



ESTIMACIÓN DE LA EDAD DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis* A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8

Martín SANDOVAL¹, Marcelo ARTURI¹, Juan GOYA¹, Maia PLAZA BEHR¹

RESUMEN

Existen algunas restricciones en el uso de imágenes satelitales para la estimación de parámetros estructurales de plantaciones, en parte, por la respuesta fisiológica y fenológica diferencial en cada estación del año. El objetivo del trabajo fue evaluar las variables retenidas en modelos que vinculan la reflectancia de imágenes LANDSAT 8 y la edad de rodales de *Eucalyptus grandis* y analizar el error absoluto medio (EAM) según las variables seleccionadas y estación del año. Las variables retenidas más frecuentemente fueron los logaritmos naturales de las bandas B3 y B6 y los índices de vegetación MSAVI y NBR2. En términos de coeficiente de variación los valores de los coeficientes de NBR2 tuvieron mayor dispersión con el 67%. La mayor dispersión fue en invierno (106%) y en otoño (85%). La más estable para todas las estaciones fue B3 (25%), seguida por B6 (33%) y MSAVI (48%). El EAM general fue 35,4 meses (+/-71,73), en invierno y verano fue 30 (+/-21,0), en primavera disminuyó a 27 (+/-6,1) y en otoño fue 53 meses (+/-54,33). Este comportamiento del modelo sugiere que el error puede ser significativamente menor si se seleccionan imágenes de primavera para la evaluación de la edad en plantaciones de *E. grandis*.

Palabras clave: *variación estacional, modelo predictivo, reflectancia, stepwise*

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las existencias de las plantaciones forestales, ya sea en volumen o biomasa, a escala local o regional representa un elemento de indudable importancia para la planificación del uso y la toma de decisiones sobre políticas que impactan sobre el recurso forestal. Para esta cuantificación, es necesario conocer diferentes parámetros estructurales. Estos atributos estructurales de los rodales tales como la densidad, la altura media, la distribución diamétrica y la edad, entre otros, se encuentran directamente relacionados con el rendimiento. Con este propósito y como una metodología ampliamente reconocida, se ha propuesto la utilización de imágenes satelitales que permiten la evaluación para largos períodos y áreas extensas (Donoghue, 2002). La modelización de las variables obtenidas a partir del análisis de las imágenes y su relación con la edad, permitiría una resolución rápida y a gran escala para posteriormente incorporar esta información en modelos de crecimiento en volumen o biomasa, que por ejemplo, podrían caracterizar las tasas de acumulación de carbono a diferentes escalas espaciales. No obstante la validez de la metodología se reconocen algunas restricciones en su aplicación. Los valores de reflectancia de la imagen y los atributos de la plantación pueden variar estacionalmente debido a que la respuesta espectral depende de la fisiología y estado fenológico de la especie a evaluar (Banskota et al., 2014).

El objetivo de este trabajo fue ajustar modelos predictivos de la edad de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* mediante la selección de variables espectrales de imágenes satelitales que resulten estables y significativas considerando diferencias estacionales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprendió rodales de *Eucalyptus grandis* de la empresa Ybyraty S.A en el extremo NE del Departamento de Colón, provincia de Entre Ríos (31°46'11"S 58° 9'4"O). Los rodales tuvieron

¹ Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA) – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – Universidad Nacional de La Plata. Correo electrónico: msandoval@agro.unlp.edu.ar



una superficie promedio de 6,99 ha (+/- 3,93 ha). La edad promedio fue de 97,01 meses (+/- 45,80), con un rango de entre 8 y 232 meses. Casi el 60% de la repoblación de estos rodales fue por rebrote y el resto plantación o replantación. Se trabajó con dos fuentes de datos: la edad en meses de cada rodal relevado y los datos de reflectancia provenientes de imágenes LANDSAT 8 para cada fecha de adquisición.

