

EFECTO DE LAS PRECIPITACIONES Y LAS CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS EN EL ANÁLISIS DE LA SEPARABILIDAD ESPECTRAL DE GIRASOL, MAÍZ Y SOJA

Effect of Precipitation and Soil Characteristic on Analysis of Spectral Separability in Sunflower, Corn and Soybeans

Mauricio Farrell^{1,‡} y Raúl Rivas²

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue analizar la separabilidad espectral entre cultivos teniendo en cuenta el efecto de las precipitaciones y las características del suelo sobre el desarrollo y crecimiento de los cultivos. El trabajo se realizó en la provincia de La Pampa, Argentina con datos de muestras de girasol, maíz y soja de las campañas agrícolas 2000-2003. Las diferentes campañas fueron seguidas con sensores remotos a partir de la información captada por los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) mediante análisis multitemporal de imágenes de satélite MODIS. Los datos fueron tratados como mediciones repetidas en el tiempo. Los resultados indican que la separabilidad es significativa entre cultivos de soja, respecto de maíz y girasol. Al considerar el efecto debido al suelo se comprueba separabilidad entre girasol y maíz. Por otra parte, las precipitaciones ejercen efecto en el desarrollo de los cultivos contribuyendo a mejorar la separabilidad espectral.

Palabras clave: *análisis multitemporal, sensores remotos, EVI.*

SUMMARY

The aim of this study was to analyze the spectral separability between crops its dependence on rainfall and soil type. The study was conducted in the province of La Pampa, Argentina, with data from samples of sunflower, corn and soybean crop years 2000-2003. The

different campaigns were followed by remote sensing from the information captured by the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), by removing vegetation index. The data were treated as repeated measurements over time. The results indicate that the separability is significant among soybean, corn and sunflower, respectively. The effect due to soil tests confirmed separability between sunflower and maize. Moreover, precipitation exerts an effect on crop development and contributes to improving spectral separability.

Index words: *multitemporal analysis, remote sensing, EVI.*

INTRODUCCIÓN

El uso de sensores remotos ha sido una herramienta eficaz en la estimación del área sembrada y producción de cultivos en muchas partes del mundo (Ares *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2003). Su utilización en las determinaciones del uso del suelo requiere un conocimiento de la respuesta espectral de las coberturas que integran el espacio. En ese aspecto, la mayoría de los cultivos que se desarrollan durante la misma estación de crecimiento manifiestan una respuesta espectral similar lo cual dificulta su diferenciación.

La detección de las diferencias en el desarrollo de los cultivos durante el ciclo fenológico contribuye a mejorar la separabilidad espectral (SE), haciendo más efectiva la determinación del uso del suelo. Diferentes técnicas como los análisis espacio-temporales han sido utilizadas para este fin y han contribuido a entender la respuesta y dinámica de la cobertura terrestre. Estos surgen desde índices de vegetación definiéndose como la combinación de bandas espectrales de una superficie (Tukers y Sellers, 1986). Una de ellas son las series multitemporales construidas a partir de datos de índices de vegetación como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por su sigla en inglés) definida como

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Anguil. Ruta Nacional N° 5 Km. 580. 6326 Anguil, La Pampa, Argentina.

[‡] Autor responsable (farrell.mauricio@inta.gob.ar)

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Bs. As. Calle 526 entre 10 y 11. 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.

la relación entre la información de la banda roja (660 nm) e infrarojo cercano (730 nm) (Rouse, 1973). Otro índice utilizado es el índice de vegetación mejorado (EVI por su sigla en inglés) que corrige las distorsiones en la luz reflejada causada por la nubosidad y los aerosoles en la atmósfera que bloquean la respuesta. El EVI integra la respuesta en la banda azul que es usada para corregir la influencia de los aerosoles sobre la banda roja (Huete *et al.*, 2002; Ferreira *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2005).

