

Evaluación de la aptitud del NDVI y SR derivado de imágenes Landsat 5 TM para estimar parámetros biofísicos de plantaciones de pino con raleo sistemático

Gastón Mauro Díaz¹
Miriam Elisabet Presutti¹

¹Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Diagonal 113 esq 61 N° 469 Piso 2 (1900) La Plata, Buenos Aires Argentina
diazgastonmauro@yahoo.com.ar

Abstract. During the last years an important development of pines plantation have been occurred in the Norwest portion of Corrientes Province, Argentina. The main destination of the activity is the sawn goods so the timber thinning is required, primarily undertaken to improve the growth rate and quality of the remaining trees. Actually, Growth Models are a convenient tool for forest management, and these models need the input of biophysical parameters estimation. The satellite remote sensing data are being used to derive input to these models. The goal of this work is to evaluate the aptitude of Vegetation Index (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index and SR: Simple Ratio) to estimate biophysical parameters of the vegetation in *Pinus taeda* stands. The study cases were forest stands with the same forest management history; some of them were systematical thinning during 2006. Landsat images acquired on 2004, 2005 and 2007, prior and post thinning were analyzed. The NDVI and SR calculated from reflectance were analyzed at two levels: pixel and stand level, using the mean value. By analysis of variance (*ANOVA*) significant differences were found for both indices. An association between age plantation and indices were found and a decrease in the values in thinning stands.

Palabras Clave: Vegetation Indices, Forest stand, Índices de vegetación, rodales.

1. Introducción

El noreste de la Provincia de Corrientes, Argentina, presenta condiciones sociales, económicas y ecológicas para que se produzca un importante desarrollo de plantaciones forestales, como lo evidencia la tendencia creciente de incorporación de tierras a esta actividad (SAGPyA-GEF, 2007). Las especies forestales que usualmente se cultivan en el sur de Misiones y en el noreste de Corrientes pertenecen al género *Pinus* y *Eucalyptus*. Dentro del primero se planta *Pinus taeda*, *Pinus elliotti* var. *Elliotti* y *Pinus elliotti* var. *Elliotti* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

La información obtenida a través de teledetección satelital puede servir de entrada a modelos de crecimiento forestal, una herramienta vital para la planificación del manejo silvícola (García, 1988). Existen numerosos estudios que relacionan la cantidad y tipo de energía electromagnética registrada por sensores a bordo de plataformas espaciales, con parámetros de la vegetación boscosa en observación, algunos ejemplos son los trabajos de Flores et al. 2006; Hall et al. 2006 y Zheng et al. 2004. Por ejemplo, Flores et al. (2006) desarrolló con métodos empíricos un modelo lineal para traducir información obtenida a través de teledetección satelital en LAI (*Leaf Area Index*), para plantaciones de pino taeda en EEUU. En este orden de ideas se ha incorporado a modelos de crecimiento, como el 3PG (*Physiological Principles Predicting Growth*) desarrollado por Lansberg y Waring (1997), la teledetección satelital para la estimación de LAI a través del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

El objetivo de este trabajo es determinar si la aplicación de raleo y/o el cambio en los parámetros biofísicos de la vegetación linealmente correlacionados con la edad, influyen la magnitud de los índices de vegetación calculados a partir de imágenes satelitales Landsat 5 TM adquiridas previo y post raleo sistemático (corta de una fila cada cuatro y raleo selectivo de la masa remanente) en plantaciones forestales de pino taeda ubicadas en el NE de la provincia de Corrientes, Argentina.

2. Metodología

El área de estudio se ubica en el NE de la Provincia de Corrientes, Argentina, aproximadamente a los 28° 25' latitud S y 56° 1' longitud O. El paisaje está dominado por lomadas con red de drenaje de tipo dendrítico. Allí se desarrollan actividades como la ganadería sobre pasturas implantadas o pastizales naturales, la forestación con pinos y el cultivo de yerba mate, té, maíz o soja. El clima de Corrientes es subtropical húmedo, sin estación seca definida. Las lluvias son abundantes durante casi todo el año, el noreste de la provincia se encuentra entre las isohietas de 1600 y 1700 mm de precipitación media anual. La estación más lluviosa es el otoño. Las temperaturas estivales e invernales son relativamente elevadas, con atenuada variación anual. La temperatura media anual en el N es de 21,5°C, se han registrado máximas absolutas de 46,5°C. Las mínimas oscilan entre 1 y -5,5°C durante el invierno. En cuanto al régimen hídrico, lo usual es el exceso. (INTA-SAGPyA, 1990)

