

Nota científica

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO EN CEREALES DE INVIERNO MEDIANTE MAPAS DE RENDIMIENTO Y EL ÍNDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) EN EL SUDOESTE BONAERENSE, ARGENTINA

Scientific communication

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF WINTER CEREALS BY YIELD MAPS AND THE NORMAL DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI) IN THE SOUTH WEST AREA OF BUENOS AIRES, ARGENTINE

Cristian Carlos Zajac¹, Adrián Gustavo Vallejos^{1*}, Eric Emanuel Zajac¹, y Juan Galantini¹.

¹ Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía, San Andrés 800, Bahía Blanca 8000, Argentina.

* Autor para correspondencia: E-mail: avallejo@criba.edu.ar

RESUMEN

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) combinados con monitores de rendimiento (MOR) proporcionan la oportunidad de mapear los rendimientos durante la cosecha. Las imágenes provenientes del sensor MODIS (MOD 13 Q1) podrían ser utilizadas en agricultura de precisión (AP). Resulta interesante evaluar las relaciones existentes entre los mapas de rendimiento (MR) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en cereales de invierno en el Sudoeste Bonaerense (SOB), con la intención de aportar datos experimentales iniciales que permitan investigaciones futuras aplicadas a la AP. Para ello se planteó como objetivos: a) Realizar el filtrado de los datos provenientes de cosechadoras equipadas con GPS y MOR para obtener MR; b) Determinar NDVI para fechas próximas a floración en trigo y cebada en el área experimental; c) Identificar áreas con variaciones en el rendimiento con datos provenientes de la campaña de trigo y cebada 2010; d) Correlacionar los MR y las imágenes NDVI. El ensayo se realizó en dos lotes ubicados en el partido de Coronel Dorrego. Se utilizaron cultivos de trigo para pan (*Triticum aestivum*) y cebada cervecera (*Hordeum distichum*) bajo el sistema de siembra directa. Se encontró una regresión significativa entre los valores de MR y el NDVI con un r^2 de 0,84 y 0,75, respectivamente, de forma que en situaciones que no exista disponibilidad de MR podrían utilizarse los NDVI para suplantarlas. Se lograron identificar cinco zonas con variaciones importantes del rendimiento en trigo y cebada en el área experimental.

Palabras clave: agricultura de precisión, monitores de rendimiento, sensor MODIS, trigo, cebada.

ABSTRACT

The emergence of global position systems (GPS) combined with yield monitors (MOR) provide the opportunity of mapping yield during harvesting. The images from the MODIS sensor (MOD 13 Q1) could be used in precision agriculture (AP). It is interesting to evaluate the relationship between yield maps (MR) and normalized difference vegetation index (NDVI) in winter cereals in the SW of Buenos Aires (SOB), in order to provide preliminary experimental data for future research on AP. The objectives of this study were: a) To filter data collected from combine harvesters equipped with GPS and MOR in order to obtain MR; b) To determine NDVI for dates close to flowering in wheat and barley in the experimental area; c) To identify areas with variations in wheat and barley yield based on data collected from season; d) To correlate MR and NDVI images. The study was conducted in two fields located in the district of Coronel Dorrego. Crops of bread wheat (*Triticum aestivum*) and

malting barley (*Hordeum distichum*) cultivated under direct planting system were used. A significant regression was observed between MR and the NDVI with r^2 values of 0.84 and 0.75, respectively, so that in situations when MR were not available, the NDVI could be used. Five areas with important variations in wheat and barley yield were identified in the experimental area.

Key words: precision agriculture, yield monitors, MODIS sensor, wheat, barley.

INTRODUCCIÓN

Desde fines de la década de los noventa las explotaciones agropecuarias argentinas han tenido importantes cambios en sus sistemas productivos, con la gradual implementación de la llamada agricultura de precisión (AP) y el manejo por sitio específico (SE). La difusión de esta tecnología en Argentina comenzó con el lanzamiento del Proyecto de Agricultura de Precisión del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Manfredi en Córdoba (Bragachini et al., 2006).

