

COMPARISON OF SPECTRAL SIGNATURES AND DETERMINATION OF PSEUDO-INVARIANT FEATURES IN RADIOMETRICALLY CORRECTED IMAGES

COMPARACIÓN DE FIRMAS ESPECTRALES Y DETERMINACIÓN DE PSEUDO-INVARIANTES EN IMÁGENES CORREGIDAS RADIOMÉTRICAMENTE

Nicolás Vaiman¹; Armando B. Brizuela^{1,2} & César A. Aguirre^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER), Ruta 11, Km 10, Oro Verde, Entre Ríos, nicolas_vaiman@hotmail.com

²Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP-CONICET), Mater y España, 3105 Diamante, Entre Ríos, armando.brizuela@gmail.com, cesaraguirredalotto@gmail.com

ABSTRACT. The prospect of making multitemporal studies with Landsat images is higher as both data banks and facilities to obtain them increase. However, to get comparable data it is necessary to perform atmospheric and geometric calibrations. Some features in these images do not suffer radiometric alterations with time so they can be considered pseudo-invariant features. The analysis of these features indicates that corrected data are comparable. In this study, COST radiometric and geometric corrections were applied to 8 Landsat 5 TM images, pathrow 226-82, from October 2008 to January 2010. Comparison of spectral signatures of six classes and determination of pseudo-invariant pixels were carried out. We conclude that in bands 1, 2 and 3, the categories native forest, water vegetation and, to a lesser extent, island vegetation present a good similarity in the spectral signature and pseudo-invariant features. In Band 4 they show greater variability and bands 5 and 7 are similar in different categories.

KEY WORDS. Radiometric correction. COST. Landsat 5 TM. Pseudo-invariant features.

RESUMEN. La posibilidad de realizar estudios multitemporales, con imágenes Landsat, es mayor a medida que se incrementan los bancos de datos y las facilidades para adquirirlos. Sin embargo para obtener datos comparables resulta necesario realizar las correcciones atmosférica y geométrica. Algunos elementos presentes en las imágenes no sufren alteraciones radiométricas con el tiempo, por lo que se pueden considerar pseudo-invariantes. El análisis de estos elementos indica si, efectivamente, los datos corregidos son comparables. En este trabajo se aplicó la corrección radiométrica COST y geométrica a un conjunto de 8 imágenes Landsat 5, escena 226-082, de noviembre de 2008 a enero de 2010. Se realizó una comparación de las firmas espectrales de seis clases y se determinaron áreas de píxeles pseudo-invariantes. Se concluye que en las bandas 1,2 y3 las categorías bosque nativo, vegetación ribereña y, en menor medida, vegetación de islas presentan –en el área de trabajo- similitud en las firmas espectrales y pseudo-invariantes. En la banda 4 acusan la mayor variabilidad y en las bandas 5 y 7 son similares en las diferentes categorías.

PALABRAS CLAVES. Corrección radiométrica. COST. Landsat 5 TM. Elementos pseudo-invariantes.

INTRODUCCIÓN

En un estudio de detección de cambios, debido al elevado número de imágenes que pueden estar involucradas y la escasez de datos históricos relacionados a condiciones atmosféricas y de reflectancia de la superficie, se suele optar por algún método de normalización que corrija el conjunto de imágenes con relación a una imagen de referencia. Uno de estos métodos se basa en la identificación de elementos pseudo-invariantes, es decir, elementos que presumiblemente presentan la misma reflectancia espectral a través de una serie de imágenes (Schott *et al.*, 1988; Jensen, 1996).

Los elementos pseudo-invariantes pueden encontrarse principalmente en obras de infraestructura (asfalto, concreto, azoteas) (Schott *et al.* 1988). El método de los elementos pseudo-invariantes para la corrección radiométrica de imágenes ha sido utilizado en diferentes trabajos, presentándose como una alternativa a otros métodos más complejos (Hall *et al.*, 1990; Yuan & Elvidge, 1996; Yang & Lo, 2000). Brizuela *et al.* (2007) utilizando imágenes Landsat 5TM mencionan como elementos pseudo-invariantes a zonas de bosque nativo y vegetación ribereña (cuando son comparados en la misma época, misma situación fenológica y similar ángulo de elevación solar).

Los datos espectrales adquiridos por sensores remotos son influenciados por una serie de factores como la absorción y dispersión atmosférica, la calibración del sensor, elevación solar y procesos de procesamiento de imágenes, que tienden a cambiar con el tiempo (Teillet, 1986). La normalización de imágenes satelitales para realizar análisis multitemporales pretende disminuir la influencia de estos factores al reducir la variación radiométrica que no es producida por la cobertura del suelo entre imágenes de diferentes fechas.