Diversas investigaciones en el mundo afirman que las respuestas espectrales derivadas de imágenes satelitales (IS) multitemporales son indicadores que responden a cambios climáticos (White *et al.*, 1997). En el corto periodo algunas comunidades de especies vegetales poseen estados fenológicos que siguen un ciclo anual, las variaciones en la composición vegetal dependen de los regímenes climáticos, suelos y manejo, lo cual resulta en una variación espacio-temporal compleja. A raíz de esto, la vegetación presenta diferentes modos de crecimiento y desarrollo dentro de un ciclo anual. En este contexto Fontana *et al.* (2000) muestran que el uso de IS multitemporales de NDVI provenientes del sensor radiómetro de alta resolución avanzado (AVHRR por su sigla en inglés) ha contribuido a monitorear las diferentes etapas de crecimiento de soja y maíz en el sur de Brasil y que combinado con modelos climatológicos permitieron establecer diferentes patrones de crecimiento. La estimación del crecimiento y desarrollo de un cultivo bajo diferentes condiciones climáticas permite la identificación de los estadios fenológicos. En este contexto, Goward y Prince (1995) encontraron relaciones poco significativas entre NDVI y factores climáticos en algunas partes de África, excepto sobre áreas marginales con ambientes secos. Debido a esto, se han realizado estudios previos donde se involucró la respuesta de Índices de Vegetación (IV) con parámetros climáticos. Box *et al.* (1989) encontraron que el NDVI se asocia de manera consistente con la evapotranspiración y la productividad primaria neta. Malingreau (1986) desarrolló la relación entre NDVI e índices climáticos en cultivos tropicales y subtropicales sobre regiones seleccionadas en Asia. El objetivo de nuestra investigación fue analizar la influencia de las características ambientales y la presencia de diferentes cultivos antecesores que afectan la fecha de siembra de los cultivos sobre la respuesta espectral de cultivos de girasol, soja y maíz con datos provenientes de imágenes del sensor MODIS (2003) y evaluar los periodos de máxima separabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Caracterización del Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la Región Semiárida Pampeana (RSP) de la provincia de La Pampa, Argentina comprendida entre 33° y 35° S y 63° y 65° O. Dentro de esta región se identifican dos subregiones llamadas planicie medanosa (PM) cuya superficie es de 9200 km² y la planicie con tosca (PT) con 8500 km². Sus suelos se caracterizan como Haplustol Entico con texturas arenosas, arenosas francas y francas con baja retención de agua (Bono *et al.*, 1999). Desde el punto de vista productivo, esta región se caracteriza por la actividad agrícola-ganadera, donde los principales cultivos son girasol (*Helianthus annuus*), maíz (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), trigo (*Triticum aestivum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*). Además, debe incluirse especies como alfalfa (*Medicago sativa*) y pasto llorón (*Eragrostis curvula*) utilizados para alimentación del ganado bovino. En el área de estudio las precipitaciones varían debido a su extensión, y su variabilidad se manifiesta en sentido NE - SW, donde las mayores precipitaciones ocurren en el semestre estival, con picos notorios en los meses de octubre y marzo (Galmarini, 1961). La variabilidad de las precipitaciones tanto en los totales mensuales en los anuales es elevada, siendo esta una característica de las regiones semiáridas generando influencia en la fecha de siembra y en la fecha de cosecha. Dentro del semestre estival, los meses de enero y febrero son caracterizados por su déficit hídrico acentuado no solo por las bajas precipitaciones sino por las altas temperaturas registradas. Este déficit es menor en el sector NE y E del área de estudio. Por otra parte, debido a la baja capacidad de retención de los suelos de la RSP, el periodo de aprovechamiento de las precipitaciones para el crecimiento de los cultivos es generalmente corto. Es por ello, que en años normales, el aporte por precipitaciones se lo considera insuficiente durante la época estival, provocando que la productividad de los cultivos al final del ciclo dependa del almacenamiento de agua en el perfil edáfico. Los suelos de la PT poseen limitaciones en la profundidad del perfil, debido a la presencia de un manto o costra calcárea originada por escurrimiento difuso en épocas pasadas (INTA, 1980). Esta costra o manto calcáreo se manifiesta de forma variable y condiciona la capacidad de almacenaje de agua, provocando una disminución en la disponibilidad hídrica. En muchos casos

la disponibilidad hídrica puede modificarse por el aporte del acuífero (nivel freático a escasa profundidad), situación que se observa frecuentemente en años húmedos en la PM donde la profundidad del nivel freático oscila entre 100 y 180 cm (Garnero y Quiroga, 2003). La respuesta de cada cultivo se manifiesta a través de las respuestas multitemporales, que expresan la condición de la cobertura vegetal según condiciones ambientales.

Datos de Parcelas y Pluviometría

Para el análisis de la separabilidad espectral se evaluaron 80 parcelas de las cuales 35 corresponden a cultivos de girasol, 15 al cultivo de soja y 30 a maíz, correspondientes a las campañas agrícolas 2000-2001; 2001-2002 y 2002-2003, las cuales se distribuyeron de manera uniforme en el área de estudio. El tamaño promedio de las parcelas se estableció por encima de las 30 ha, permitiendo la toma de datos de píxeles puros. Cada parcela fue vectorizada utilizando como base la imagen LANDSAT 5, del 29 de enero de 2000 por medio del programa Arc Gis® (www.esri.com). Para analizar la dependencia de la precipitación (P), con la SE de cultivos se realizaron mapas de isoyetas para cada campaña construidos a partir de los registros de 34 estaciones pluviométricas localizadas en el área. En el análisis se consideraron las P registradas en las estaciones pluviométricas de los meses de julio a marzo, periodo que abarca el momento previo a la siembra y la totalidad del ciclo de los cultivos. A partir de los registros diarios se calcularon los totales quincenales para cada mes de cada campaña y cada estación pluviométrica. Para cada quincena se realizó un mapa de P, utilizando el método de interpolación Distancia Inversa (IDW por su sigla en inglés) (Isaaks y Srivastava, 1989). Posteriormente se realizó una superposición de los mapas interpolados generando un mapa final que integra las P para cada campaña. A cada mapa obtenido se le superpuso el mapa vectorial de las explotaciones previamente digitalizadas, con la finalidad de conocer las precipitaciones quincenales en cada una de las parcelas. Posteriormente se confeccionó una planilla de datos en donde se asoció la estación pluviométrica (coordenadas X, Y) con los valores de precipitación quincenal. Para el análisis se procedió a dividir los niveles de P en barbecho (septiembre- noviembre) y etapa de crecimiento (diciembre-enero). Por último se procedió

a asignar a cada muestra de cultivo el nivel de precipitaciones y el tipo de suelo, quedando disponibles los datos de parcelas asociados a cultivo y tipo de suelo como información de base. En la Figura 1 se muestra la localización de la PM y PT y la distribución de las estaciones pluviométricas y las parcelas bajo estudio.