La aparición de sistemas de posicionamiento global (GPS) precisos y relativamente económicos, combinados con monitores de rendimiento (MOR), proveen la oportunidad de grabar y mapear instantáneamente los rendimientos de los cultivos durante la cosecha.

Conceptualmente los mapas de rendimiento (MR) constituyen una representación cualitativa y cuantitativa de la variabilidad espacial del rendimiento. Poseen formato vectorial, donde los datos se representan utilizando puntos o polígonos y un sistema de coordenadas x , y (cartesiano), donde cada punto de un mapa posee coordenadas y una cantidad de información asociada (flujo de cultivo, humedad, velocidad, productividad, rendimiento, ancho de labor, etc.).

Hilbert et al. (2002) mencionaron que se han realizado escasas experiencias de la utilización de la AP en experimentos clásicos de investigación a campo en Argentina, y comenta que la exactitud de los MR resulta muy importante en la implementación de estrategias efectivas y precisas de mapeo, en especial cuando se pretende su utilización en tareas de investigación en parcelas de campo.

En ensayos realizados por Hilbert et al. (2002) en cultivo de trigo en la localidad de San Antonio de Areco, provincia de Buenos Aires, Argentina, encontraron altas correlaciones ($r^2 = 91,6\%$, para un nivel de confianza del 99%) entre los valores obtenidos por parcela y datos suministrados por una cosechadora equipada con MOR y GPS.

En el Sudoeste Bonaerense (SOB) la adopción de la AP no ha sido cuantificada y sólo productores innovadores son los usuarios de la misma, de ahí el interés de conducir mayores estudios zonales para determinar la capacidades reales de adopción y dilucidar inconvenientes técnicos surgidos de la implementación de la AP. Aunque

en zonas agroecológicas más propicias para el desarrollo del cultivo de trigo como Tandil (Bragachini et al., 2007), y cebada en Tres Arroyos (Méndez et al., 2010), han obtenido resultados promisorios en sus ensayos aplicando AP en ambos cultivos.

Kruger et al. (2005) mencionan que las condiciones edafoclimáticas en el SOB determinan que los sistemas de producción sean predominantemente mixtos, y que los cereales de invierno sean la alternativa casi excluyente para gran parte de la agricultura regional; tal vez por este motivo la AP no ha tenido mucha difusión en la región. Además durante la secuencia de cultivos forrajeros, no es posible seguir recolectando datos de MOR. En estas situaciones la utilización de imágenes satelitales sería una herramienta valiosa para suplir la falta de MR.

La utilización de sensores remotos en el SOB resulta interesante en la determinación del rendimiento en cultivos de invierno; algunos autores como Boca y Rodríguez (2012) mencionan que en el futuro habrá un incremento en el uso de imágenes derivadas de sensores remotos, ya que se espera que varios sistemas ópticos de alta resolución sean puesto en funcionamiento, lo que redundará en mayores resoluciones, disponibilidad, variedad y menor costo.

La teledetección satelital brinda conocimiento del territorio, permite el monitoreo de fenómenos ambientales, inventariar recursos naturales y determinar áreas afectadas por fenómenos climáticos (Occhiuzzi et al., 2011).

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un radiómetro hiperspectral montado en los satélites Terra/Aqua, con resolución temporal de 1 a 2 días, 36 canales entre el visible y el infrarrojo térmico, barrido de 2330 km (USGS, 2013).

González et al. (2008) citan que mediante algoritmos la NASA ha generado a partir de las imágenes MODIS distintos productos. Uno de ellos es el MOD 13 Q1 que está compuesto por 12 bandas, de las cuales la 1 corresponde al NDVI, con resolución temporal de 16 días y espacial de 250 m.

Otros autores como Paruelo (2008) mencionan que varios índices espectrales han sido propuestos como estimadores de la presencia y condición de la vegetación (Fensholt et al., 2004), sin embargo el NDVI ha sido y es el más usado.

