

Relación entre desarrollo del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento en una parcela de maíz mediante teledetección y SIG

R. López Lozano, M. A. Casterad, J. Herrero-Isern

rlopezl@aragon.es

*Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA).
Avda. Montañana nº 930, 50059 Zaragoza (España).*

Recibido el 20 de noviembre de 2007, aceptado el 8 de febrero de 2008

RESUMEN

La relación entre el desarrollo del cultivo y las características del suelo puede dar criterios de manejo diferenciado de la parcela de cultivo, paso inicial para la agricultura de precisión. En este trabajo se estudia la variabilidad del desarrollo del maíz en una parcela comercial de regadío de 60 ha y su relación con varios rasgos edáficos. La información sobre el cultivo proviene de estimaciones del índice de área foliar a partir de imágenes Quickbird de 2004 y 2005. La de suelos, georreferenciada, consta de medidas de elevación y de sensor electromagnético, así como de determinaciones de conductividad eléctrica en extracto 1:5, granulometría y contenido de K, Na, P y Mg en muestras superficiales. Con la ayuda de un SIG se ha analizado conjuntamente la información procedente de las imágenes de satélite, la cartografía de los rasgos del suelo prospectados en campo, y datos de rendimiento. Ello ha permitido establecer zonas donde interesa intensificar el estudio de suelos y determinar la relación entre variabilidad del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento.

PALABRAS CLAVE: Quickbird, LAI, agricultura de precisión, sensor electromagnético, maíz.

ABSTRACT

The links between crop development and soil parameters constitute a key criterion to plan a distinct management within field crops, what involves the basis to apply precision agriculture techniques. In the present work, the within field variability of crop development is studied in a commercial pivot of about 60 ha of maize, and its relation with different soil parameters and characteristics. Information about crop growth has been extracted estimating leaf area index from Quickbird imagery of 2004 and 2005 years. Information about soil parameters were retrieved from field sampling and georeferenced measurements of elevation, electrical conductivity, granulometry, and the presence of given elements (K, Na, P, Mg). Using an GIS a joint analysis of spatial information provided by satellite imagery, soil maps derived from field measurements and crop yield. This allowed establishing areas within the field to study soil properties more in depth and to determine the links existing between variability in crop development, soil properties and yield.

KEY WORDS: Quickbird, LAI, precision farming, electromagnetic sensor, maize.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la agricultura se está adaptando a la exigencia social de utilización eficiente de los factores de producción, como el agua o los agroquímicos. Se trata tanto de mejorar los resultados de la explotación, como de evitar efectos perjudiciales en el medio ambiente.

La agricultura de precisión es una de las vías para conseguirlo. Para practicar este tipo de agricultura es necesario conocer la variabilidad espacial del comportamiento del cultivo dentro de cada parcela, y sus causas. Ello ayudará a calcular la dosis de cada insumo adecuada a diferentes áreas de la parcela, según las necesidades del cultivo y las características del suelo.

La agricultura de precisión requiere información actualizada y georreferenciada sobre el estado del cultivo. La teledetección puede proporcionar esa información mediante índices de vegetación, estimaciones de parámetros físicos de la vegetación a partir de imágenes de satélite, etc. (Haboudane et al., 2004; Seelan et al., 2003; Moran et al., 1997).

El desarrollo del cultivo está directamente relacionado con las características edáficas, a menudo muy variables dentro de una misma parcela. El conocimiento de la distribución espacial de determinados rasgos edáficos es indispensable para establecer patrones de manejo específico del cultivo dentro de la parcela.

El objetivo del presente trabajo es determinar, a partir de información derivada de imágenes Quickbird, la variabilidad del desarrollo de un cultivo en una parcela comercial y estudiar su relación con diferentes rasgos edáficos y con el rendimiento.