Los métodos de corrección de imágenes pueden ser separados en dos grupos, los "Basados en la imagen" y los "Basados en la física". Uno de los métodos basado en la imagen más usado es el modelo "DOS- Dark Object Subtraction" (Chavez, 1988). Este método de corrección fue mejorado posteriormente por el mismo autor a "COST" en el cual la Transmitancia Atmosférica es estimada mediante el coseno del ángulo cenital solar (Chavez, 1996). El segundo grupo son métodos basados en la física de la adquisición de la imagen como los que consideran las condiciones en el momento

INTRODUCTION

In a study of change detection, due to the high number of images that can be involved and the scarcity of historical data related to atmospheric conditions and superficial reflectance, a method of normalisation that corrects the collection of images with relation to an image of reference has been opted for. One of these methods is based on the identification of pseudo-invariant elements, which is to say, elements that presumably present the same spectral reflectance through a series of images (Schott *et al.*, 1988; Jensen, 1996).

The pseudo-invariable elements can be found principally in infrastructure works (asphalt, concrete, roofs) (Schott *et al.* 1988). The method of pseudo-unvarying elements for the radiometric correction of images has been used in different works, presenting itself as an alternative to other, more complex, methods (Hall *et al.*, 1990; Yuan & Elvidge, 1996; Yang & Lo, 2000). Brizuela *et al.* (2007) using Landsat 5TM images mention pseudo-invariant elements as natural forest and water vegetation zones (when they are compared at the same time, same phenological situation and similar angle of solar elevation).

The spectral data acquired by remote sensors are influenced by a series of factors like the atmospheric absorption and dispersion, the calibration of the sensor, solar elevation and processes of image development which tend to change with time (Teillet, 1986). The normalisation of satellite images to carry out multi-temporal analysis aims at diminishing the influence of these factors by reducing the radiometric variation that is not produced by ground cover between images of different dates.

Image correction methods can be separated in two groups: "Based on the image" and "Based on the physical". One of the most used methods based on the image is the model "DOS- Dark Object Subtraction" (Chavez, 1988). This correction method was improved later by the same author, with "COST" in which the Atmospheric Transmittance is estimated through the cosine of the zenithal solar angle (Chavez, 1996).

The second group consists of methods based on the physics of image acquisition such as those considering the conditions in the moment of its occurrence and the physical atmospheric characteristics like the 6S (Vermonte *et al.*, 1997).

Reflectivity curves can be obtained from laboratory measurements for the main earth covers, often called 'spectral signatures' (Chuvieco Salinero, 2008). The

de la adquisición y las características físicas de la atmósfera como el 6S (Vermonte et al., 1997).

A partir de medidas de laboratorio pueden obtenerse las curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres que suelen denominarse 'firmas espectrales' (Chuvieco Salinero, 2008). Las curvas, reflectividad en función de la longitud de onda, presentan patrones característicos para distintos tipos y estados de vegetación, suelo y agua.

El objetivo de este trabajo fue comparar las firmas espectrales de 6 clases de uso y cobertura de las tierras y determinar las que presentaban características de elementos pseudo-invariantes. Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM a las cuales se aplicaron las correcciones atmosférica y geométrica.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra delimitada por el paralelo $31^{\circ}41'33''$ S en el Norte y el paralelo $32^{\circ}11'58''$ S en el Sur, y desde el meridiano $60^{\circ}13'58''$ W al Este hasta el meridiano $60^{\circ}41'12''$ W al Oeste. Estas coordenadas corresponden a un sector del centro Oeste de la provincia de Entre Ríos (Fig. 1).

Predomina el clima templado húmedo de llanura, caracterizado una temperatura media anual de $18,2^{\circ}\text{C}$ y temperaturas medias mensuales de $24,8^{\circ}\text{C}$ en enero y 12°C en julio. La precipitación anual es de 1050 mm siendo los meses de octubre a marzo los que presentan lluvias más abundantes con el 68% del total anual. La humedad media mensual del aire es menor en los meses de noviembre, diciembre y enero (55 %), en correspondencia con las temperaturas más elevadas. La humedad del aire es un factor que influye en la energía reflejada por la superficie terrestre, varía durante el día presentando en los meses indicados un mínimo alrededor de las 17:00 hora local y un máximo a la salida del sol.