El NDVI se calcula como:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{IR}-\text{R})}{(\text{IR}+\text{R})}$$

donde R e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja e infrarroja del espectro, respectivamente.

El NDVI ha mostrado tener una fuerte relación con la biomasa (Sellers, 1985), el índice de área foliar (Baret et al., 1989) y la productividad primaria neta aérea (Parelo et al., 1997). Occhiuzzi et al. (2011) señalan que los índices de vegetación desarrollados en base a datos capturados por plataformas MODIS son un típico producto de uso en el sector agropecuario.

En el SOB, Marini (2008) analizando la variación anual del NDVI para lotes (potreros) representativos de "cultivos de invierno" (trigo), observó que a fines de abril los lotes se encontraban laboreados, lo que se tradujo en bajos índices. Durante las etapas de floración y espigazón (noviembre) se alcanzaron valores cercanos a 0,80. A fines de diciembre el NDVI desciende como consecuencia de la etapa de madurez fisiológica y la cosecha del cultivo. En marzo y abril del año siguiente, el suelo presentó residuos del cultivo o mostró altos índices. Esta última condición obedece generalmente a la incorporación de un cultivo forrajero de invierno (avena), con lo que puede hablarse de uso mixto agrícola-ganadero en tales lotes.

Farrell y Rivas (2008) concluyeron mediante su trabajo que el momento óptimo para estimar el rendimiento en girasol, a partir del producto MODIS TERRA Vegetation indices 16 day (L16 day - L3 global -250 m SIN GRID V 005) es a inicios de floración y mitad de antesis.

A partir de la bibliografía discutida y la insuficiente información científica disponible en la región es importante evaluar las relaciones existentes entre los MR y las imágenes NDVI para trigo y cebada cervicera en el SOB, con la intención de aportar datos experimentales iniciales que permitan investigaciones futuras aplicadas a la AP.

Los objetivos de esta investigación fueron: a) Realizar el filtrado de los datos provenientes de cosechadoras equipadas con GPS, MOR y obtener los MR; b) Determinar NDVI para fechas próximas a floración en trigo y cebada en el área experimental; c) Separar áreas con variaciones en el rendimiento con datos provenientes de la campaña de trigo y cebada 2010; y d) Correlacionar los MR y las imágenes NDVI.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en lotes pertenecientes a dos establecimientos agropecuarios (38°52'4.56" S, 61°4'18.14" O y 38°37'22.75" S, 61°7'32.54" O)

ubicados en el partido de Coronel Dorrego, Argentina. Los cultivos utilizados fueron trigo para pan (*Triticum aestivum*) y cebada cervicera (*Hordeum distichum*) bajo el sistema de siembra directa (SD), con una superficie cosechada de 85,37 y 80,16 ha, respectivamente, en la campaña (temporada) 2010.

El clima es templado subhúmedo seco a subhúmedo húmedo con marcada influencia marítima. La precipitación media anual de 669 mm (serie 1893-2003), con incremento sostenido en los valores de precipitación media a partir de fines del década de los setenta. La temperatura media anual es de 14,5°C, máximos en verano de 41,5°C y mínimos de -7°C en invierno, periodo de heladas entre fines de marzo hasta principios de noviembre (Paoloni et al., 2005).

Los suelos fueron clasificados según USDA (1999) como Argiustol típico, fino, ubicado en lomas del paisaje ondulado, desarrollados en pendientes suaves, donde se observa manchones producidos por tosca aflorante o apenas subsuperficial. Poseen perfil desarrollado y una profundidad media de 107 cm con secuencia de horizontes A1-B2t-B3-C. Son suelos bien drenados, sin alcalinidad y salinidad. El espesor del A1 es de 27 cm y la textura franca con tenor de carbono orgánico de 2,14% (INTA 1989).