Para ello, a partir de imágenes Quickbird de muy alta resolución espacial se ha cartografiado el índice de área foliar (LAI) en una parcela comercial de maíz. Además se han obtenido, utilizando sistemas de información geográfica (SIG), mapas de algunos parámetros edáficos (conductividad eléctrica, granulometría, etc) que podrían condicionar el crecimiento del cultivo en la parcela.

Finalmente se ha establecido la relación entre el desarrollo del cultivo, información derivada de los mapas de LAI, y los rasgos edáficos, con el fin de caracterizar algunas zonas de la parcela que precisen un manejo diferenciado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

Se estudia una parcela de unas 60 hectáreas de la finca La Bochosa, en el municipio de Esplús (Huesca, España; 41.80° N, 0.27° E). Dicha parcela, regada por aspersión mediante pivot, produce normalmente dos cosechas al año, una de cebada y otra de maíz de ciclo corto.

Pretratamiento de las imágenes de satélite

Se adquirieron 6 imágenes Quickbird: 15 de julio, 10 de agosto y 25 de agosto de 2004; y 18 de julio, 5 de agosto y 23 de agosto del 2005.

Las imágenes se corregieron con una ortoimagen digital de 1 metro de resolución, y se corrigieron ra-

diométricamente utilizando la aplicación ACORN5 (ImSpec, EEUU), algoritmo basado en MODTRAN4 (Anderson et al., 2000) que permite reducir el efecto de la atmósfera.

Cartografía del LAI

El LAI se estimó a partir de relaciones empíricas entre el índice de vegetación NDVI (Rousse et al., 1974) obtenido de las imágenes Quickbird y medidas de LAI en campo. Se eligió el NDVI debido a sus buenos resultados en estas mismas condiciones (López-Lozano y Casterad, 2007).

Medidas in situ de LAI

Para cada uno de los dos años, se eligieron 20 puntos de la parcela mediante un muestreo aleatorio estratificado según el vigor vegetativo del cultivo derivado de imágenes Landsat de los últimos cinco años. Cada uno de esos 20 puntos se señaló en campo, determinándose sus coordenadas a partir de un GPS que permite corrección diferencial en post-proceso (error de localización por debajo de 1 metro).

En fechas próximas a la adquisición de las imágenes de satélite se visitó cada uno de los puntos, tomándose 5 medidas de LAI con un ceptómetro SunScan (Delta-T, RU). Este instrumento permite estimar el LAI de manera indirecta a partir de la radiación fotosintéticamente activa transmitida por la vegetación. La media de las 5 medidas en cada punto fue el valor de LAI considerado representativo del punto.

Obtención de mapas de LAI

Se contó con 118 medidas de LAI en campo, resultantes de 20 medidas en cada una de las seis fechas, con dos de ellas desechadas al ocurrir en esos puntos una presencia masiva de malas hierbas. Estas medidas se dividieron aleatoriamente en 2 grupos.

Un grupo sirvió para establecer el modelo empírico que relaciona índices de vegetación con LAI. Este modelo se aplicó a las imágenes de satélite obteniéndose el mapa de LAI para cada una de las seis imágenes (López-Lozano y Casterad, 2007).

El otro grupo de medidas de LAI en campo sirvió para validar los mapas obtenidos. Para ello se localizaron en estos mapas los 59 puntos restantes, comparándose el LAI real medido en campo con el

estimado por el modelo empírico.

Mapa de rendimiento del cultivo

Asimismo, se dispuso del mapa de rendimiento obtenido por el propietario de la finca durante la cosecha de 2004 con una cosechadora de precisión que registra y georreferencia, mediante GPS con corrección diferencial en tiempo real, la producción de grano en cada punto de la parcela. Dicha información servirá para constatar la relación entre desarrollo del cultivo y rendimiento.

Cartografía de parámetros edáficos

Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) y altitud.

La conductividad eléctrica aparente (CEa) se utiliza para medir diferentes propiedades físico-químicas de los suelos, las cuales pueden estar relacionadas con el rendimiento del cultivo. En la parcela de estudio se cartografió la CEa a partir de las lecturas obtenidas con un sensor electromagnético que registra un campo magnético secundario inducido en el suelo. Este campo secundario es función de la humedad del suelo y de su conductividad eléctrica (McNeill, 1980), a su vez directamente relacionada con la salinidad.