Datos de Imágenes de Satélite

La fuente de datos satelitales provino de la composición quincenal MOD 13Q1 V005. Estas imágenes pertenecen al parth/row MODIS h12v12 (2003) y están integradas por 15 imágenes, de las cuales para los fines del trabajo, se tuvo en cuenta la que corresponde al EVI.

Las imágenes poseen una resolución radiométrica de 16 bits y poseen una resolución espacial de 250 m por 250 m. Posteriormente se realizó la serie multitemporal para cada campaña agrícola, logrando que cada composición se integre de 15 imágenes. Se identificaron las parcelas en la serie multitemporal, superponiendo los vectores digitalizados, permitiendo generar un área de interés y extraer la información de los píxeles correspondiente a cada parcela. La información proveniente de la muestra de píxeles fue ordenada en una planilla de cálculo. Para lograr representatividad se recurrió a la toma de píxeles puros, descartando aquellos que se situaban en los extremos del lote para evitar mezcla de información de coberturas vecinas. Para determinar la SE entre cultivos se evaluó los niveles de EVI máximos encontrados a partir de la serie multitemporal obtenidos de cada quincena (fechas) asociados a los niveles de P y el tipo de suelo. El análisis de la SE sugiere la utilización del modelo estadístico de mediciones repetidas (Diggle, 1988; Vonesh y Carter, 1992; Wolfinger, 1993) utilizando el programa SAS (SAS Institute, 1988), que evalúa la diferencia entre los valores de EVI de cada muestra para cada quincena. En los casos que fueron necesarios la evaluación de EVI según diferentes efectos se utilizó la prueba de Tukey (Siegel y Tukey, 1960).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nivel de Precipitaciones

Las precipitaciones totales para el periodo de septiembre-febrero muestran alta variabilidad entre años

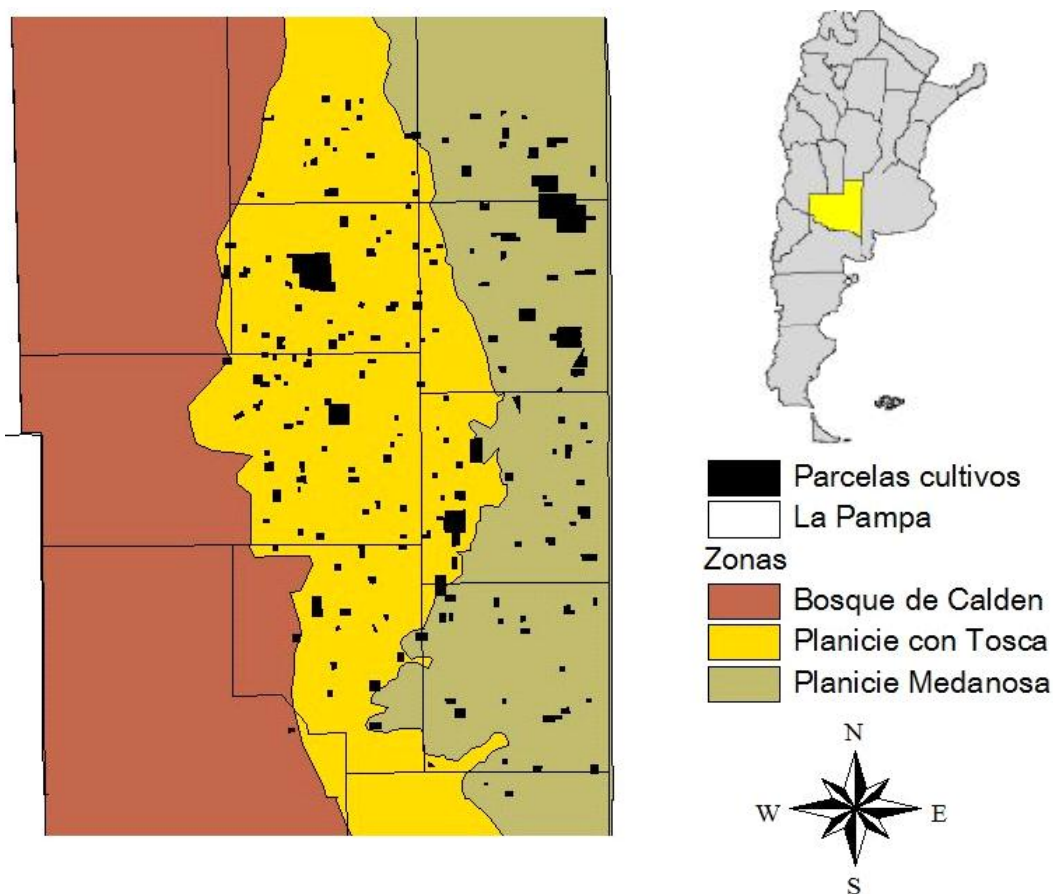


Figura 1. Localización del área de estudio.

y entre tipos de suelo, indicando diferencias significativas entre tipos de suelo excepto para la campaña 2002-03 (Cuadro 1). Los niveles de precipitaciones en barbecho y en el periodo de crecimiento del cultivo fueron más bajos para la campaña 2002-03 respecto del resto de las campañas evaluadas. La alta variabilidad en las precipitaciones es una característica de las regiones semiáridas y su efecto es clave en la productividad de los cultivos. La alta variabilidad en las precipitaciones en momentos previos a la implantación del cultivo y durante la etapa de crecimiento de los cultivos de verano puede causar efectos como sequías o excesos de humedad (Hall *et al.*, 1992; Mercau *et al.*, 2001). Esto tiene importancia, ya que las precipitaciones en periodo previos a la siembra del cultivo tienen influencia en el agua almacenada en el suelo. Quiroga *et al.* (1997) concluyeron que las precipitaciones en la etapa de barbecho del cultivo (septiembre-noviembre) condicionan los contenidos de agua almacenada en el suelo en periodos previos a la siembra.