Durante la trilla (cosecha) de trigo y cebada en 2010 se procedió a compilar los datos provenientes de una cosechadora (CASE NH ® 2399, Curitiba, Paraná, Brasil) equipada con GPS y MOR, se descargaron los datos de rendimiento y se realizó "el filtrado" mediante el software AFS versión 9,5 de CASE, utilizando el algoritmo propuesto por (Simbahan et al., 2004). Excluyendo datos por el rendimiento biológico e interpolando mediante distancia inversa ponderada (distancia máxima 22,86 m y razón de la distancia 0,4), agrupando los mismos según puntos iguales, para la confección de los MR en las áreas experimentales. Se generaron cinco rangos de rendimiento mediante software de sistemas de información geográfico (SIG) de a 0,50 ton ha⁻¹ en ambos cultivos.

Seguidamente se obtuvo el producto MOD 13 Q1 del sitio EOS DATA GATEWAY de NASA (Torres, 2010) vía ftp para la fecha 16/11/2010 seleccionándose la banda 1 (NDVI) por su proximidad con la floración de trigo y cebada, aproximadamente segunda quincena de noviembre en la zona donde se realizó el estudio (partido Coronel Dorrego).

Este producto se importó posteriormente a un software de procesamiento de imágenes satelitales donde se cambió la extensión a *.tiff, asignándoles coordenadas geográficas y datum (WGS 84) exportándose luego a un SIG, para obtener los valores de NDVI. Una vez ingresada la imagen al

SIG se obtuvieron los valores de NDVI, utilizando únicamente aquellos pixeles incluidos en las áreas cosechadas.

Posteriormente se realizaron regresiones entre los MR (trigo, cebada) y los NDVI proveniente de imágenes satelitales (MOD 13 Q1) en busca de posibles interrelaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla N° 1 se detalla el análisis estadístico del MOR para trigo pan y cebada cervecera, datos crudos y filtrados, su formato vectorial, el número de observaciones, la media, mediana, máximos y mínimos, desvío standart (DS) y coeficiente de variación (CV).

Comparando datos crudos y filtrado se observa una disminución en el DS de 0,23 para el trigo y 0,36 para la cebada, en cuanto al CV la reducción fue del 11 y 8 puntos porcentuales tanto para trigo y cebada dadas las condiciones particulares del ensayo.

A partir de los datos analizados del MOR según la metodología descrita en Materiales y Métodos se generaron los MR indicados en la Fig. 1.

En la Fig. 2 se pueden observar los valores NDVI para la fecha 16/11/2010 obtenidos de la imagen MOD 13 Q1 superpuestos a los mapas de rendimientos en el área de estudio.

En la Fig. 3 se observan los resultados experimentales obtenidos luego de realizar las regresiones entre los MR (trigo, cebada) y el NDVI con un r^2 de 0,84 y 0,75 (error 0,0186; 0,0772, gl. 4) respectivamente, para un nivel de confianza de 0,95, lo que indica una alta correlación entre las variables estudiadas.

En este trabajo se lograron identificar 5 áreas con rendimiento diferenciales tanto para trigo como para cebada en el área experimental (Fig. 1), si bien la información para la identificación de los sitios sería limitada dado que corresponde a un solo año, Ping y Dobermann (2005) mencionan la utilidad del MR de un solo año

para identificar posibles causas de la variación del rendimiento, no obstante reconocen su limitación para la toma de decisiones en el mediano o largo plazo como pueden ser el manejo por SE.

Los resultados preliminares obtenidos permitirían la utilización complementaria de imágenes MOD 13 Q1 (NDVI) y MR en el estudio de variables biológicas y edáficas en el partido de Coronel Dorrego, aunque habría que intensificar los esfuerzos en realizar estudios futuros que corroboren lo mencionado, validando en el tiempo y espacio los resultados obtenidos.

Sería interesante evaluar simultáneamente en el tiempo MR provenientes de cosechadoras e imágenes NDVI (MOD 13 Q1) con el objetivo de analizar la dinámica fenológica de los cultivos invernales y determinar la heterogeneidad ambiental en base a estos recursos disponibles, para realizar posteriormente manejo SE en agroecosistema zonales.