Se hicieron varios miles de lecturas con el sensor electromagnético DualEM (DualEM, EEUU), seleccionándose las lecturas separadas entre sí por unos 20 m. El sensor iba remolcado por un vehículo móvil equipado con GPS y ordenador de a bordo, para georreferenciar las lecturas en tiempo real. Aragüés y Urdanoz (2006) ofrecen detalles sobre este equipo móvil.

Además, en el momento de la siembra se tomaron datos del relieve de la parcela mediante el GPS con corrección diferencial en tiempo real con el que estaba equipada la sembradora. Los mapas de ambas variables se generaron a partir de interpolaciones mediante técnicas geoestadísticas (*kriging*).

Cartografía de otros rasgos edáficos

Otros parámetros edáficos considerados relevantes para explicar el comportamiento de cultivo dentro de la parcela se obtuvieron a partir de un muestreo del suelo. Para ello se delineó una malla ortogonal con una distancia entre puntos de 70 metros. En cada

uno de los puntos de intersección de dicha malla se extrajo una muestra de suelo correspondiente a los primeros 30 centímetros, determinándose en laboratorio: gra-nulometría, conductividad eléctrica en extracto 1:5 suelo:agua y contenidos totales de fósforo, potasio, magnesio, calcio y sodio; todo ello por los métodos del M.A.P.A. (1994). Con esos resultados se generó un mapa de cada variable siguiendo el mismo procedimiento que con CEa y relieve.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Generación y validación de mapas de LAI

La relación establecida entre el LAI y el NDVI es de tipo exponencial:

$$LAI = a * \exp^{b*IV}$$

donde a y b son parámetros ajustados por mínimos cuadrados y IV es el valor del índice de vegetación (Figura 1).

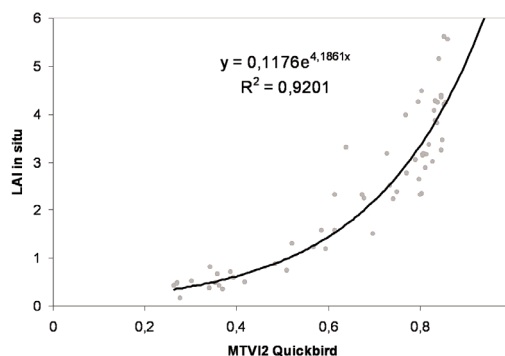


Figura 1. Relación y modelo de ajuste entre NDVI extraído de las imágenes Quickbird y el LAI medido en campo.

Existe una clara relación entre el NDVI y el LAI en las condiciones del presente estudio, como lo indica el alto coeficiente de regresión que se obtienen ($r^2 > 0,92$).

Los resultados de la validación de la cartografía de LAI generada a partir de la ecuación (1) aparecen en la Figura 2. El error cuadrático medio obtenido (RMSE) es de 0,49, ajustándose los puntos a la recta 1:1. Hay un punto cuyo alto valor de LAI (> 6) resulta infraestimado. En ese punto, la presencia de malas hierbas –cuya arquitectura es distinta a la del maíz– puede explicar el mal ajuste al modelo.

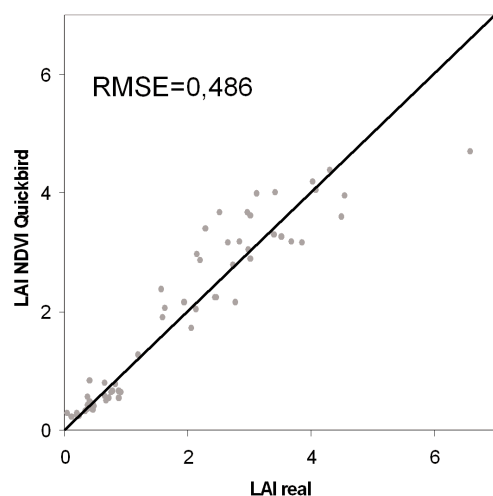


Figura 2. RMSE y diagrama de dispersión para los mapas de LAI obtenidos a partir del NDVI.

