmente como a través de modelos de simulación. En el ámbito experimental, uno de los primeros trabajos realizados sobre este tema fue el de Heisel et al. (1997). Estos autores demostraron una reducción potencial de un 59% en el uso de herbicidas utilizando tratamientos localizados frente a los tratamientos a dosis completa sobre toda la superficie. Más recientemente, Luschei et al. (2001) han realizado un estudio diseñado para evaluar a escala agricultor los beneficios potenciales de los tratamientos localizados. El estudio, llevado a cabo en cuatro campos de cereales de 12 a 28 has de superficie, se realizó utilizando la maquinaria propia de los agricultores, equipada con sistemas GPS y otros mecanismos necesarios. Los rendimientos del cultivo de cebada no se vieron afectados por la estrategia de tratamientos utilizada (tratamientos localizados vs. tratamientos sobre toda la superficie). Los beneficios netos fueron en general mayores en los tratamientos localizados, incrementándose la diferencia según la proporción del campo invadido por la avena loca era menor. Asimismo, Goudy et al. (2001), comparando un tratamiento convencional con otro localizado, no encontraron diferencias en cuanto a su eficacia en el control de las malas hierbas pero constataron que el porcentaje del campo tratado se redujo en un 26% y un 59% (en los dos años del ensayo) utilizando los tratamientos localizados. Los ensayos realizados recientemente en nuestro país con la “avena loca” indican la posibilidad de reducir hasta en un 70% las aplicaciones de herbicidas sin que se

Figura 5. Estimación de costes (€/ha) asociados a la presencia de “avena loca” en un campo de trigo en varios tipos de supuestos: a) sin ninguna medida de control, b) aplicando un herbicida sobre toda la superficie del campo, c) realizando un tratamiento localizado con unidades de tratamiento de 3m x 3m, d) realizando un tratamiento localizado con unidades de tratamiento de 12m x 12m.

64% del campo infestado (4 rodales)

	a) Sin control	b) Tratamiento convencional	c) Tratamiento localizado (3m x 3m)	d) Tratamiento localizado (12m x 12m)
Pérdidas de rendimiento	54,8	0	0	1,4
Coste del herbicida	0	54,1	34,6	38,8
Coste tecnológico	0	0	15	9
COSTE TOTAL	54,8	54,1	49,6	49,2

vean afectados los rendimientos del cereal (Fernandez-Quintanilla et al, 2001).

¿CUÁL ES LA VIABILIDAD REAL DE ESTAS TÉCNICAS?

Por lo que hemos podido ver hasta el momento, existe una gran abundancia de herramientas tecnológicas para hacer posible estos sistemas. Muchas de ellas fueron desarrolladas inicialmente en el ámbito aeroespacial y posteriormente han encontrado una aplicación en la agricultura. Sin embargo, queda mucho por hacer, particularmente en lo relativo a los conocimientos científicos de base. En agricultura de precisión se puede decir que la tecnología ha ido por delante de la ciencia (al contrario de lo que es habitual). Y ahora le toca a la ciencia venir a rellenar todas las lagunas existentes.

Otro aspecto a considerar es, sin duda, la viabilidad económica de estos nuevos sistemas. Dicha viabilidad dependerá de una serie de factores:

- La heterogeneidad espacial existente. Ciertamente, si un 90% del campo está seriamente invadido por la avena loca lo más probable es que no sea rentable entrar en mayores disquisiciones, siendo preferible tratar todo el campo uniformemente. Pero si sólo está invadido un 30%, sí que es muy probable que un tratamiento localizado pague económicamente.
- La estabilidad temporal del carácter. En el caso de la fertilidad de suelos, el caracterizar las propiedades de un campo puede tener un costo relativamente importante. Pero esa información se podrá rentabilizar a lo largo de muchos años, ya que muchas de las características edáficas son muy estables. Por el contrario, el definir espacialmente el ataque de una plaga de insectos puede tener una aplicación mucho más reducida, ya que estará cambiando constantemente.
- El tamaño de los campos individuales. Evidentemente, este tipo de técnicas tienen una mayor aplicación en campos grandes (mayores de 10-20 has) en los cuales es probable la existencia de marcadas diferencias internas y es posible utilizar la maquinaria disponible a tal efecto.
- El valor económico de los cultivos. Cultivos que requieren elevados "inputs" y tienen un alto valor añadido (p. ej. el algodón) podrán beneficiarse más de estas técnicas que cultivos en los que las aplicaciones de fertilizantes o plaguicidas son mínimos (p. ej. girasol).
- Las regulaciones oficiales. En algunos países del norte de Europa, donde la conciencia ambiental está más

desarrollada, se exige (o se incentiva) a los agricultores para que cumplan unas ciertas exigencias (p. ej. que reduzcan progresivamente el consumo de fitosanitarios). Este tipo de regulaciones favorecería sin duda estas prácticas.