CONCLUSIONES

Se lograron identificar cinco zonas con variaciones importantes del rendimiento de trigo y cebada cervecera en el área experimental a partir de los MR.

Se encontraron regresiones significativas entre los MR y los valores de NDVI con un r^2 de 0,84 y 0,75, respectivamente, de forma que en situaciones que no exista disponibilidad de MR podrían utilizarse los NDVI para reemplazarlos.

LITERATURA CITADA

- Baret, F., G. Guyot, and D. Major. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria* 43:241-256.
- Boca R., T., y G.R. Rodríguez. 2012. *Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos*. Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.
- Bragachini, M., A. Méndez, A. Saavedra, F. Sca-

Tabla 1. Análisis estadístico del MOR para ambos cultivos.

Table 1. Statistical analysis from the MOR for both crops.

Cultivo	Dato	Formato	Nº de obs.	Media	Mediana	Mín.	Máx.	DS	CV
				-----Mg ha ⁻¹ -----					%
Trigo para pan	Crudo	Punto	26.187	2,19	2,21	0,34	11,55	0,65	30
	Filtrado	Polígono	70,00	2,19	2,17	1,33	3,01	0,42	19
Cebada cervecera	Crudo	Punto	29.092	3,93	4,06	0,27	9,97	0,85	21
	Filtrado	Polígono	85,00	3,81	3,91	2,76	4,70	0,49	13