Se tomó como caso de estudio plantaciones de *Pinus taeda* L. (pino taeda) pertenecientes a la empresa Forestal Bosques del Plata S.A. Se utilizó la base de datos georreferenciada de la empresa para ubicar la zona en la que se concentraron las actividades de raleo. Se definió la superficie con plantaciones de historia silvicultural homogénea al momento del raleo, ejecutado durante el año 2006. Las plantaciones estudiadas se caracterizan como: Plantaciones de pino taeda con una densidad inicial de 1250 árboles.ha⁻¹, plantados sobre "loma" (Kandihumultes típicos) entre marzo y septiembre de 1996 en suelos de primera rotación anteriormente destinados a la ganadería. La distancia de plantación fue de 4m entre hileras y 2m en la hilera, siguiendo las curvas de nivel. La preparación del suelo fue uniforme para toda la superficie, al igual que las técnicas de plantación y los controles previos y posteriores a la misma. Todos los plantines fueron producidos bajo las mismas normas de calidad en el vivero de la empresa y la semilla utilizada fue de similar procedencia certificada.

El raleo consistió en la corta sistemática de una fila cada cuatro y el aclareo selectivo de la masa remanente, la madera es comercializada y los residuos de la cosecha permanecen en la plantación. La densidad final de la plantación es de 700 árboles.ha⁻¹.

El área de estudio se encuentra en la escena definida por el *path* 224 *row* 80 del WRS2. Se trabajó con tres imágenes Landsat 5 TM provistas por CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) y las fechas de adquisición son: 30 de noviembre de 2004 (04_11_30), 23 de mayo de 2005 (05_05_23) y 8 de febrero de 2007 (07_02_08).

Una imagen satelital de alta resolución espacial QuikBird (QB) adquirida en diciembre de 2006 que cubre enteramente la zona raleada, fue utilizada como apoyo de la base de datos de la empresa. Además, esta imagen se usó para identificar un sector cosechado, sobre el que se crearon 20 áreas circulares de 125 m de radio, utilizadas para la extracción de información de las imágenes satelitales L5TM, referente al comportamiento radiométrico de un ejemplo de sector cosechado.

La corrección geométrica consistió en ajustar cada imagen a la cartografía de la empresa. Como GCP (*ground control point*) se utilizaron principalmente los vértices de los límites prediales y cruces de caminos. Se aplicó una rectificación polinomial con el método de remuestreo del vecino más próximo (*nearest neighbor*). El grado de ajuste se evaluó por medio del Error Medio Cuadrático (RMS), se consideraron admisibles RMS < 1 píxel. El control de calidad, dada las reducidas dimensiones de la imagen, se realizó visualmente, asegurándose que existiera un buen ajuste entre los datos.

Usando los valores de *gain* y *offset* del *header file* se convirtió de ND (número digital) a radiancia (*Lsen*) y luego a *reflectancia* mediante la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{\pi \times Lsen_i \times d^2}{ES_i \times \cos \theta} \quad (1)$$

Donde R_i (*adimensional*) es la reflectividad en la banda i , $Lsen_i$ ($W/m^2 \times sr \times \mu m$) es la radiancia de la banda i , d (*adimensional*) es el factor de distancia entre la Tierra y el Sol en el día de la toma, ES_i ($W/m^2 \times sr \times \mu m$) es la irradiancia espectral solar exoatmosférica y θ (radianes) es el ángulo solar medido desde el cenit.

Con las imágenes satelitales corregidas geométrica y radiométricamente, se calcularon el NDVI y el SR (*Simple Ratio*) con las ecuaciones 2 y 3 píxel a píxel, utilizando las bandas correspondientes al rojo (bc3) y al infrarrojo próximo (bc4).

$$SR = bc4/bc3 \quad (2)$$

$$NDVI = (bc4 - bc3)/(bc3 + bc4) \quad (3)$$

Luego, se operó sobre la población de píxeles de cada rodal y del conjunto de rodales para obtener información estadística. Se calculó: Nro total de píxeles, Media aritmética, Mediana, Moda, Frecuencia de la Moda, Mínimo, Máximo, Rango y Desvío. Para determinar la normalidad de la distribución se recurrió al test de Shapiro Wilks (SW-W).