El área es de gran aptitud para el cultivo de secano de cereales, oleaginosas y forrajeras, tiene un alto porcentaje agrícola (> 90%), una porción reducida de río e islas y el área urbana –principalmente las ciudades de Paraná, Diamante y Crespo– es aún menor. Por las características de la humedad, la vegetación natural o implantada y el régimen de vientos, la atmósfera se halla generalmente libre de polvo atmosférico lo que mejora las condiciones durante la obtención de las imágenes. El Río Paraná,

curves, reflectivity as a function of wavelength, present characteristic patterns for different types and states of vegetation, land and water.

The objective of this work was to compare 6 classes of spectral signatures of use and groundcover and to determine those that present characteristics of pseudo-invariant elements. Landsat 5 TM images, to which atmospheric and geometric corrections were applied, were used.

AREA OF STUDY

The area of study is demarcated by the $31^{\circ}41'33''$ parallel S to the North and the parallel $32^{\circ}11'58''$ parallel S to the South, and from the meridian $60^{\circ}13'58''$ W to the East up to the meridian $60^{\circ}41'12''$ W to the West. These coordinates correspond to a sector of the

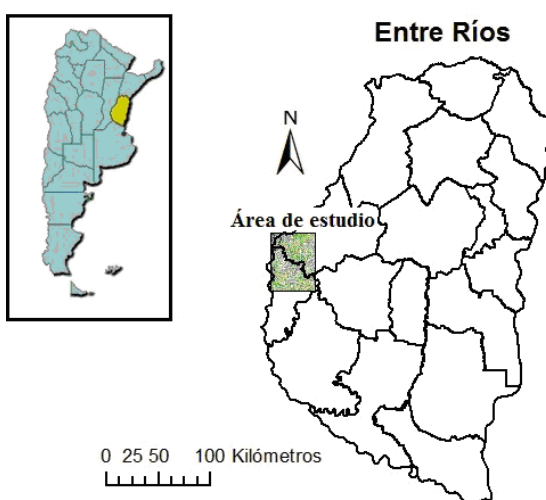


Figure 1. Area of study.

Figura 1. Área de estudio.

central west of the province of Entre Ríos (Fig. 1).

The climate is predominantly temperate-humid of plains, characterised by an average annual temperature of 18.2°C and mean monthly temperatures of 24.8°C in January and 12.0°C in July. Annual rainfall is 1050 mm, the months from October to March being those that show more abundant rain with 68% of the annual total. Average monthly humidity of the air is less in November, December and January (55%), in keeping with the higher temperatures. Air humidity, a factor that influences the reflected energy on the earth's surface, varies during the day in the months indicated, presenting a minimum at around 17:00 local time and a maximum at sunrise.

The area is very suitable for the growing of

al oeste del área analizada, tiene sectores en los que la corriente de agua lleva en suspensión gran cantidad de sedimentos y otros, especialmente en el interior de islas donde las lagunas son limpias y calmas, de agua clara y por lo tanto con un nivel bajo o nulo de energía reflejada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis se utilizaron 8 imágenes Landsat 5 TM que cubren el centro oeste de la provincia de Entre Ríos (escena 226/82). Las fechas de las imágenes y ángulos de elevación solar son los siguientes: 06/10/2008 (49.70°), 23/11/2008 (59.09°), 25/12/2008 (57.73°), 10/01/2009 (55.69°), 11/02/2009 (50.59°), 09/10/2009 (51.54°), 10/11/2009 (59.27°) y 13/01/2010 (56.50°).

Se utilizó el software Idrisi Andes en la etapa de preprocesamiento para corregir el efecto atmosférico mediante el modelo de superficie oscura "COST" que no requiere conocer la transmisividad de la atmósfera (Chavez, 1996). Luego fue usada la técnica de registración de las imágenes a una de referencia, en el sistema Posgar 94 WGS 84, con un error cuadrático medio menor a 15 m y remuestreo por el vecino más próximo.

En la segunda etapa se pusieron a prueba dos técnicas para comparar los datos corregidos del efecto atmosférico y determinar los elementos pseudo-invariantes. La primera evalúa, por banda, las diferencias en valor absoluto acumuladas de todas las fechas reteniendo los valores inferiores al primer percentil (1%). Estos píxeles con menor variación se consideraron pseudo-invariantes y según la ubicación que presenten visualmente sobre una composición de bandas se determinó el tipo de cobertura al que pertenecían.

La segunda técnica consistió en comparar visualmente las firmas espectrales correspondientes a 6 clases que podrían presentar elementos pseudo-invariantes de acuerdo con diversos trabajos (Schott *et al.*, 1988; Coppin & Bauer, 1994; Brizuela *et al.*, 2007). Mediante interpretación visual se consideraron las categorías: a) agua de laguna, b) agua de río, c) urbana, d) vegetación de isla, e) vegetación ribereña y f) bosque nativo. Para cada clase se tomaron 3 áreas de muestreo, cada una de 10x10 píxeles, de las que se obtuvieron las firmas espectrales para todas las fechas.