Relación del LAI con la producción

La Figura 3 muestra la relación entre el mapa de LAI del 10 agosto de 2004 y el de producción final en grano para esa misma campaña. Como puede apreciarse, existe una relación directa entre el LAI cartografiado y la producción: conforme el LAI alcanza valores más altos la producción aumenta. Las zonas de la parcela con $LAI < 2$ son las de producción inferior a la media.

A partir de los mapas de LAI obtenidos se puede por tanto delimitar aquellos sectores de la parcela en los que la producción va a ser inferior o superior a la media, y por tanto, aquellas zonas en las que van a existir problemas en el desarrollo del cultivo.

Variabilidad espacial y temporal del LAI

Como se ve en la Figura 4, el desarrollo del maíz no es igual en todo el pivot. Además, el patrón de distribución de dicho desarrollo varía entre las campañas agrícolas de 2004 y 2005. Es en las imágenes de principios de agosto cuando más se evidencia este hecho. En las de julio el cultivo se encuentra en un estado de desarrollo en el que la cobertura del suelo no es grande. En las imágenes de finales de agosto, el maíz ya ha alcanzado el pleno desarrollo cubriendo la superficie del suelo, siempre y cuando no haya ningún problema que afecte al desarrollo del cultivo. Si bien hay zonas con problemas de desarrollo en ambos años, se aprecian otras donde el LAI tiene valores muy diferentes en las dos campañas estudiadas.

Con objeto de delimitar las áreas con diferente comportamiento del cultivo según el año, se hizo una clasificación no supervisada conjunta para los mapas de LAI del 10 de agosto de 2004 y del 5 de agosto de 2005, mapas en los que como ya se ha indicado mejor se manifiestan las diferencias de desarrollo entre zonas de la parcela. Como resultado de esta clasificación se obtuvieron cuatro clases (Figura 4).

La clase A incluye las zonas con escaso desarrollo del cultivo en ambas campañas. La clase D incluye las zonas donde el desarrollo del cultivo es alto en ambas campañas. La clase B corresponde a los sectores de la parcela donde el desarrollo del cultivo fue normal en 2004 y bajo en 2005, áreas ubicadas fundamentalmente en la zona este de la parcela. En la

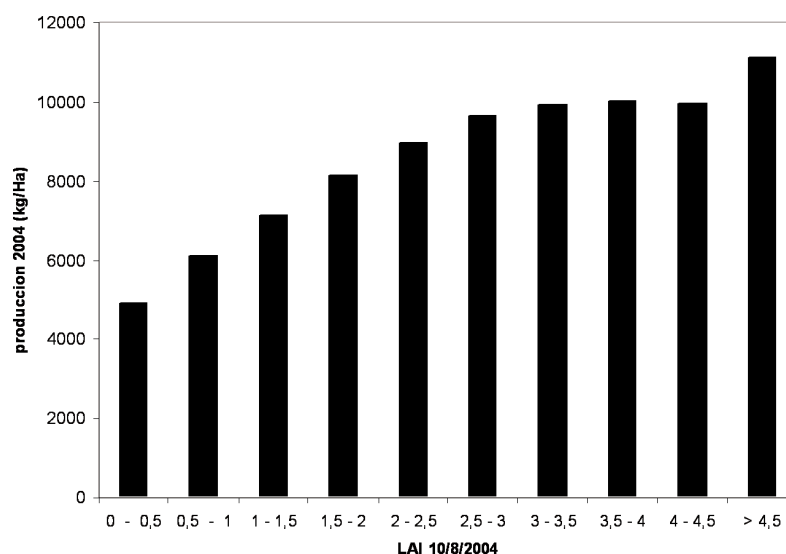


Figura 3. Producción media en 2004 para 10 intervalos del LAI estimado a partir de la imagen del 10 de agosto de 2004.