- La demanda de la sociedad. En estos últimos años la demanda orientada hacia una mayor seguridad alimentaria y respeto al medio ambiente ha favorecido el desarrollo de conceptos tales como la Agricultura Ecológica o la Producción Integrada. La Agricultura de Precisión ofrece asimismo un elevado potencial para reducir el uso de agroquímicos y de mejorar la "trazabilidad" de los productos. En este sentido, en un futuro próximo va a ser importante el ajustar la producción a las normas ISO 14001 de calidad ambiental. El empleo de las técnicas de Agricultura de Precisión facilita enormemente el poder llevar un control preciso y documental de todas las operaciones e inputs empleados en la producción de un determinado cultivo.

IMPACTO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA INVESTIGACIÓN AGRARIA

La AP supone no solo una revolución en la forma de hacer agricultura. También supone un cambio radical en nuestros planteamientos a la hora de investigar en agricultura. La Agricultura de Precisión es un concepto holístico, considerando la agricultura de una forma global. Por ello, requiere la integración de los trabajos realizados en diferentes campos: agronomía, fertilidad de suelos, riego, protección vegetal, geoestadística, maquinaria agrícola. Por otro lado, es evidente que dentro de este campo el sector privado ha ido por delante de la investigación pública, apostando fuertemente por estas nuevas tecnologías. Gracias a ello, hoy en día es relativamente fácil disponer de una enorme información sobre nuestros campos de cultivo. Ahora "solo" queda el saber interpretarla y sacar el máximo provecho de ella. Y eso requiere investigación pública.

En este contexto, es asimismo interesante el constatar que la AP ha introducido una nueva manera de hacer la investigación de campo. Por ejemplo, en lugar de partir de un campo lo más uniforme posible al que se aplican unos tratamientos y se evalúan sus efectos (mediante técnicas estadísticas de ANOVA o de regresión), en este nuevo tipo de investigaciones se parte de un campo lo más heterogéneo posible, estudiando las variaciones existentes mediante técnicas geostatísticas.

Ciertamente, la I+D en el ámbito de la Agricultura de Precisión no es sencilla: se requiere un cambio de mentalidad, una estrecha colaboración con especialistas en otras disciplinas,

un conocimiento de técnicas relativamente sofisticadas. Por otra parte, los frutos no van a ser inmediatos. La agricultura española todavía tiene numerosos problemas estructurales que le impiden incorporar estos nuevos sistemas a gran escala. Sólo un número relativamente reducido de agricultores, bien preparados profesionalmente y con unas superficies de cultivo importantes, pueden beneficiarse de estos sistemas. Por otra parte, no existen incentivos públicos (p.ej. medidas agroambientales) que promuevan el empleo de estas técnicas poco contaminantes. Pero el desarrollo previsible de la agricultura en los próximos años nos va a llevar, ineludiblemente, a sistemas de producción en la línea de los sistemas de Agricultura de Precisión.