Con el objeto de corroborar la relación entre los píxeles seleccionados como pseudo-invariantes se realizó un análisis estadístico de regresión y

rained crops, oilseed and forage plants, and has a high percentage of cultivated land (> 90%), a reduced portion of river and islands and the urban area – principally the cities of Paraná, Diamante and Crespo- is even smaller. Because of the characteristic humidity, the natural and planted vegetation and the wind regimen, the atmosphere is generally free of atmospheric dust which improves conditions for the obtaining of images. The Paraná River, to the west of the area analysed, has sectors in which the current carries in suspension a large quantity of sediment. However, in the interior of the islands, as the lagoons are clean and calm, the water is clear and therefore has low or no energy reflected.

MATERIALS AND METHODS

For the analysis, eight 5 TM Landsat images that cover the central west of the province of Entre Ríos (scene 226/82) were used. The dates of the images and angles of solar elevation were, as follows: 06/10/2008 (49.70°), 23/11/2008 (59.09°), 25/12/2008 (57.73°), 10/01/2009 (55.69°), 11/02/2009 (50.59°), 09/10/2009 (51.54°), 10/11/2009 (59.27°) and 13/01/2010 (56.50°).

The software used was Idrisi Andes in the pre-processing stage to correct the atmospheric effect with the dark surface model, "COST", that does not require knowledge of the atmosphere's transmissivity (Chavez, 1996). Next, the technique of registration of images to a reference image was used in the system Posgar 94 WGS 84, with a mean quadratic error less than 15 m and re-sampling by the nearest neighbour.

In the second stage, two techniques were used to compare the corrected data of the atmospheric effect and determine the pseudo-invariant elements. The first evaluates, by band, the differences in the absolute accumulated value of all the dates retaining the values inferior to the first percentile (1%). These pixels with lower variation were considered pseudo-invariants and the type of cover to which they belonged was determined according to their visual placement on a composition of bands.

The second technique consists of visually comparing the spectral signatures corresponding to 6 classes that could present pseudo-invariant elements as shown in diverse studies (Schott *et al.*, 1988; Coppin & Bauer, 1994; Brizuela *et al.*, 2007). Through visual interpretation the categories considered were: a) lagoon water; b) river water; c) urban; d) island vegetation; e) water vegetation, and f) native forest. For each class 3 sample areas were taken, each of 10x10 pixels, from

correlación lineal, por banda, de cada una de las fechas con respecto a la primera de la serie tomada como referencia. En el segundo caso se comparan visualmente las firmas espectrales de todas las fechas para verificar si las mismas presentan patrones semejantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las regresiones entre los valores de los píxeles pseudo-invariantes, de las bandas de fechas posteriores a la del 06/10/2008 con respecto a esta última, presentaron un ajuste elevado excepto para las bandas 1, 2, 3 y 4 en la fecha 11/02/2009 (Tabla 1).

La falta de correlación con la imagen del 11/02/2009 es debida seguramente a fallas durante la adquisición de los datos como ya se mencionó. Las restantes fechas tienen una correlación promedio, de todas las bandas, entre $r=0,91$ y $r=0,95$. La banda 1 es la que observa los valores menores ($0,84 < r < 0,91$) y las bandas 5 y 7 presentan los valores más altos ($r > 0,97$).

En la Figura 2 se muestra un sector de la escena

which spectral signatures were obtained for all the dates.

With the aim of corroborating the relationship between selected pixels as pseudo-invariants was performed a statistical analysis of regression and lineal correlation, by band, of each of the dates with respect to the first of the series taken as a reference. In the second case the spectral signatures of all the dates are compared visually to verify if these present the similar patterns.

RESULTS AND DISCUSSION

The regressions between the values of the pseudo-invariant pixels, of the bands after 06/10/2008 with respect to this date, presented an elevated agreement except for the bands 1, 2, 3 and 4 on the date 11/02/2009 (Table 1).

The lack of correlation with the image of 11-02-2009 is surely due to failure during the acquisition of the data already mentioned. The remaining dates have an average correlation, of all the bands, between $r=0.91$ and $r=0.95$. Band 1 is that which shows lesser values ($0.84 < r < 0.91$) and the bands 5 and 7 present

Table 1. Coefficients of regression and the correlation between corrected values of the image corresponding to the 06/10/2008 with the remaining dates: a, the origin ordinate; b, the slope; r, the coefficient of the correlation.