Análisis de las Respuestas Multitemporales

Las series multitemporales generadas para cada campaña a partir de datos de IS del sensor MODIS permitieron reconstruir la curva de crecimiento de los cultivos y diferenciar aspectos de desarrollo. El ciclo vegetativo de cultivos agrícolas es caracterizado por 3 fechas claves, que definen 3 fases fenológicas 1) etapa de iniciación del crecimiento que se caracteriza por un aumento del área foliar y biomasa y consecuentemente la actividad fotosintética; 2) etapa de floración es el periodo que se caracteriza por presentar la mayor área foliar; 3) etapa de senescencia que se caracteriza por un decremento de la actividad fotosintética. La fenología de la vegetación tiende a seguir patrones temporales, en el caso de los cultivos, la emergencia de la hoja es seguida de un crecimiento vigoroso, seguido de un periodo estable donde se manifiesta el máximo IAF, para luego decaer. Las diferencias en los niveles de P observada entre años condiciona el desarrollo de

Cuadro 1. Precipitaciones totales para todas las campañas agrícolas.

Campaña agrícolas					
2000-2001		2001-2002		2002-2003	
PM	PT	PM	PT	PM	PT
----- mm -----					
PTo (septiembre- febrero)					
363b [†]	452c	504d	577e	262a	271a
PB (septiembre-noviembre)					
266c	211bc	350d	425e	111a	130ab
PC (noviembre-febrero)					
243a	234a	264a	258a	189a	181a

[†] Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NS = no significativo. PTo = precipitaciones totales. PB = precipitaciones en barbecho. PC = precipitaciones durante el ciclo del cultivo. PT = planicie con tosca. PM = planicie medanosa.

los cultivos. Es notorio observar la disminución de la respuesta del EVI durante el estadio fenológico de floración a causa de un estrés hídrico ocasionada por niveles bajos de P. En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la respuesta espectral del cultivo de girasol bajo 2 niveles de precipitación.

Por otra parte, el cultivo de girasol presenta un sistema radicular que le permite explorar el suelo, demostrando la habilidad de extraer agua del suelo a profundidades mayores en comparación con los cultivos sorgo, maíz y soja. (Jones, 1984; Bremmer *et al.*, 1986;

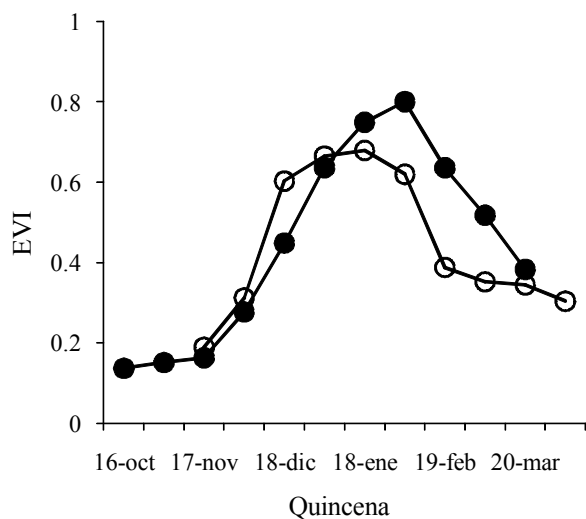


Figura 2. Cultivos de girasol pertenecientes a la planicie medanosa (PM) de la campaña 2001-02 con mayor nivel de P (línea con círculos llenos) y menor nivel de P (línea con círculos vacíos).

Cabelguenne y Debaeke, 1998; Stone *et al.*, 2002). Esto hace que el girasol posea mayor tolerancia a la deficiencia hídrica, sumado a esto, el período de crecimiento relativamente corto en comparación con otros cultivos también reduce sus necesidades de agua lo que posiciona al cultivo como potencial para las regiones con deficiencias en las precipitaciones (Lamm *et al.*, 2011). En condiciones de estrés hídrico, el cultivo de girasol muestra ventajas frente al cultivo de maíz, lo que se manifiesta por diferencias en el desarrollo de área foliar (AF). NeSmith y Ritchie (1992) y Abrecht y Carberry (1993) encontraron que el descenso en el AF del maíz es debida una reducción de la expansión foliar y puede estar relacionada con la presencia de estrés hídrico. Estas diferencias en las precipitaciones observadas entre años se reflejan en la respuesta de los cultivos, el cual genera una disminución del AF y biomasa aérea trayendo como consecuencia menor valor de EVI (Figura 3).