La población de rodales se divide en los sometidos a prácticas de raleo durante el 2006 y aquellos sin raleo. Para asegurar la representatividad de la muestra de los píxeles evaluados para cada rodal se definió el área de cada polígono muestral a partir de un buffer de 75 metros, de acuerdo con lo recomendado por Lencinas y Mohr-Bell (2007). Luego, se revisó cada caso en particular para verificar que no se promediaran píxeles evidentemente influenciados por la radiometría de caminos adyacentes, relictos de vegetación nativa, pastizales próximos o rodales adyacentes. Por último, mediante análisis gráfico se verificó el supuesto de que en la población de polígonos muestrales definida la forma y tamaño no influyen el valor medio del índice de vegetación ($NDVI_m$ y SR_m) extraído de la imagen.

La fecha de adquisición de la imagen define la edad de las plantaciones. En la Tabla 1 se establecen los tratamientos de interés que derivan de la población en estudio.

Tabla 1. Tratamientos derivados de la población en estudio.

Tratamiento	Imagen	Raleo	Edad	Repeticiones disponibles
1	04_11_30	No	8	23
2	05_05_23	No	9	
3	07_02_08	No	11	
4	07_02_08	Si	11	

Para realizar los análisis se seleccionaron aleatoriamente 15 repeticiones de las 23 disponibles para cada tratamiento y para cada índice de vegetación. Se realizó un análisis descriptivo y Análisis de la Varianza (ANOVA), tomando como fuentes de variación los tratamientos expuestos en la Tabla 1. Se analizaron los residuos para la verificación de los supuestos. Para la comparación de medias se utilizó el test de Tukey. Los métodos analíticos se acompañaron de análisis gráficos.

3. Resultados y Discusión

La Figura 1 representa el NDVI y SR a nivel de píxel para el sector cosechado (1089 píxeles), plantaciones raleadas (1973 píxeles) y plantaciones no raleadas (2272 píxeles), extraído de la imagen 07_02_08. Los índices de vegetación (IV) tienen un comportamiento claramente distintivo: en el SR se observa una relación más bien lineal entre los tipos de cobertura, la plantación sin raleo presenta los mayores niveles de SR, la plantación con raleo un nivel intermedio y el sector cosechado el nivel más bajo. La variación observada en la plantación raleada y no raleada es similar, mientras que en el sector cosechado es superior,

con mayor frecuencia de valores bajos de IV. En el NDVI la variación aumenta en los polígonos raleados con respecto a los no raleados y es mucho mayor en el sector cosechado, la simetría de la distribución se conserva en los tres casos, con una leve tendencia hacia los valores más bajos en el sector cosechado.

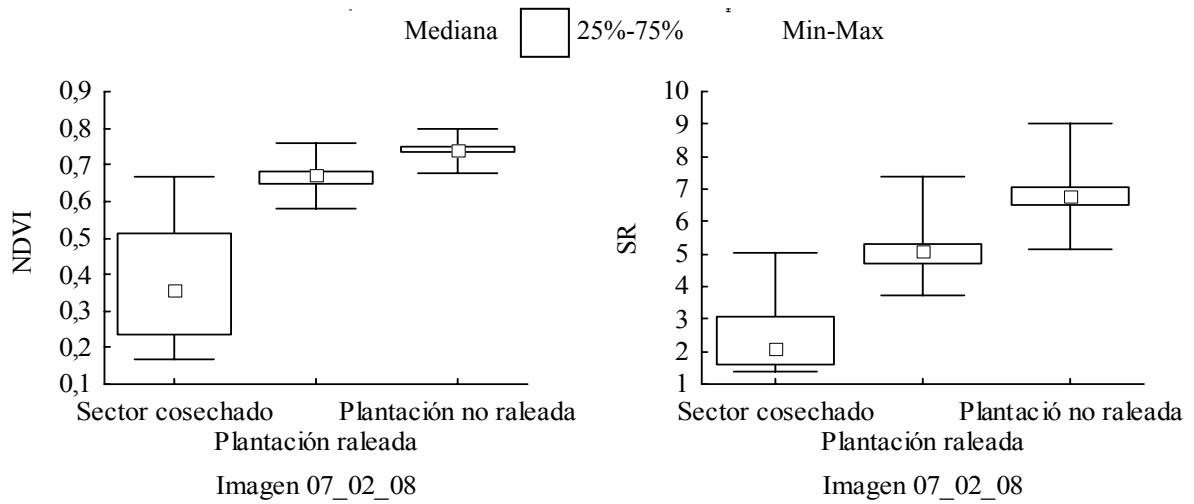


Figura 1. Distribución de NDVI y SR a nivel de píxel para la imagen 07_02_08 discriminado según cobertura terrestre.