Tabla 1. Coeficientes de regresión y de correlación entre valores corregidos de la imagen correspondiente al 06/10/2008 con las restantes fechas, donde se indica: a, la ordenada al origen; b, la pendiente y r, el coeficiente de correlación.

Banda / Band	23/11/2008			25/12/2008			10/01/2009			11/02/2009		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r
1	-0,002	1,040	0,901	-0,007	1,048	0,898	-0,005	1,057	0,909	0,090	0,303	0,091
2	0,000	1,018	0,937	-0,007	1,044	0,939	-0,004	1,066	0,945	0,071	0,455	0,238
3	-0,001	1,031	0,930	0,000	0,996	0,936	-0,011	1,109	0,943	0,047	0,535	0,430
4	0,003	1,064	0,939	0,008	0,982	0,952	0,074	0,724	0,901	0,095	0,720	0,590
5	0,001	1,015	0,989	0,002	1,001	0,989	0,006	1,025	0,989	0,021	0,816	0,824
7	0,001	1,009	0,982	-0,002	1,011	0,984	0,000	1,037	0,984	0,013	0,739	0,811

Banda / Band	09/10/2009			10/11/2009			13/01/2010		
	a	b	r	a	b	r	a	b	R
1	0,020	0,794	0,839	0,001	0,982	0,899	0,013	0,833	0,856
2	0,015	0,850	0,907	0,005	0,938	0,928	0,010	0,875	0,910
3	0,007	0,932	0,914	0,004	0,940	0,929	0,006	0,839	0,897
4	0,013	1,122	0,870	0,008	1,018	0,933	0,019	0,995	0,895
5	-0,002	1,009	0,986	0,002	0,982	0,987	0,000	0,933	0,983
7	0,000	1,023	0,979	-0,002	0,997	0,980	-0,002	0,926	0,972

del 09/10/2009 en falso color compuesto 432 con la localización predominante de los píxeles pseudo-invariantes. Los de las bandas del visible (1, 2 y 3) se observan principalmente en lugares con cobertura de bosque nativo o con vegetación ribereña (Fig. 2b) y vegetación de islas (no se muestra). En banda 4 se localizan sobre algunos sectores del río especialmente cerca de la costa (Fig. 2c) y en las bandas 5 y 7 cubren principalmente el curso río, varios sectores bajos con vegetación ribereña (Fig. 2d) y en lagunas (no se muestra).

En cuanto a las firmas espectrales (Fig. 3), en la región del visible (bandas 1, 2 y 3), la menor variación se observa en las clases "bosque nativo", "vegetación de isla" y "vegetación ribereña", coincidiendo con

higher values ($r > 0.97$).

In Figure 2 a sector of the scene from 09/10/2009 is shown in false colour composing 432 with the localisation predominant in the pseudo-invariant pixels. The bands of the visible (1, 2 and 3) are observed principally in places with native forest cover or water vegetation (Fig. 2b) and island vegetation (not shown). In band 4 they are located in some sectors of the river especially close to the coast (Fig. 2c) and in bands 5 and 7 they cover principally the course of the river, various sectors low in water vegetation (Fig. 2d) and in lagoons (not shown).

With respect to the spectral signatures (Fig. 3), in the region of the visible (bands 1, 2 and 3), the lowest variation is observed in the classes "native forest", "island



a. Sub-área en falso color 432, 09/10/2009-
a. Sub-área en falso color 432, -09/10/2009-



b. Pseudo-invariantes (in green) of the bands 1, 2 and 3.
b. Pseudo-invariantes (en verde) de las bandas 1, 2 y 3.



c. Pseudo-invariantes (in yellow) of the band 4.
c. Pseudo-invariantes (en amarillo) de la banda 4.



d. Pseudo-invariantes (in violet) de of the bands 5 and 7.
d. Pseudo-invariantes (en violeta) de las bandas 5 y 7.

Figure 2. a, sub-área in false colour composed on 09/10/2009; b, with superposition of pseudo-invariantes of the bands 1, 2, 3; c, with superposition of pseudo-invariantes of the band 4; d, and bands 5 and 7.

Figura 2. a, sub-área en falso color compuesto del 09/10/2009; b, con superposición de pseudo-invariantes de las bandas 1, 2, 3; c, banda 4; d, bandas 5 y 7.

Brizuela *et al.* (2007), seguido de la clase "urbana". A su vez en "agua de laguna" los valores medios de la fecha 11/02/2009, para las bandas 1, 2, 3 y 4, se apartan de las restantes. Este comportamiento se debe a una falla del sistema durante adquisición de los datos en esa oportunidad presenta barridos incompletos no sistemáticos. Además podría estar afectada por otros factores como arrastre o deposición de sedimentos y las condiciones meteorológicas de ese día.