En girasol, las fechas de siembra varían desde mediados de octubre a mediados de diciembre con un periodo óptimo en el mes de noviembre que coincide con temperaturas adecuadas para la germinación que le proporciona al cultivo las condiciones para llegar a floración con una adecuada AF. Un retraso en la fecha de siembra (como por ejemplo en diciembre) coinciden con un aumento de la temperatura del aire lo que produce una aceleración de la etapa de crecimiento haciendo que el cultivo llegue a la etapa de floración con un menor

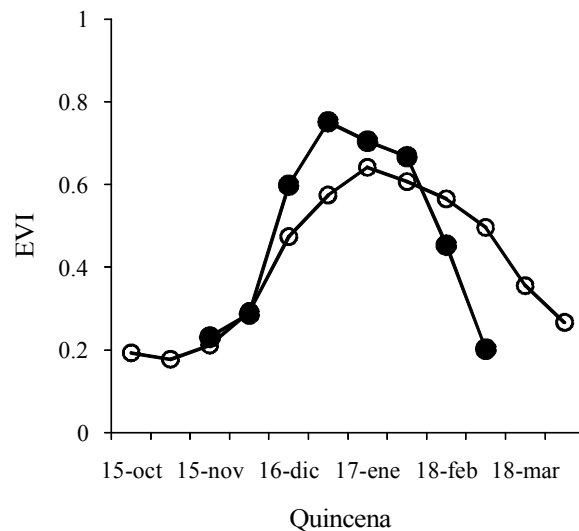


Figura 3 Respuesta multitemporal del cultivo de girasol (líneas con círculos llenos) frente al cultivo de maíz (líneas con círculos vacíos) perteneciente a una misma campaña con deficiencias hídricas.

AF. En la Figura 4 se muestran las tres curvas logradas las cuales expresan la respuesta espectral del cultivo de girasol bajo diferentes fechas de siembra. Fechas más tardías (5 de enero) manifiestan menores valores de EVI al momento de la floración debido a un menor desarrollo del cultivo (línea con círculos llenos), respecto a cultivos de fecha intermedia (línea con rombos). La diferencia espectral observada en el periodo de floración en cultivos sembrados en fechas óptimas (círculos vacíos) es debida a la diferencia en disponibilidad hídrica al momento de la siembra.

En maíz, atrasos en la fecha de siembra, produce mayores tasas de crecimiento, ya que el cultivo está expuesto a mayor radiación, favoreciendo un desarrollo alto durante la etapa de crecimiento, sin embargo, cuando el cultivo ingresa en el estado reproductivo experimenta reducciones notables en la tasa de crecimiento (Cirilo y Andrade 1994) lo que se manifiesta espectralmente por medio de bajos valores de EVI durante esta etapa. La Figura 5 muestra la incidencia de la fecha de siembra en maíz sobre la tasa de crecimiento y los valores de EVI alcanzados en floración para tres fechas de siembra diferentes. Las respuestas espectrales corresponden a una siembra realizada durante la segunda quincena de octubre (línea con círculos vacíos), 2^{da} quincena de noviembre con buen nivel hídrico en el suelo (línea con rombos), y la 2^{da} quincena de diciembre (línea con círculos llenos). En el cultivo de soja, también se observa diferencias en las fechas de siembra. Éstas obedecen a factores relacionados con la falta de disponibilidad de agua en el momento oportuno de siembra. Un retraso en la fecha

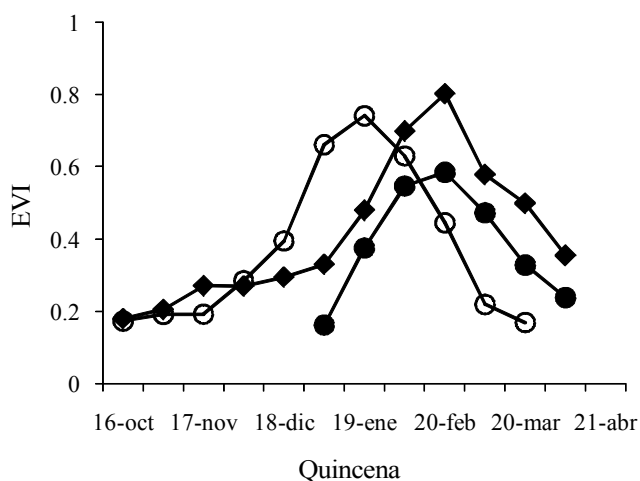


Figura 4. Respuestas multitemporales del cultivo de girasol para diferentes fechas de siembra.

de siembra trae aparejado reducción en el ciclo del cultivo, lo que se traduce en menor tasa de desarrollo y por lo tanto menor AF (Baigorri *et al.*, 1995), lo que significará menor valor de EVI en este estado fenológico.

En el cultivo de soja, la presencia de estrés hídrico durante la etapa emergencia-iniciación floral puede revertirse a través del aporte de agua por P o riego. En este contexto, la planta puede reiniciar el crecimiento del AF. No obstante, hay que considerar que frente a un estrés hídrico no solo disminuye su tasa de crecimiento, sino que dicho estado fenológico permanece por más tiempo, acortando la etapa de iniciación floral-floración (Ritchie *et al.*, 1996). A diferencia de otros cultivos, la fecha de siembra está condicionada por su cultivo antecesor. Dentro de los cultivos utilizados se considera al cultivo de cebada y trigo como los principales antecesores del cultivo de soja (Caviglia y Andrade, 2010). Estos cultivos antecesores utilizan parte del agua almacenada en el suelo para su desarrollo, lo cual trae como consecuencia una reducción en los contenidos de agua en el suelo para el cultivo de soja provocando retrasos en la fecha de siembra (Forjan y Manso, 2008; Calviño *et al.*, 2003a,b). Los cultivos antecesores alcanzan valores altos de IAF entre segunda quincena de octubre y la primera de noviembre, lo cual explica los altos valores de EVI encontrados durante ese periodo. Debido a esto, el cultivo antecesor es cosechado a partir de segunda quincena de diciembre, generando un retraso en la fecha de siembra del cultivo de soja.