En la Figura 2 puede verse que los píxeles del sector cosechado se separan claramente de los píxeles de plantaciones. En el gráfico “07_02_08 Plantaciones” se encuentran representados los píxeles de las plantaciones raleadas y no raleadas, observándose que los tipos de cobertura tienen algunos píxeles con valores similares. Allí se destaca el mayor rango de la b4 con respecto a la b3. Este mismo comportamiento fue reportado por Lencinas y Mohr-Bell (2007) como resultado del análisis del valor medio de ND L5TM de 5 rodales de pino de edades diferentes de la misma región aquí estudiada.

Se comprobó la existencia de diferencias significativas ($p > 0,01$) mediante ANOVA, la Tablas 2 y 3 muestran los resultados para el $NDVI_m$ y SR_m respectivamente.

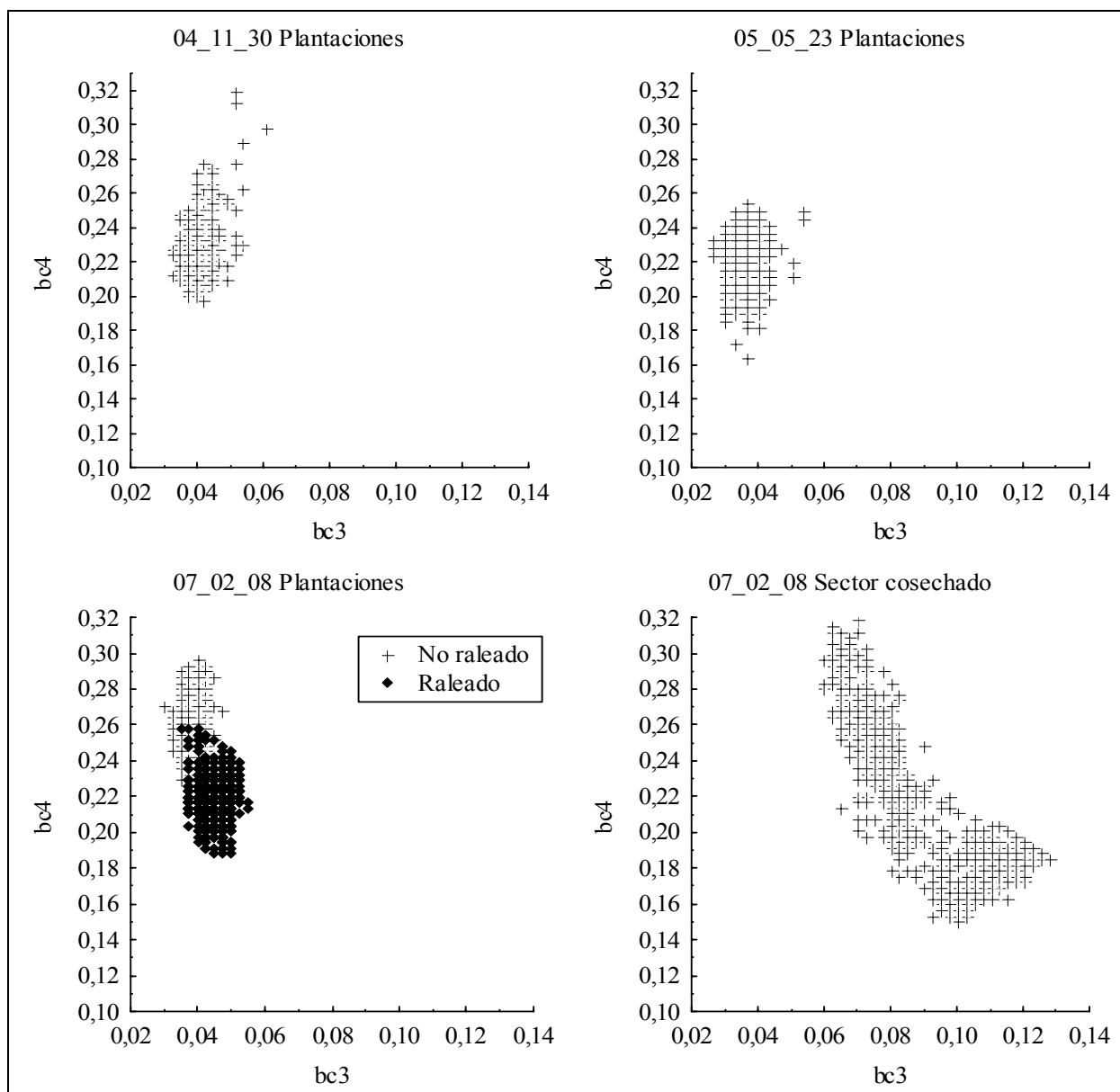


Figura 2. Reflectividad de bc4 en función de bc3 para los valores de píxeles (N=4245) que representan las plantaciones de pino analizadas en este trabajo, considerando una imagen por gráfico. El cuarto gráfico es para el sector cosechado de la imagen 07_02_08 (N=1089). Los cuatro gráficos tienen la misma escala en sus ejes.

Tabla 2. Tabla ANOVA para $NDVI_m$

Fuente	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	p
Imagen	3	0,01518	149,2	0,00
Error	56	0,00010		

Tabla 3. Tabla ANOVA para SR_m

Fuente	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	p
Imagen	3	9,290	272,56	0,00
Error	56	0,034		