Referencias

- Barroso, J., Ruiz, D., Fernandez-Quintanilla, C., Ribeiro, A. y Diaz, B. 2001. Comparison of various sampling methodologies for site specific sterile wild oat (*Avena sterilis*) management. Third European Conference on Precision Agriculture, 575-580
- Brown, R.B. y Steckler J.P.G.A. 1995. Prescription maps for spatially variable herbicide application in non-till corn. Trans. ASAE 38: 1659-1666
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección espacial. Ediciones Rialp, S. A. 586 pp.
- Colliver C.T., B.D. Maxwell, D.A. Tyler D.W. Roberts and D.S. Long. 1996. Georeferencing wild oat infestations in small grains: accuracy and efficiency of three weed survey techniques. In: P.C. Roberts, R.H. Rust and W.E. Larson (eds.), Proceedings 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. pp. 453-63
- Dieleman, J.A., Mortensen, D.A., Buhler D.D. y Ferguson, R.B. 2000. Identifying associations among site properties and weed species abundance. II. Hypothesis generation. Weed Science 48: 576-587
- Donald, W. W. 1994. Geostatistics for mapping weeds with a Canada thistle (*Cirsium arvense*) path as a case study. Weed Science, 42:648-657
- Everitt, H. J., Alaniz, M. A., Escobar, D. E. & Davis, M. R. 1992. Using remote sensing to distinguish common (*Isocoma coronifolia*) and Drummond goldenweed (*Isocoma drummondii*). Weed Science, 40: 621-628
- Everitt, H. J., Escobar D. E., Villareal, R., Alaniz, M. A., & Davis, M. R. 1993 a. Integration of airborne video, global positioning system and geographic information system technologies for detecting and mapping two woody legumes in rangelands. Weed Technology, 7: 981-987
- Everitt, H. J., Richarson, J. V., Alaniz, M. A., Escobar D. E., Villareal, R. & Davis, M. R. 1994. Light reflectance characteristics and remote sensing of big bend loco (*Astragalus mollissimus* var early) and wooton loco (*Astragalus wootonii*). Weed Science, 42: 115-122
- Fernandez-Quintanilla, C., Barroso, J., Ruiz, D. 2001. Diseño de un programa de tratamientos de precisión para el control de *Avena sterilis* en cereales. Congreso 2001 de la Sociedad Española de Malherbología pp. 183-188
- Goudy, H.J., Bennett, K.A., Brown, R.B., y Tardif, F.J. 2001 Evaluation of site-specific weed management using a direct-injection sprayer Weed Science 49: 359-366
- Heisel, T., Christensen, S. y Walter A.M. 1997 Validation of weed patch spraying in spring barley-preliminary trial. Proc. First European Conference on Precision Agriculture. 759-768
- Horowitz, M. 1973. Spatial growth of *Sorghum halepense*. Weed Research 13: 200-208
- Izquierdo, J., Sans, F.X., Chamorro, L., Recasens, J. 2001 Efecto de la variabilidad espacial de las características del suelo sobre la capacidad competitiva de *Lolium rigidum* en cebada. Congreso 2001 de la Sociedad Española de Malherbología. pp. 157-162
- Jurado-Expósito, M., López-Granados, F., García-Torres, L., García-Ferrer A., Sánchez de la Orden, M. and Atenciano, S. 2002. Spatial variability of multiple complexes in cultivated sunflower Weed Science (submitted)
- Lamb, D.W., Weedon, M.M. Weedon y L.J. Rew. 1999. Evaluating the accuracy of mapping weeds in seedling crops using airborne digital imaging: *Avena* spp. in seedling triticale. Weed Research 39: 481-492
- Luschei, E.C., Van Wyche, L.R., Maxwell, B.D., Bussan, A.J., Buschena, D. y Goodman, D. 2001 Implementing and conducting on-farm weed research with the use of GPS. Weed Science 49: 536-542
- Medlin, C.R., Shaw, D.R., Cox, M.S., Gerard, P.D., Abshire, M.J., y Wardlaw, M.C. 2001 Using soil parameters to predict weed infestations in soybeans. Weed Science 49: 367-374
- NRC (National Research Council). 1997 Precision agriculture in the 21st Century. National Academy Press. Washington D.C. 149 pp.
- Pierce, F.J. y Nowak, P. 1999. Aspects of Precision Agriculture. Advances in Agronomy 67: 1-85
- Plant, R.E. 2001 Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and electronics in agriculture 30: 9-29
- Rew, L.J. y Cousens, R.D. 2001 Spatial distribution of weeds in arable crops: are current research methods appropriate? Weed Research 41 1-18
- Rew J.L., Cussans GW, Muggleston MA, Miller, PCH. 1996. A technique for mapping the spatial distribution of *Elymus repens*, with estimates of the potential reduction in herbicide usage from patch spraying. Weed Research 36: 283-292
- Rew L.J., Lamb D.W., Weedon M.M., Lucas J.L., Medd R.W., Lemerle D., 2001 Evaluating airborne multispectral imagery for detecting wild oats in a seedling triticale crop, 2nd Europ.Conf. on Precision Agriculture (J.V.Stafford Ed.), Odense, Sheffield Press, pp.265-274
- Ruiz, D., Barroso, J., y Fernandez-Quintanilla, C. 2002. Associations among soil properties and winter wild oat (*Avena sterilis* L.) abundance in cereal fields. 12th EWRS Symposium, Arhem/Wageningen
- Senay, G.B., Ward, A.D., Lyon, J.G., Fausey, N.R. y Nokes, S.E. 1998. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. Trans. ASAE 41 489-495.
- Webster, T. M., Cardina, J. & Woods, S. J. 2000. *Apocynum cannabinum* interference in no-till *Glycine max*. Weed Science, 48: 716-719.
- Webster T. M., Cardina, J. & Woods, S. J. 2000b. Spatial and temporal expansion patterns of *Apocynum cannabinum* patches. Weed Science, 48: 728-733.