En las imágenes restantes la banda 4 presenta la menor coincidencia de firmas espectrales y ninguna de las clases presenta un patrón estable a través de las fechas. Esto podría explicarse porque en áreas densamente vegetadas en la época de las imágenes, octubre a febrero, los cambios en la vegetación son importantes y como la banda 4 del TM es más sensible a estas variaciones se debe esperar que los valores acusen estos cambios. La respuesta espectral en la región del infrarrojo cercano es variable con los cambios en la fenología (Tucker, 1979). Dentro de las áreas vegetadas, la variación es mayor en "vegetación de isla" y menor en "bosque nativo" y "vegetación ribereña", probablemente por la dinámica de la primera y los cambios en los niveles del río, probablemente debido a cambios en la sedimentación y variaciones en la cota del río. Lo mismo ocurre en las bandas 5 y 7 para "vegetación de isla" ya que también responden a la presencia de vegetación, aunque en menor grado que la banda 4, lo que explicaría sus respuestas en la muestra de esta clase.

En las bandas 5 y 7, todas las clases excepto "vegetación de isla" presentan un patrón estable a través del tiempo, posiblemente por el menor efecto de las condiciones atmosféricas sobre estas bandas.

La clase "urbana", usualmente considerada con valores pseudo-invariantes, presenta un patrón estable en el tiempo, excepto la del 06/10/2008, con valores medios similares para todas las bandas. Es coincidente con estudios previos en los que se indica que la respuesta espectral de los objetos construidos por el hombre es independiente de la estación del año o de ciclos biológicos (Schott *et al.*, 1988).

Los gráficos de las firmas espectrales para las categorías consideradas presentan formas similares entre sí y acordes a los patrones esperados, excepto para la imagen de febrero de 2009, Se observa también el efecto de la corrección aplicada

vegetación" and "water vegetation", coinciding with Brizuela *et al.* (2007), and followed by the "urban" class. In turn, in "lagoon water" the mean values of the date 11/02/2009, for the bands 1, 2, 3 and 4 are different to the rest. This behaviour is due to a failure of the system during acquisition of the data in this case presenting incomplete, non-systematic scans. Furthermore, other factors such as dragging or deposition of sediment and the meteorological conditions of the day could affect the spectral signature.

In the remaining images band 4 shows the least coincidence of spectral signatures and none of the classes show a stable pattern throughout the dates. The explanation could be that in areas of dense vegetation at the time of the images, October to February, the changes in vegetation are important and as band 4 of the TM is more sensitive to these variations it is to be expected that the values show these changes. The spectral response in the near-infrared region is variable with the changes in phenology (Tucker, 1979). Within the vegetation areas, the variation is higher in "island vegetation" and lower in "native forest" and "water vegetation", probably for the dynamics of the first and, the changes in the level of the river. The greatest differences of the spectral signatures are found in bands 3 and 4 for "river water", probably due to the changes in the sedimentation and variations in the height of the river. The same occurs in bands 5 and 7 for "island vegetation" as this also responds to the presence of vegetation, though at a lesser level than band 4, which explains the responses of the samples of this class.

In bands 5 and 7, all the classes except "island vegetation" show a stable pattern throughout the time of study, possibly for the lesser effect of the atmospheric conditions on these bands.

The "urban" class, usually considered with pseudo-invariant values, shows a stable pattern in the time of the study, except that of 06/10/2008, with similar mean values for all the bands. This agrees with previous studies indicating that the spectral response of objects constructed by man is independent of the year's seasons or biological circles (Schott *et al.*, 1988).

The graphics of the spectral signatures in the considered categories show similar forms amongst themselves and in accordance with expected patterns, except for the image of February 2009. The effect of the applied correction is observed, achieving similar mean values in the bands 1, 2 and 3 – except in "river water" – and in bands 5 and 7 – except in "island vegetation" –. Only the category "lagoon water" presents similarity in mean values in all the bands, without including the