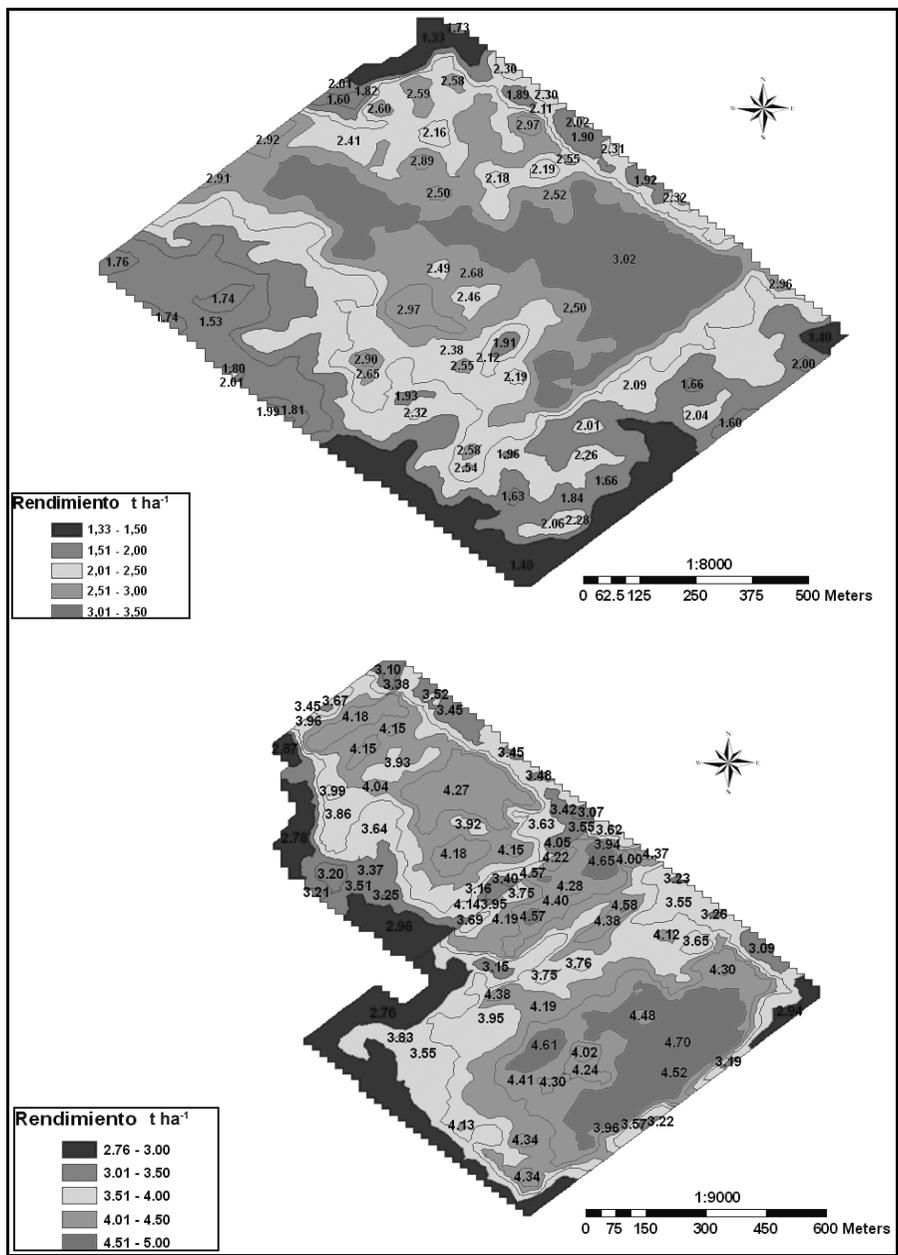


Fig. 1. Rendimiento en trigo (superior) y en cebada cervecera (inferior).
 Fig. 1. Yield in wheat (above) and in malting barley (below).