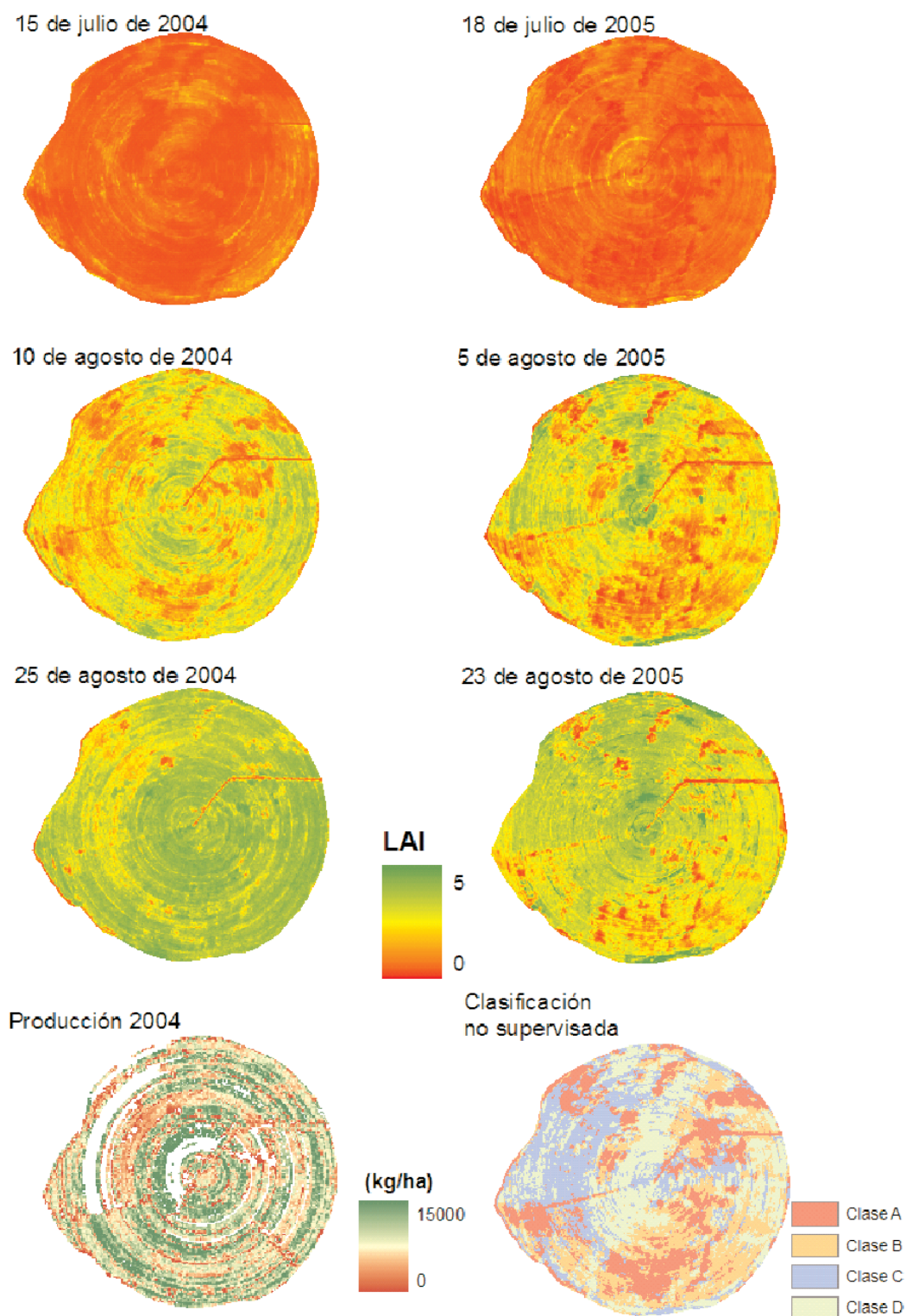


Figura 4. Mapas de LAI generados a partir de las imágenes Quickbird de 2004 y 2005, producción para el año 2004 y clasificación no supervisada a partir de los mapas de LAI del 10 de agosto de 2004 y 5 de agosto de 2005.

clase C el desarrollo del cultivo en 2005 fue superior al de 2004, situación inversa a la descrita para la clase B.