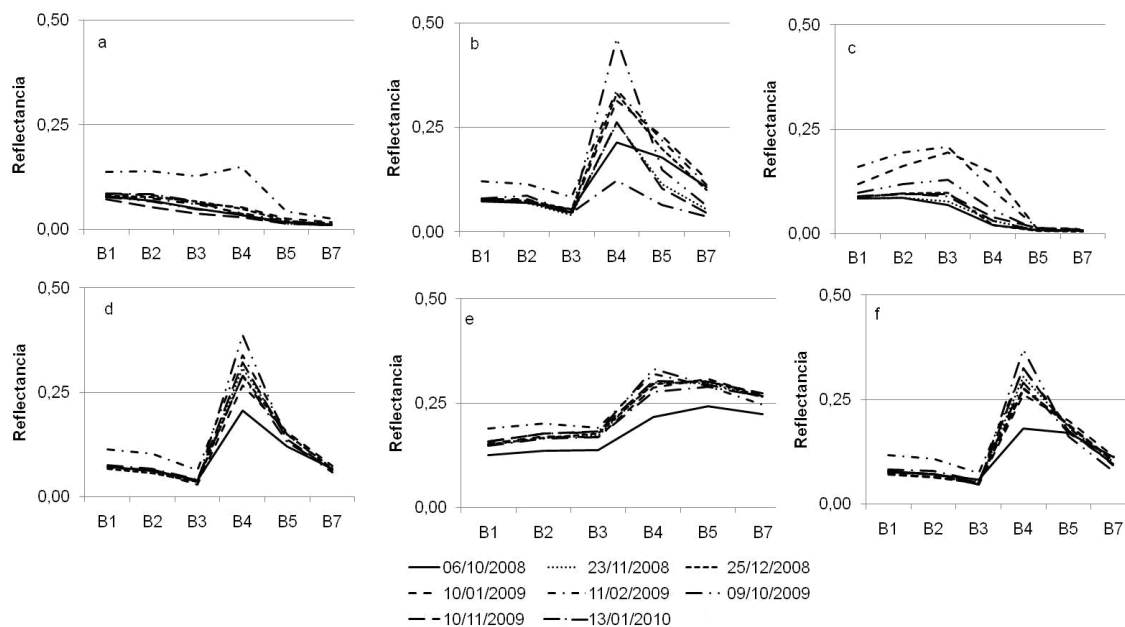


Figure 3. Spectral signatures of different classes of cover. References: a, lagoon water; b, island vegetation; c, native forest; e, urban; f, water vegetation.

Figura 3. Firmas espectrales de las distintas clases de cobertura. Referencias: a, agua de laguna; b, vegetación de isla; c, agua de río; d, bosque nativo; e, urbana; f, vegetación ribereña.

logrando valores medios similares en las bandas 1 2 y 3 en –salvo en “agua de río”– y en las bandas 5 y 7 –salvo en “vegetación de isla”–. La categoría “agua de laguna” es la única que presenta similitud en los valores medios de todas las bandas –sin incluir la imagen de febrero de 2009–.

En cuanto a la época del año las que corresponden a octubre y febrero, como se observa, tienen un comportamiento más variable que no es favorable para la determinación de los píxeles pseudo-invariantes. Por lo tanto, en las condiciones del presente estudio, el rango temporal de los pseudo-invariantes se acota al período cubierto por los meses de noviembre a enero.

Comparando los resultados de ambos métodos para determinar las clases con menor variación (consideradas como elementos pseudo-invariantes) se observa que en ambos casos las zonas son similares. “Bosque nativo”, “vegetación ribereña” y, en menor medida, “vegetación de isla” presentan menor variación en las bandas 1, 2 y 3. “Agua de río”, “bosque nativo”, “vegetación ribereña” y “agua de laguna” se muestran claramente como pseudo-invariantes en las bandas 5 y 7.

image of February 2009.

With respect to time of the year, for the dates that correspond to October and February, a more variable behaviour that is not favourable for the determining of the pseudo-invariant pixels is observed. Therefore, in the conditions of the present study, the temporal range of the pseudo-invariants is limited to the covered period from November to January.

Comparing the results of both methods to determine the classes with lesser variation (considering pseudo-invariant elements), it is observed that in both cases the zones are similar. “Native forest”, “water vegetation” and, in lesser measure, “island vegetation” show lesser variation in the bands 1, 2 and 3. “River water”, “native forest”, “water vegetation” and “lagoon water” show themselves clearly as pseudo-invariants in the bands 5 and 7.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In applying the atmospheric correction technique the results obtained are congruent in the elements that have to present similar reflectance values if they do not have important alterations which are detected by both methods.

It is concluded that in the bands 1, 2 and 3 the

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al aplicar la técnica de corrección atmosférica se obtienen resultados congruentes en los elementos que deben presentar valores de reflectancia similares si no sufren alteraciones importantes, detectándolos mediante ambos métodos.

Se concluye que en las bandas 1, 2 y 3 las categorías bosque nativo, vegetación ribereña y, en menor medida, vegetación de islas presentan, en las imágenes estudiadas, similitud en las firmas espectrales y se comportan como pseudo-invariantes. En la banda 4 acusen la mayor variabilidad y en las bandas 5 y 7 son similares en las diferentes categorías.