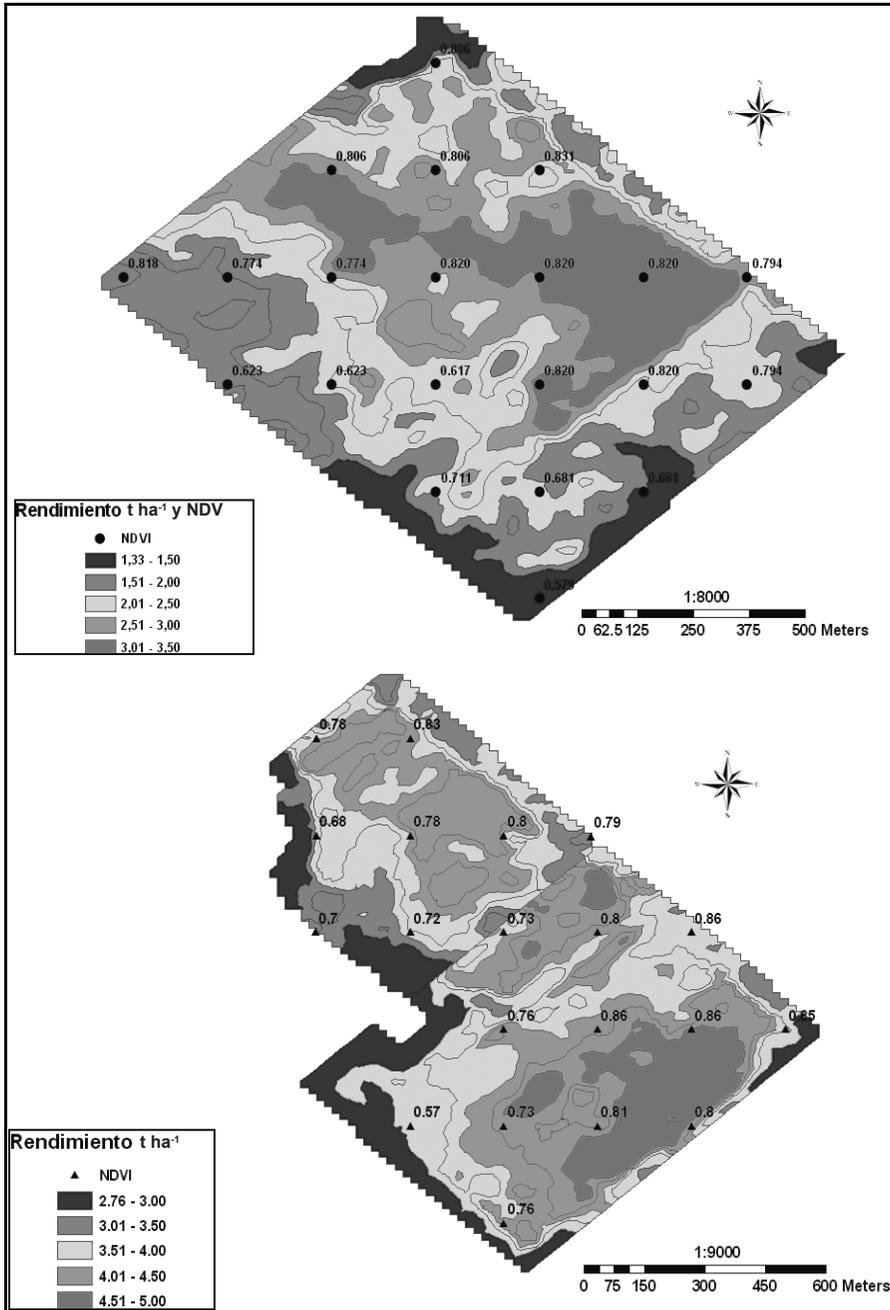


Fig. 2. Rendimientos en cereales de invierno y valores NDVI superpuestos en el área experimental.

Fig. 2. Yield in winter cereals and NDVI values superposed in the experimental area.

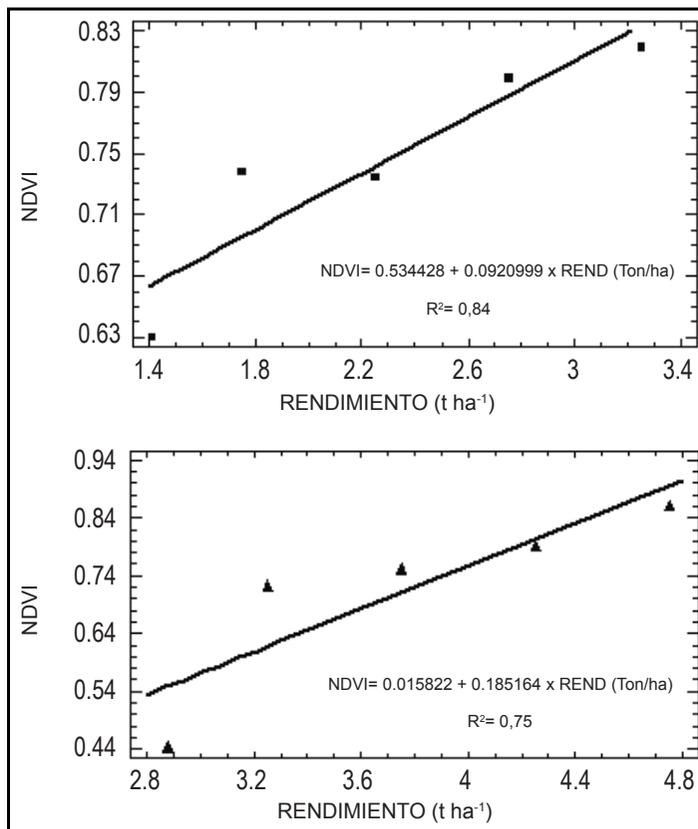


Fig. 3. Regresiones entre el rendimiento en trigo (superior), cebada cervecera (inferior) y NDVI en la zona de estudio.

Fig. 3. Regressions between wheat yield (above), malting barley yield (below) and the NDVI in the study area.

ramuzza, y F. Proietti. 2006. La Agricultura de Precisión en Argentina. Presente y Futuro. 6° Curso de Agricultura de Precisión: hacia una Agricultura Sustentable. 25 al 27 de julio de 2006. INTA E.E.A. Manfredi, Córdoba, Argentina.