Datos de rodales con edad conocida

Se obtuvo la edad de 165 rodales de *E. grandis*, a partir de información provista por la empresa, considerando que la plantación se realiza en el mes de septiembre de cada año. Para cada rodal se calculó la edad en meses para cada momento de adquisición de la imagen LANDSAT 8 de la siguiente manera:

$$Edad_{(meses)} = (\text{año}_{\text{plantación}} - \text{año}_{\text{adquisición imagen}} - 1 \text{ año}) \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} + 3 \text{ meses} + \text{mes}_{\text{adquisición imagen}}$$

Datos provenientes de imágenes satelitales

Se obtuvo el producto LANDSAT 8 *Surface Reflectance* correspondiente a valores de reflectancia en la superficie de las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 y de los índices de vegetación EVI, SAVI, NDVI, NDMI, NBR, NBR2 y MSAVI para ese satélite (USGS, 2015). Las imágenes obtenidas correspondieron a verano (n=6), otoño (n=9), invierno (n=6) y primavera (n=6). Las 27 imágenes pertenecen al *path* y *row* 225/82, tienen fecha de adquisición durante el período 2013-2015 y presentan un nivel de cobertura de nubes inferior al 10% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Fechas de adquisición de las imágenes LANDSAT 8 agrupadas por estación del año

Estación	Fechas de adquisición
Verano	01/01/2014; 17/01/2014; 06/03/2014; 04/01/2015; 05/02/2015 y 09/03/2015
Otoño	20/04/2013; 06/05/2013; 07/06/2013; 22/03/2014; 23/04/2014; 25/05/2014; 10/06/2014; 10/04/2015 y 12/05/2015
Invierno	25/07/2013; 10/08/2013; 11/09/2013; 13/08/2014, 29/08/2014 y 15/07/2015
Primavera	14/11/2013, 30/11/2013; 17/11/2014; 03/12/2014; 19/12/2014 y 06/12/2015

De cada rodal se extrajeron los valores medios de reflectancia en la superficie para cada banda, índice espectral y fecha. Para evitar la interferencia radiativa de otros elementos no pertenecientes al rodal, este valor medio se obtuvo a partir de un buffer de -30 m de los límites del rodal. Ambos procesos se efectuaron con el software QGIS 2.18.3 (QGIS Development Team, 2016).

Finalmente, con estos datos se generó una matriz de 4455 filas por 14 columnas. Las filas resultan del producto de las 27 fechas de adquisición de la imagen por los 165 rodales evaluados. Las columnas están conformadas por la edad en meses para cada fecha de adquisición y los valores promedio de reflectancia de las 6 bandas y los 7 índices de vegetación para cada rodal.

Tratamiento estadístico

Se realizaron regresiones lineales múltiples entre los valores de edad en meses de cada rodal (variable dependiente) y los valores de reflectancia de las 6 bandas y los 7 índices de vegetación para las 27 fechas de adquisición de la imagen. Dado que la respuesta de diferentes bandas espectrales guarda una relación de saturación con la edad o la biomasa de plantaciones se transformaron las variables predictoras a logaritmo natural.

Se evaluó la frecuencia de retención de variables independientes significativas en los modelos de cada



fecha por el método *stepwise*, con el criterio de información bayesiano (BIC). Con las variables retenidas más frecuentemente por los modelos de cada fecha se realizaron nuevas regresiones lineales múltiples, sólo con esas variables. Finalmente, se construyó un único modelo producto de los valores medios de los coeficientes obtenidos para los modelos con las variables más frecuentemente retenidas.

De los modelos resultantes se analizaron el comportamiento de los valores de los parámetros a lo largo del tiempo, los valores medios de los parámetros para todas las fechas y por estación del año y los r^2 ajustados correspondientes.

Validación

Con el software R (R Core Team; 2015) se seleccionó un subconjunto de fechas al azar ($n=15$) para recalcular los valores medios de los parámetros de las variables más frecuentemente retenidas. Ese nuevo modelo se aplicó a una fecha al azar seleccionada de aquellas que no fueron elegidas para construirlo. Se calculó el error absoluto medio de esta estimación y este procedimiento se repitió 500 veces. Luego se analizaron los histogramas resultantes y los cuantiles 0,1 y 0,9.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada fecha, el método *stepwise* retuvo significativamente entre 3 y 10 variables diferentes para el ajuste del modelo de estimación de la edad. El valor modal fue de 6 variables retenidas, en aproximadamente el 26% de los modelos. El r^2 ajustado promedio de estos modelos fue de 0,75 (+/- 0,04). El error absoluto medio promedio aplicando estos modelos para cada fecha fue de 18,03 meses (+/- 19,19 meses) y los cuantiles 0,1 y 0,9 de 2,15 meses y 41,34 meses, respectivamente. A modo de referencia, Lencinas y Mohr-Bell (2007) estimaron un error medio de 2,2 años (26,4 meses) para *Eucalyptus* spp. para Corrientes con imágenes LANDSAT TM5.