El cultivo de soja realizado bajo esta tecnología en general manifiesta un menor crecimiento durante la primera etapa y menor valor de AF que se traducen en

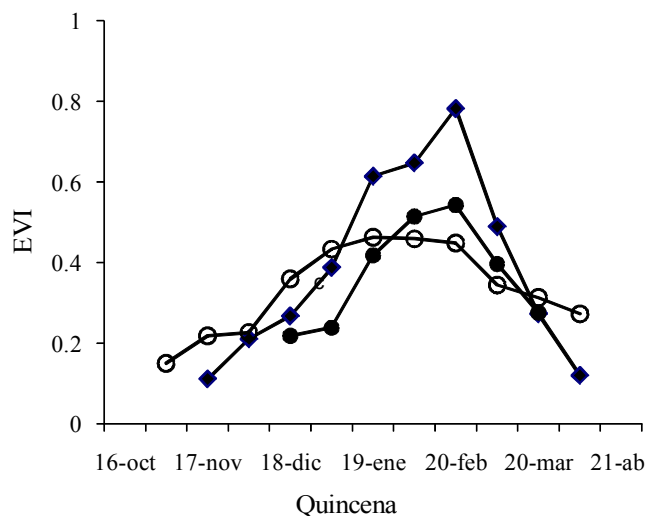


Figura 5. Respuestas multitemporales del cultivo de maíz con diferentes fechas de siembra.

bajos valores de EVI. La Figura 6 muestra la respuesta del cultivo de soja sin antecesor (línea con triángulos) y con cultivo antecesor cebada (línea con círculos vacíos) y trigo (línea con círculos llenos). Obsérvese las diferencias en crecimiento, valores de EVI y longitud del ciclo entre las curvas sin antecesor y antecesor trigo. Esto pone de manifiesto que suelos arenosos y profundos como los que se encuentran en la PM tienen menos capacidad de almacenar agua debido a su composición textural. No obstante, a pesar de la baja capacidad de retención de agua (CRA) de estos suelos, la posibilidad de ser más profundos le confiere mayor capacidad de almacenamiento de agua. El agua almacenada a la siembra varía con la cantidad de precipitaciones ocurridas en otoño e invierno y la longitud del barbecho definida a partir de la permanencia en el lote del cultivo

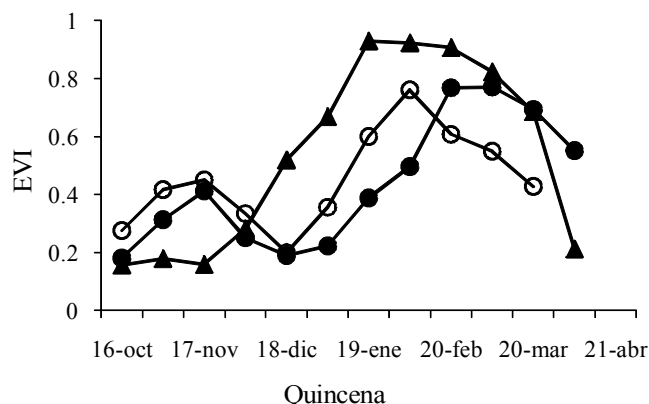


Figura 6. Respuestas multitemporales del cultivo de soja con y sin antecesor.

antecesor (Sadras y Hall, 1989; Quiroga *et al.*, 2005; Venanzi, 2005).

Esto se manifiesta por diferencias en la tasa de crecimiento y los altos valores de EVI observados en los sitios de la PM. Nuevamente el aspecto relacionado con el tipo de especie tiene relevancia, ya que el girasol por sus características morfológicas, su sistema radicular es capaz de explorar hasta los 3 m, mientras que para el cultivo de maíz, las posibilidades de explorar se reducen en la mayoría de los casos a 2 m. En la Figura 7a y b se observan 2 muestras de cultivo de girasol y maíz respectivamente en lotes de la PM y PT.

La respuesta del EVI de imágenes MODIS presenta diferencias significativas tomando como variables la quincena y el tipo de cultivo ($P < 0.0001$), lo cual indica que es necesario analizar la separabilidad espectral de los cultivo dentro de la quincena. Por otra parte, el modelo detecta diferencia significativa a la covariable P, con lo cual explica que las diferencias entre muestras observadas dentro del año como entre años responde a cambios en los niveles de P, permitiendo encontrar periodos en donde se manifiesta alta SE. Kang *et al.* (2003) encontraron que la asociación entre variables climáticas y AF obtenido desde IS proporcionó información suficiente para detectar cambios en la fenología de la vegetación.