Estas clases que se comportan como pseudo invariantes, en la época estudiada entre los meses de noviembre a enero, pueden ser usadas para la normalización de series de imágenes ópticas.

Las imágenes estudiadas son de la misma época Primavera - Verano los ángulos de elevación solar son altos en un rango entre 49.70° y 59.27°. Se recomienda aumentar las observaciones y verificar si este comportamiento pseudo-invariante se mantiene cuando las imágenes son de otros meses, cuando aumenta el número de años entre las imágenes, o cuando el periodo estudiado incluye años del ENSO.

Se recomienda el uso del modelo de superficie oscura "COST" (Chavez, 1996) porque es simple de aplicar y produce resultados que hacen posible la comparación temporal de la respuesta espectral.

También se recomienda probar otros métodos de este tipo, recientemente desarrollados, para identificar pseudo-invariantes, como el método llamado "scatter plot matching" (SPM) propuesto para normalizar imágenes de Landsat-7 ETM+ a Landsat 5 TM convirtiendo los valores digitales a reflectancia en superficie (Maas & Rajan, 2010).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto "Integración de datos agrometeorológicos, de sensores remotos y de cultivos mediante técnicas de geoinformación en el centro oeste de Entre Ríos" con fondos otorgados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (PICT 06-1221) y la Universidad Nacional de Entre Ríos (PIDUNER 2128). A las instituciones que financiaron becas investigación (Iniciación en la Investigación -UNER- y Estímulo a las Vocaciones Científicas -Consejo Interuniversitario Nacional-).

categories native forest, water vegetation and, to a lesser degree, island vegetation present, in the images studied, similitude in the spectral signatures and behave like pseudo-invariants. In band 4 they show the highest variability and in the bands 5 and 7 they are similar in the different categories.

These classes that behave as pseudo-invariants, in the time studied from November to January, can be used for the normalisation of series of optic images.

The studied images are of the same time Spring – Summer; the solar elevation angles are high in a range between 49.70° and 59.27°. Increasing the observations is recommended as is verifying if this pseudo-invariant behaviour is maintained when the images are of other months, when the number of years between images increases or when the period studied includes years of the ENSO.

The use of the dark surface model "COST" (Chaves, 1996) is recommended because it is simple to apply and produces results that allow the temporal comparison of the spectral response.

Trying other, recently developed methods of this sort is also recommended to identify pseudo-invariants such as the method called "scatter plot matching" (SPM) proposed to normalise images of Landsat-7 ETM+ to Landsat 5 TM converting the digital values to superficial reflectance (Maas & Rajan, 2010).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was part of the project "Integration agrometeorological data, of remote sensing and crops through geoinformation techniques in the Central West of Entre Ríos" with a grant from the Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (PICT 06-1221) and the Universidad Nacional de Entre Ríos (PIDUNER 2128). To the institutions that financed research scholarships (Iniciación a la Investigación -UNER- and Estímulo a las Vocaciones Científicas -Consejo Interuniversitario Nacional-). To the anonymous reviewers of the journal *Scientia Interfluvius* for suggestions made.

A los revisores anónimos de la Revista Scientia Interfluvius por las sugerencias ofrecidas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. 2007. Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. En: Rivas R., Grisotto A., Sacido M. (ed.), Teledetección: hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Editorial Martín, Mar del Plata, Argentina, 207-214 pp.
- Chavez, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24:459-479.
- Chavez, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections – Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (9): 1025-1036.
- Chuvienco Salinero, E., 2008. Teledetección Ambiental, La observación de la Tierra desde el espacio, 3ª edition. Editorial Ariel, Barcelona, 594 pp.
- Coppin, P. R. & Bauer, M. E. 1994. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (4): 918-927.
- Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E. & Goetz, S. J. 1990. Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multitemporal, multisensory images. *Remote Sensing of Environment* 35 (1): 11-27.
- Jensen J.R, 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Second Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 316 pp.
- Maas, J. S. & Rajan, N. 2010. Normalizing and Converting Image DC Using Scatter Plot Matching. *Remote Sensing* 2 (7):1644-1661.
- Schott, J.R.; Salvaggio, C. & Volchok, W. J. 1988. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment* 26: 1-16.
- Teillet, P. M. 1986. Image correction for radiometric effects in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 7 (12): 1637-1651.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Vermonte, E. F.; Tanre, D.; Deuze, J. L.; Herman, M. & Morcrette, J. J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (3):675-686.
- Yang, X. & Lo, C. P. 2000. Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66 (8): 967-980.
- Yuan, D. & Elvidge, C. D. 1996. Comparison of relative radiometric normalization techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 51: 117- 126.

Recibido: Agosto 2012

Aceptado: Abril 2013