El diferente comportamiento del cultivo en 2004 y 2005 puede deberse a la distinta pluviometría en estos años: 476 mm para el año hidrológico 2003-2004 y 244 mm para el 2004-2005 (Oficina del Regante, 2007). En este último año, la escasez de agua en la región provocó importantes restricciones que impidieron un riego adecuado de la parcela.

Relación entre desarrollo del cultivo y parámetros del suelo

La información recopilada pone de manifiesto las importantes diferencias en algunos rasgos edáficos dentro de la parcela. Como puede observarse en la Figura 5 la variabilidad en el desarrollo del cultivo coincide en buena medida con la distribución de algunas de las propiedades edáficas.

Los sectores de la parcela con desarrollo del cultivo bajo en ambos años (Figura 4) corresponden generalmente con zonas donde la conductividad eléctrica aparente es mayor (Figura 5). A partir de una CEa de 0,5 dS/m la producción disminuye considerablemente (López-Lozano y Casterad, 2007).

Además, la alta conductividad eléctrica coincide a su vez con muchas de las zonas con alto contenido de sodio. Los suelos sódicos o salino-sódicos pueden suponer un impedimento para el desarrollo normal del cultivo, debido por un lado al efecto tóxico del sodio en la planta, y por otro a los efectos del sodio sobre la dispersión de las arcillas, que puede ocasionar problemas de infiltración y de nascencia del cultivo.

El magnesio tiene una distribución en la parcela similar al sodio. Las zonas de la clase A (Figura 4) – problemas persistentes en el desarrollo del cultivo – tienen un contenido de magnesio medio-alto (Figura 5), asociado a la salinidad. Sin embargo no se ve una relación clara entre la distribución del calcio, fósforo y potasio en la parcela y el desarrollo del cultivo. El calcio, abundante en estos suelos, no es limitante de la producción, pero sí lo son el fósforo y el potasio aportados por el abonado y cuyas concentraciones más altas se localizan en el suroeste de la parcela. Este hecho debería tenerse en cuenta al diseñar futuros abonados de precisión.

La granulometría (proporción de arena y arcilla) también varía de una zona a otra de la parcela (Figura 5). En general, las zonas de producción alta corresponden con las topográficamente más elevadas

en las que dominan materiales gruesos. Las de menor producción tienden a localizarse en áreas más bajas con predominio de arcillas y a menudo con tendencia a encharcarse (López-Lozano y Casterad, 2007).

En la zona sureste de la parcela, identificable con la clase B, el cultivo tiene peor desarrollo en 2005 (año seco) que en 2004. Ello es explicable por la baja capacidad de retención de agua de los suelos franco-arenosos que predominan en este sector de la parcela. Otra zona con en la que predominan materiales gruesos se encuentra en la parte norte del pívot, pero a diferencia de la anterior, comprende zonas de desarrollo alto, medio y bajo del cultivo. En este sector norte de la parcela el desarrollo del cultivo parece seguir más los patrones de la concentración de sodio. Por su parte las zonas franco-arcillosas presentan problemas en el desarrollo del cultivo, bien en ambos años o bien en 2004, cuando el aporte de agua fue superior. Una de estas zonas, que atraviesa la parcela de norte a sur, se corresponde con la mayor parte de la clase A de la clasificación no supervisada; esta zona a su vez, tiene elevadas concentraciones de sodio, evidenciando una relación entre ambos rasgos edáficos en dicha zona.