Las variables retenidas más frecuentemente fueron los logaritmos naturales de NBR2 en el 62,96% de los casos, de B6 con el 59,26% y de B3 y MSAVI con el 48,15%. Las variables B2 y B7 fueron las menos retenidas y aparecen sólo en 7 modelos (25,93%). El error absoluto medio promedio aplicando los modelos para cada fecha de las variables más frecuentemente retenidas fue de 19,05 meses (+/- 20,23 meses) y los cuantiles 0,1 y 0,9 de 2,4 meses y 41,23 meses, respectivamente. En términos generales los coeficientes de cada variable fueron positivos para la B3 y NBR2 y negativos para B6 y MSAVI. Los valores de los parámetros de estas variables presentan fluctuaciones en cada estación del año (Gráfico 1). En términos de desvío estándar promedio para todas las variables las máximas variaciones se produjeron en otoño (1,68) y las menores en primavera (0,74); las estaciones de verano e invierno tuvieron un desvío estándar cercano a 1,2.

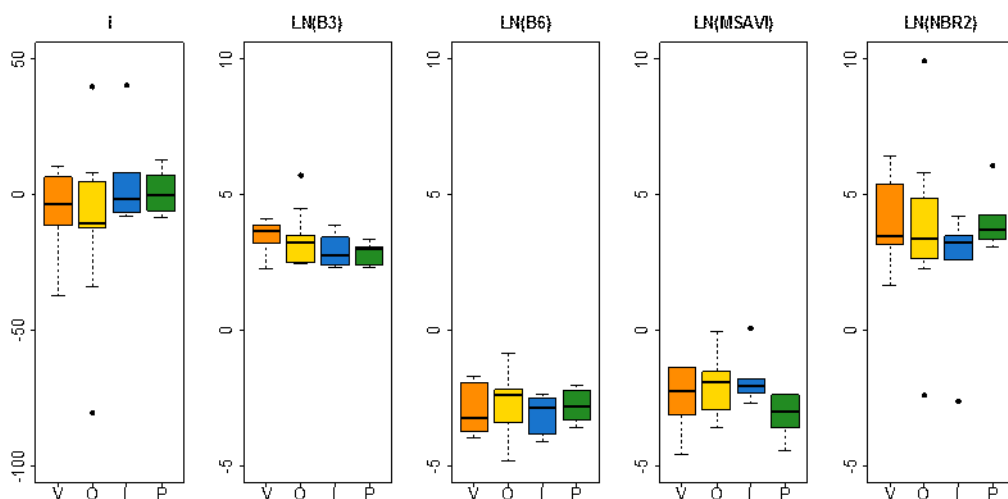


Gráfico 1. Distribución del valor de los parámetros para el intercepto (i) y las variables B3, B6, MSAVI y NBR2 respectivamente, por estación del año ($n=27$). V: verano (naranja); O: otoño (amarillo); I: invierno (azul); P: primavera (verde). Los puntos indican valores atípicos.



Los valores de los coeficientes de la variable NBR2 tienen en promedio mayor dispersión en términos de coeficiente de variación (CV) que el resto de las variables con el 67%. La mayor dispersión se da en invierno (106%) y en otoño (85%). La más estable en términos de CV para todas las estaciones fue B3 (25%), seguida por B6 (33%) y MSAVI (48%). Un detalle del comportamiento de los parámetros estadísticos para cada variable se ve en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Parámetros estadísticos del valor de los coeficientes para el intercepto (i) y las variables B3, B6, MSAVI y NBR2 por estación del año (n=27). CV: coeficiente de variación; V: verano; O: otoño; I: invierno; P: primavera; General: sin diferenciar por estación.

Variable	Media	Desvío estándar	CV (V)	CV (O)	CV (I)	CV (P)	CV (general)
i	-3,75	22,60	276%	295%	349%	842%	603%
B3	3,18	0,80	19%	33%	22%	14%	25%
B6	-2,84	0,93	33%	47%	24%	23%	33%
MSAVI	-2,32	1,11	51%	54%	54%	26%	48%
NBR2	3,58	2,40	43%	85%	106%	27%	67%

El modelo resultante tiene la siguiente forma:

$$y = e^{-3,75+3,18 \ln(B_3)-2,84 \ln(B_6)-2,32 \ln(MSAVI)+3,58 \ln(NBR_2)}$$

Donde y es la edad en meses del rodal; B_3 , B_6 , $MSAVI$, NBR_2 son los valores de reflectancia promedio obtenidos de LANDSAT 8.