La diferenciación de la respuesta multitemporal no mostró diferencias significativas cuando se consideró la variable tipo de suelo (F-valor = 18.43). Esto implica que dentro del área de estudio se debe realizar una zonificación por la variable tipo de suelo y analizar SE de las muestras por separado. En este aspecto,

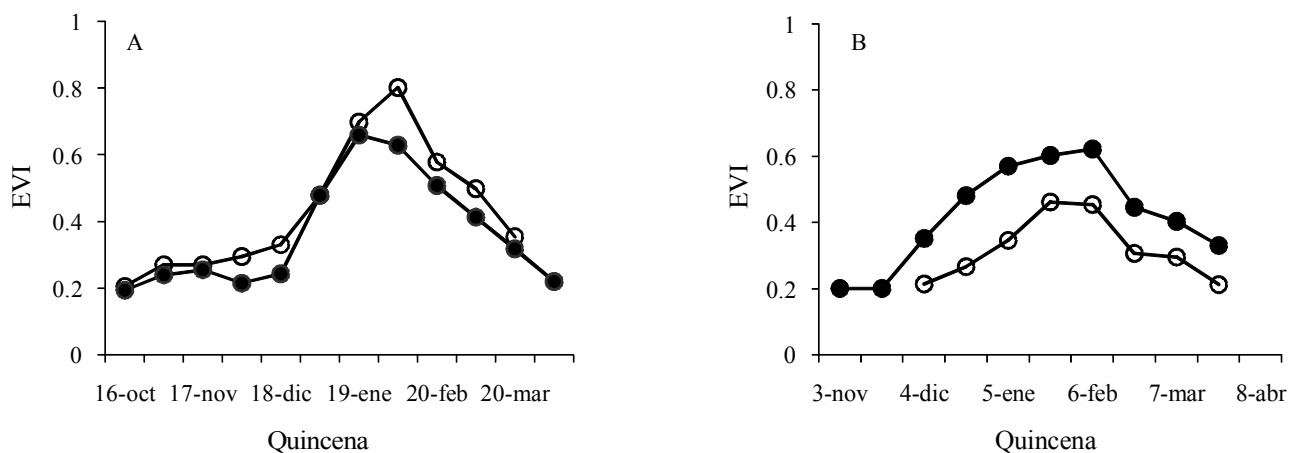


Figura 7. Respuestas multitemporales de 2 cultivos de girasol (A) y maíz (B) en la planicie mendosa (PM) y en la planicie con tosca (PT) respectivamente.

al analizar la SE de las muestras ubicadas en la PM para cada quincena se observa que existe diferencias significativas entre la SE de las muestras de soja respecto del resto de los cultivos, para la segunda quincena de enero, primera y segunda quincena de marzo, y primera de abril. Mientras que para las muestras de girasol y maíz ubicadas en la PT se detectaron diferencias significativas entre la SE de girasol y maíz en la primera quincena de enero y primera quincena de febrero ($P < 0.0001$).

CONCLUSIONES

Se pusieron de manifiesto las características de los cultivos frente a dos ambientes de la región semiárida pampeana de Argentina. Los ambientes analizados corresponden a una planicie medanosa y a una planicie con tosca, donde el aspecto hídrico determina el desarrollo y la productividad de los mismos. La determinación de la separabilidad espectral de cultivos a través de la utilización de un método estadístico, tal como el análisis de mediciones repetidas en el tiempo, proporciona una importante herramienta en la determinación del uso del suelo, ya que permitió hallar el periodo de máxima separabilidad entre soja, maíz y girasol. Por otra parte puede considerarse que la separabilidad espectral entre cultivos mejora cuando integra datos de series temporales compuestas por una mayor cantidad de imágenes que permitan seguir las fases de los cultivos y en el caso del sensor MODIS (2003) es fácilmente logable.

LITERATURA CITADA

- Abrecht, D. G. and P. Carberry. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.* 31: 55-69.
- Ares, J., M. Bertiller, and H. Del Valle. 2001. Functional and structural landscape indicators of intensification, resilience and resistance in agroecosystems in Southern Argentina based on remotely sensed data. *Landscape Ecol.* 16: 221-234.
- Baigorri, H., R. Scarafoni y B. Masiero. 1995. Comportamiento de cultivares de grupos de madurez III al VII en cinco fechas de siembra entre Octubre y Febrero en Marcos Juárez. pp. 222-229. *In: Primer Congreso Nacional de Soja y Segunda Reunión Nacional de Oleaginosos. Parte 1: Desarrollo. AIANBA. Pergamino. Buenos Aires, Argentina.*
- Bono, A., J. Montoya y F. Babinec. 1999. Fertilización en girasol. Resultados de tres años de estudio. Publicación técnica n° 48. EEA Anguil INTA. La Pampa, Argentina.
- Box, E., B. Holben, and V. Kalb. 1989. Accuracy of AVHRR vegetation index as a predictor of biomass primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetation* 80: 71-89.
- Bremmer, P. M., G. K. Preston, and C. F. de St. Groth. 1986. A field comparison of sunflower (*Helianthus annuus*) and sorghum (*Sorghum bicolor*) in a long drying cycle. I. Water extraction. *Aust. J. Agron. Res.* 37: 483-493.
- Cabelguenne, M. and P. Debaeke. 1998. Experimental determination and modeling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant Soil* 202: 175-192.
- Calviño, P. A., V. O. Sadras, and F. H. Andrade. 2003a. Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *Eur. J. Agron.* 19: 265-275.
- Calviño, P. A., V. O. Sadras, and F. H. Andrade. 2003b. Quantification of environmental and management effect on the yield of late sown soybean. *Field Crops Res.* 83: 67-77.
- Caviglia, O. P. and F. H. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3: 1-8.
- Cirilo, A. G. and F. H. Andrade. 1994. Sowing date and maize productivity. II: Kernel number determination. *Crop Sci.* 34: 1044-1046.
- Digle, P. J. 1988. An approach to the analysis of repeated measurements. *Biometrics* 44: 959-971.
- Ferreira, L., H. Yoshioka, A. Huete, and E. Sano. 2004. Optical characterization of the Brazilian savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the cerrado biome: Preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *J. Arid Environ.* 56: 425-447.
- Fontana, D. C., E. Weber, J. Ducati, D. Figueiredo, M. Berlato, and H. Bergamaschi. 2000. A case study for crop monitoring and harvest forecast in Brazil. pp. 91-94. *In: 28th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Cape Town, South Africa.*
- Forjan, H. y L. Manso. 2008. La inclusión de colza en el sistema de producción. pp. 41-48. *In: L. Iriarte y O. Valetti (eds.). Cultivo de colza. Chacra Experimental Integrada Barrow. Convenio MAAyP-INTA. Barrow, Buenos Aires, Argentina.*
- Galmarini, A. G. 1961. Caracterización climática de la provincial de La Pampa. CADAFE. Publicación técnica n° 13. Buenos Aires, Argentina.
- Garnero, G. y A. Quiroga. 2003. Caracterización de ambientes para el cultivo de soja y la influencia de la napa de agua. En cultivos de cosecha gruesa. *Bol. Div. Tec. No. 77. EEA INTA Anguil. Argentina.*
- Goward, S. and S. Prince. 1995. Transient effects of climate on vegetation dynamics; Satellite observations. *J. Biogeog.* 22: 549-563.
- Hall, A. J., C. M. Rebella, C. M. Ghera, and J. P. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. pp. 413-450. *In: C. J. Pearson (ed). Ecosystems of the world. Field crop ecosystems. Elsevier. Amsterdam.*
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodríguez, X. Gao, and L. G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83: 195-213.

- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa. Buenos Aires, Argentina.
- Isaaks, E. H. and R. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Jones, O. R. 1984. Yield, water-use efficiency, and oil concentration and quality of dryland sunflower grown in the southern high plains. *Agron. J.* 76: 229-235.
- Kang, S., S. W. Running, J. H. Lim, M. Zhao, C. R. Park, and R. Loehman. 2003. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forest, Korea: An application of MODIS leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 86: 232-242.
- Lamm, F. R., R. M. Aiken, and A. A. Aboukheira. 2011. Irrigation research with sunflowers in Kansas. pp. 169-180. *In: Proc. 23rd Annual Central Plains Irrigation Conference.* Burlington, CO, USA.
- Malingreau, J. P. 1986. Global vegetation dynamics: Satellite observations over Asia. *Int. J. Remote Sens.* 7: 1121-1146.
- Merciau, J. L., V. O. Sadras, E. H. Satorre, C. Messina, C. Balbi, M. Uribeharrea, and A. J. Hall. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agric Syst.* 67: 83-103.
- MODIS Level 1B Product User's Guide For Level 1B. 2003. Version 4.3.0 (Terra) and Version 4.3.1 (Aqua). NASA/Goddard Space Flight Center Greenbelt. Greenbelt, MD, USA.
- NeSmith, D. S. and J. T. Ritchie. 1992. Short-and long-term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agron. J.* 84: 107-113.
- Quiroga, A., D. Funaro, R. Fernández y E. Noellemeyer, 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Cienc. Suelo* 23: 79-85.
- Quiroga, A., O. Ormeño, A. Bono y H. Otamendi. 1997. Manejo del agua en el cultivo de girasol en la región semiárida pampeana. *Bol. Div. Tec.* n° 56. Argentina.
- Ritchie, S., J. Hanway, H. Thompson, and G. Benson. 1996. How a soybean plant develops. Special Report 53. Iowa State University. Ames, IA, USA.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1973. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, final report. Greenbelt, MD, USA.
- Sadras, V. O. and A. J. Hall. 1989. Patterns of water availability for sunflower crop in semiarid central of Argentina. A simulation-based evaluation of their interactions with cropping strategies and cultivar traits. *Agric. Syst.* 31: 221-238.
- SAS Institute. 1988. SAS-STAT user's guide. Release 6.03. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Siegel, S and J. Tukey. 1960. A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in unpaired samples. *J. Am. Stat. Assoc.* 55: 429-445.
- Stone, L. R., D. E. Goodrum, A. J. Schlegel, M. N. Jaafar, and A. H. Khan. 2002. Water depletion depth of grain sorghum and sunflower in the Central High Plains. *Agron. J.* 94: 936-943.
- Tuker, C. J. and P. J. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.* 5: 703-714.
- Venanzi, S., De. Sa Pereira, E. Fernández y H. Krüger. 2005. Uso del agua por dos secuencias de cultivos en el sur de la región semiárida pampeana. *Boletín de Divulgación Técnica* no. 44. EEA Bordenave. INTA. Argentina.
- Vonesh, E. F. and R. L. Carter. 1992. Mixed-effect nonlinear regression for unbalanced repeated measures. *Biometrics* 48: 1-17.
- White, M. A., P. E. Thornton, and S. W. Running. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation response to interannual climate variability. *Global Biogeochem. Cycles* 11: 217-234.
- Wolfinger, R. 1993. Covariance structure selection in general mixed model. *Commun. Statist. Simul. Comput.* 22: 1079-1106.
- Xiao, X., B. Braswell, Q. Zhang, S. Boles, S. Frolking, and B. Moore. 2003. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosol: Continental-scales observations in Northern Asia. *Remote Sens. Environ.* 84: 385-392.
- Xiao, X., S. Boles, J. Liu, D. Zhuang, S. Frolking, C. Li, W. Salas, and B. Moore. 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 95: 480-492.