Otras zonas con importante presencia de materiales finos en la parte oeste de la parcela aparecen circunscritas a la clase C, con desarrollo bajo en 2004 y alto en 2005. Ello puede deberse a la menor disponibilidad de agua en 2005, que habría evitado los encharcamientos a menudo asociados a suelos de este tipo. Deberá considerarse la aplicación de dosis de riego diferenciadas, “riego de precisión” para evitar encharcamientos y conseguir un desarrollo del cultivo más homogéneo. Del mismo modo se puede actuar con el abonado, mediante fertirrigación o mediante abonadora de precisión, para optimizar la distribución espacial de los fertilizantes.

CONCLUSIONES

Mediante imágenes Quickbird se ha conseguido describir la variabilidad del desarrollo del maíz en una parcela a partir de estimaciones del índice de área foliar del cultivo. Esta información ha permitido diferenciar dentro de la parcela sectores con comportamiento diferente en cuanto a desarrollo del cultivo.

Se ha constatado que las estimaciones de LAI en 2004 guardan relación con la producción de grano, mostrando la utilidad de las imágenes Quickbird para pronosticar diferencias de rendimiento dentro

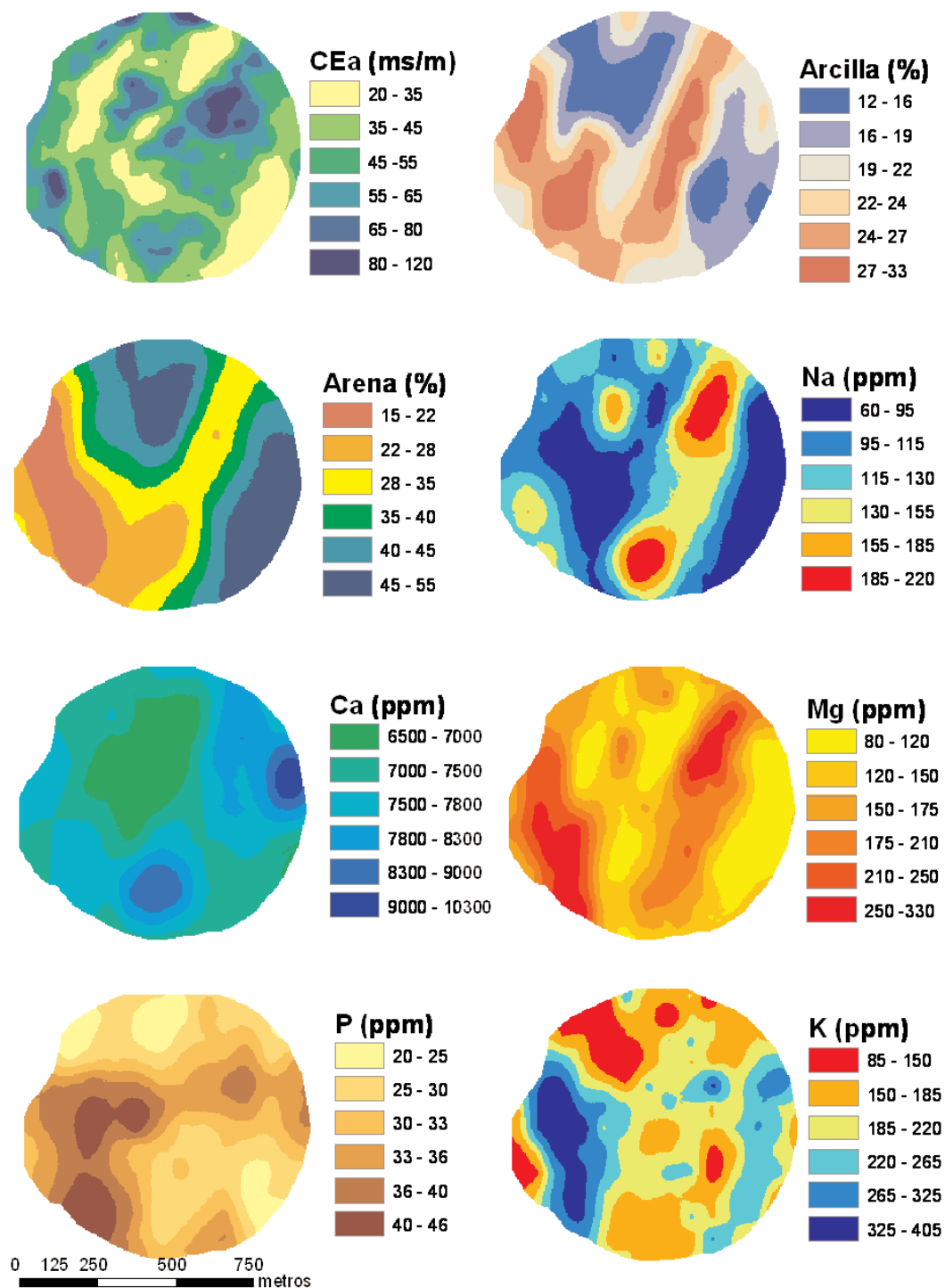


Figura 5. Mapas de rasgos edáficos generados a partir del análisis de muestras puntuales.

de una parcela.

Las anomalías en el desarrollo de cultivos se han podido relacionar con características del suelo (conductividad eléctrica aparente, contenido de sodio y granulometría) mediante el análisis conjunto de los mapas de LAI y los mapas de los rasgos edáficos.

Todo ello resalta la utilidad de los sistemas de información geográfica y de la teledetección en el diagnóstico del cultivo y en la delimitación de zonas dentro de una parcela agrícola. Esto constituiría el paso previo para implementar un manejo diferencial dentro de la parcela.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un resultado del proyecto INIA RTA2005-00230 y no habría sido posible sin la colaboración de D. Sixto Jaime Rifer, propietario de la Finca La Bochosa. El primer autor disfrutó de una beca predoctoral INIA.