El error absoluto medio aplicando este modelo fue de 35,4 meses (+/-71,73 meses) y los cuantiles 0,1 y 0,9 de 3,5 y 73,21 meses, respectivamente.

El proceso de validación seleccionando una fecha al azar para aplicar el modelo con un subconjunto de 15 fechas seleccionadas al azar y repetido 500 veces obtuvo un error absoluto medio promedio de 37,73 meses (+/-35,46), y los cuantiles 0,1 y 0,9 de 19,71 meses y 69,60 meses, respectivamente.

En la Gráfico 2, se observa además que la distribución de errores absolutos medios es diferente para cada estación. En términos generales, en invierno y verano los errores medios fueron del orden de los 30 meses (+/- 21) y en primavera, el error promedio disminuyó a 27 meses (+/-6,1). En cambio, para otoño el promedio de error fue de 53 meses (+/-54,33) y los cuantiles 0,1 y 0,9 de 18,49 y 94,46 meses, respectivamente.

Este comportamiento del modelo sugiere que los errores observados para un modelo general utilizando los valores de reflectancia de B_3 , B_6 , $MSAVI$ y NBR_2 de LANDSAT 8 pueden ser significativamente menores si se seleccionan imágenes de primavera para la evaluación de la edad en plantaciones de *E. grandis*.

Es necesario profundizar en la interpretación de la influencia de los aspectos fenológicos, fisiológicos y climáticos en el comportamiento del modelo.

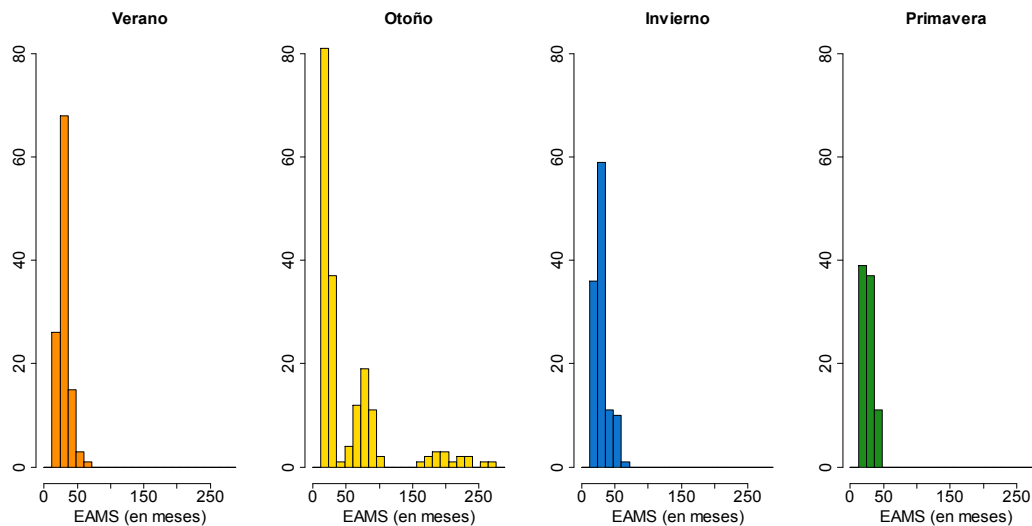


Gráfico 2. Distribución de frecuencias de los errores absolutos medios (EAMS) en meses por estación en el proceso de validación repetido 500 veces.

4. AGRADECIMIENTOS

A la empresa YBYRATY S.A. y en particular al Sr. Daniel Rodríguez por su invaluable colaboración para la obtención de datos y logística.

5. LITERATURA CITADA

BANSKOTA A.; KAYASTHA N., FALKOWSKI M.J.; WULDER M.A.; FROESE R.E., WHITE J.C. 2014. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review, *Canadian Journal of Remote Sensing* 40:5, 362-384, DOI: 10.1080/07038992.2014.987376

DONOGHUE DN. 2002. Remote sensing: environmental change. *Progress in Physical Geography* 26(1): 144-151.

LENCINAS J.D., MOHR-BELL D. 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. *Bosque (Valdivia)* v.28 n.2.

R CORE TEAM. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) - DEPARTMENT OF THE INTERIOR. 2015. Product Guide. LANDSAT surface reflectance – Derived spectral indices. Versión 2.7. June 2015.