Se realizó el test de Tukey de comparación múltiple de medias para diferenciar grupos homogéneos. Tanto para el $NDVI_m$ como para el SR_m (Tabla 4) se encontró la misma disposición de grupos homogéneos. Los tratamientos se separan en forma escalonada y sin agruparse, con el IV_m creciendo a medida que la edad de la plantación aumenta. El tratamiento con raleo se corresponde con el menor valor de IV .

Tabla 4. Test de Tukey para $NDVI_m$ y SR_m

Tratamiento	Imagen	Media $NDVI_m$	Media SR_m	Grupo homogéneo			
				1	2	3	4
4	07_02_08	0,666800	4,966000	****			
1	04_11_30	0,704533	5,807467		****		
2	05_05_23	0,718333	6,145200			****	
3	07_02_08	0,742933	6,861867				****

En la Figura 3 se representan los datos de valor medio para cada tratamiento, los mismos pueden consultarse en las Tabla 4. En el mismo gráfico se representa la escala de $NDVI$ y SR , el primero a la derecha y el segundo a la izquierda. Los círculos y cuadrados llenos y las líneas punteadas corresponden a $NDVI$, los círculos y cuadrados vacíos y las líneas continuas corresponden a SR .

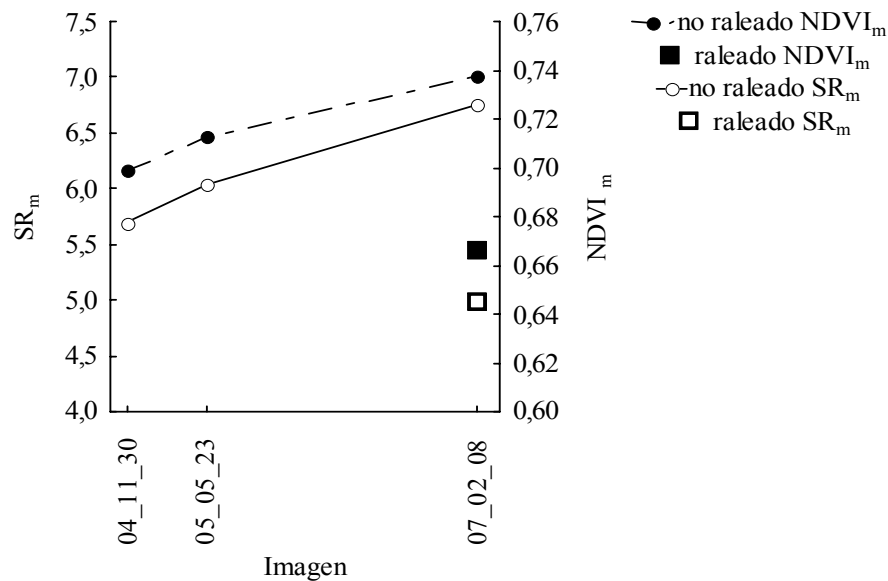


Figura 3. Diagrama de dispersión. El eje x muestra el código de cada imagen ordenados según una escala cronológica relativa. El gráfico fue construido con los valores de la Tabla 4.

El ANOVA realizado presenta resultados similares para SR_m y $NDVI_m$, por lo tanto se comentarán ambos resultados en conjunto. La comparación de medias por el test de Tuckey se representa en la Figura 3, donde puede notarse que a medida que la edad de las plantaciones representadas en las imágenes aumenta, el IV aumenta y que el tratamiento 4, donde se calcula el IV a plantaciones de 11 años con raleo, tiene el menor valor medio de IV .