REFERENCIAS

- ANDERSON, G.P., BERK, A., ACHARYA, P.K., MATTHEW, M. W., BERNSTEIN, L. S., CHET-WYND, J. H., DOTHE, H., ADLER-GOLDEN, S. M., RATKOWSLI, A. J., FELDE, G. W., GARDNER, J. A., HOKE, M. L., RICHTSMEIER, S. C., PUKALL, B., MELLO, J. y JEONG, L. S. 2000: "MODTRAN4: Radiative transfer modeling for remote sensing" en CHEN, S. S y DESCOUR, M. (Ed.): *Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI, Proceedings of SPIE*, 2000, Vol. 4049: 176-183.
- ARAGÜÉS, R. y URDANOZ, V. 2006. Nuevas técnicas para la medida rápida y sencilla de la salinidad del suelo. *Surcos de Aragón*, 2003, Vol. 98, 30-35.
- HABOUDANE, D., MILLER, J. R., PATTEY, E., ZARCO-TEJADA, P. J. y STRECHEN, I. B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies. Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 90, 337-352.
- LÓPEZ-LOZANO, R. y CASTERAD, M.A. 2007. Estimación del estado de desarrollo del maíz con imágenes de muy alta resolución espacial. *7ª Semana Geomática*. Barcelona, 2007. 9 pp.
- M.A.P.A. 1994. *Métodos oficiales de análisis. Tomo III*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 1994, 662 pp.
- MCNEILL, J. D. 1980. *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6*. Geonics Limited. Canada, 1980. 15 pp.
- MORAN, M. S., INOUE, Y. y BARNES, E. M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 61, 319-346.
- OFICINA DEL REGANTE. 2007. <http://oficinaregante.aragon.es>, Departamento de Agricultura. Gobierno de Aragón, consultado en mayo 2007.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. y DEERING, D.W. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt, 1974, 3010-317.
- SEELAN, S. K., LAGUETTE, S., CASADY, G. M. y SEIELSTAD, G. A. 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 88, 157-169.