Bragachini, M., A. Méndez, F. Proietti, D. Villarroel, J. Otermín, y H. Woycik. 2007. Agricultura de Precisión. Hacia el manejo de la calidad de granos en el cultivo de trigo (Tandil, Provincia de Buenos Aires) p. 53-57. En Trigo 2007. Boletín de Divulgación Técnica N° 1. Ediciones INTA. E.E.A. Manfredi, Córdoba, Argentina.

Farell, M., y R. Rivas. 2008. Relación entre índices de vegetación provenientes de imágenes MODIS y el rendimiento en girasol en el área centro de la Pampa, Argentina. p. 183-184. En XII Reunión Argentina de Agrometeorología. 8 al 10 de octubre de 2008. Asociación Argentina de Agrometeorología (A.A.D.A.), San Salvador de Jujuy, Argentina.

Fensholt, R., I. Sandholt, and M.S. Rasmussen.

2004. Evaluation of MODIS LAI, FAPAR and the relation between FAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. Remote Sensing of Environment 91:490-507.

González, L., P. Paredes, y P. Rial. 2008. Severidad de la sequía en Santa Cruz: evaluación a través de índices de vegetación de imágenes MODIS. En B.G. Díaz y P. Calviño (Comp.) Jornadas Regionales de Información Geográfica y Ordenamiento Territorial. Ministerio Secretaría General de la Gobernación, proyecto SIT, Santa Cruz, Argentina.

González, L., y V. Torres. 2010. Monitoreo de la condición de la vegetación en Santa Cruz y Tierra del Fuego, a través de índices de imágenes MODIS. INTA, Laboratorio de Teledetección y SIG, E.E.A. Santa Cruz, Argentina.

Hilbert, J.A., F. Mousseigne, M.D. Ocampo, M.O. Aucanán, e I. Puentes. 2002. Aplicación del monitoreo de rendimiento en trabajos de investigación a campo. Instituto de Ingeniería Rural, INTA, Hurlingham, Argentina.

- Kruger, H., R. Agamennoni, y M. Ripoll. 2005. Siembra directa de trigo en el sur de la región Semiárida Pampeana. 15 p. Boletín Técnico N° 14. INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Bahía Blanca, Argentina.
- Marini, F. M. 2008. El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Sierras de la Ventana (Buenos Aires, Argentina). Investigaciones Geográficas N° 47:111-121.
- Méndez, A., D. Villarroel, J. Massigoge, y J. Vélez. 2010. Análisis del rendimiento y la calidad de la cebada cervecera en función de la profundidad de tosca en el perfil del suelo. En IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola – CLIA 2010. XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2010. 25-29 de Julho 2010. Ed. CLIA/CONBEA, Vitória - ES, Brasil.
- Occhiuzzi S., E., P. Mercuri, y C. Pascale. 2011. Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario. 130 p. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Buenos Aires, Argentina.
- Paoloni, J.D., Gonzáles Uriarte M. y M.E. Sequeira. 2005. Geoambiente y evaluación de las aguas freáticas del partido de Coronel Dorrego (Pcia. de Buenos Aires). 108 p. Editorial de la Universidad Nacional del Sur (EdiUNS), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas 17(3):4–22.
- Paruelo, J.M., H.E. Epstein, W.K. Lauenroth, and I.C. Burke. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. Ecology 78:953–958.
- Ping, J.L., and A.R. Dobermann. 2005. Processing of yield map data. Precision agriculture 6. p. 193–212. Available at <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/365/> (Accessed 21 May 2013).
- Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. International Journal of Remote Sensing 6:1335–1372.
- Simbahan G.C., A. Dobermann, and J.L. Ping 2004. Site-specific management. Screening yield monitor data improves grain yield maps. Agron. J. 96:1091–1102.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. 525 p. Instituto de Suelos. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- USDA. 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpretation soil surveys. 2nd. ed. Agriculture Handbook N° 436. Natural Resources Conservation Service, Washington D.C., USA.
- USGS. 2013. Land Processes Distributed Active Archive Center. Available at https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview (Accessed 07 Febrero 2013).