En la Tabla 5 se expone información de los ajustes encontrados por distintos investigadores al relacionar datos del satélite Landsat 5 TM y Landsat 7 +ETM con parámetros biofísicos de bosques. En este trabajo se encontró una asociación entre la edad de las plantaciones representadas en las imágenes satelitales y el IV calculado (Figura 3). Si se

considera que la edad de las plantaciones no puede ser medida en base a teledetección satelital, surge la posibilidad de que el sensor haya respondido a la variación de algún parámetro biofísico de la plantación asociado con la edad. Lencinas y Mohr-Bell (2007) se basaron en el supuesto mencionado para desarrollar un modelo de estimación de edad de plantaciones de pino en el noreste de Corrientes, con técnicas de regresión múltiple y utilizando como fuente de información datos de inventario y una imagen L5TM adquirida en verano. Como resultado se ajustó una ecuación para predecir la edad de los rodales representados en la imagen a partir de las bandas bc4 y bc5 ($R^2=0,68$).

Tabla 5. Antecedentes sobre asociación entre datos satelitales y parámetros biofísicos de la vegetación.

Autor	Parámetro	Bosque	Ajuste (R^2)	Satélite
Flores et al. (2006)	LAI	Plantación, pino taeda	0,98	L5TM
Hall et al. (2006)	Altura total	Nativo, pino y latifoliada	0,65	L7 +ETM
Zheng et al. (2004)	Cerramiento de copa Biomasa aérea total	Nativo, pino	0,57 0,86	L7 +ETM

4. Conclusiones

Con las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo y siguiendo un procedimiento *standard* de corrección geométrica y radiométrica, se obtuvieron índices de vegetación que demuestran un comportamiento coherente con respecto a lo teóricamente esperado. En este trabajo se verificó una disminución en el IV de rodales raleados con respecto a rodales no raleados con idénticas historias silviculturales hasta el momento del raleo. En los resultados alcanzados se observa una asociación de los índices con la edad, probablemente reflejando cambios en parámetros biofísicos de la plantación asociados con dicha variable. Se recomienda la realización de estudios más detallados, ya que los resultados sugieren que la banda 4 (NIR) es sensible a los cambios en la humedad de los residuos vegetales y/o del suelo, por lo que las precipitaciones en frecuencia e intensidad, ocurridas antes de la fecha de adquisición, podrían tener un impacto sobre la radiancia registrada por el satélite en esta banda.

Dado que la técnica de regresión múltiple es la que usualmente se utiliza en trabajos donde se asocian datos satelitales con datos de inventario, se recomienda el uso de IV_m , considerando que en este trabajo se encontró que los datos a nivel de píxel no presentan una distribución normal.

Agradecimientos

Se agradece a CONAE y a la empresa Forestal Bosques del Plata S.A. por el aporte de información para la realización de este estudio.

Referencias

Flores, F. J.; Allen, H. L.; Cheshire H. M.; Davis J. G.; Fuentes M. y Kelting D. L.; **Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands**. Canadian Journal Forestry. Res. 36, p. 1587-1596. 2006.

Garcia, O. **Growth modelling - a(re)view**. New Zealand Forestry. 1988. v. 33(3). p. 14-17. 1988.

Hall, R.J.; Shahun, R. S. ; Arsenault E. J. y Case B. S. **Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume**. Forest Ecology and Management, v. 225, p. 378-390.

INTA; SAGyP. **Atlas de Suelos de la República Argentina**. Tomo I. Provincia Corrientes. p 513-590, 1990.

Lansberg J. J. y Waring R. H. **A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning**. Forest Ecology and Management, vol. 95, p. 209-228. 1997.

Lencinas, J. D. y Mohr-Bell. 2007. **Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat**. BOSQUE. v. 28 (2), p. 106-118.

SAGPyA-GEF. 2007. **Proyecto GEF, Conservación de la Biodiversidad en Paisajes Productivos Forestales**. Anexo 3. Información base para Patagonia Andina y Mesopotamia. <<http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/forestacion/indiproj/anexo%20gef.pdf>>. Acceso el 10.sep.2005.

Zheng, D.; Rademacher, J.; Chen, J.; Crow, T.; Bresee, M.; Le Moine, J. y Ryu, S. **Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA**. Remote Sensing of Environment. v. 93, p. 402–411. 2004.