

CUANTIFICACION DE LA DENSIDAD Y RIQUEZA DE LA REGENERACION DE ARBOLES NATIVOS EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* EN MISIONES MEDIANTE ÍNDICES POLARIMÉTRICOS DERIVADOS DE IMÁGENES SAR COSMOSKYMED

QUANTIFICATION OF NATIVE TREE REGENERATION DENSITY AND SPECIES RICHNESS IN *Pinus taeda* PLANTATIONS IN MISIONES USING POLARIMETRIC INDICES FROM SAR COSMOSKYMED IMAGES

Arturi Marcelo 1; Presutti M. 1; Ritter L. 1 ; Goya J. 1; Burns S. 1; Pinazo M. 2 y Azcona M.1

1 Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Universidad Nacional de La Plata. Diag. 113 esq 61 Piso 2. 1900. La Plata, BsAs, Argentina. +5402214236758 int 462. Email: presutti@agro.unlp.edu.ar
2INTA EEA Montecarlo, Misiones

Resumen

Las variaciones estructurales del sotobosque pueden no ser detectadas en imágenes satelitales ópticas como LANDSAT. Por el contrario las imágenes RADAR podrían cuantificar la estructura de las plantaciones a nivel del dosel como del sotobosque. Se exploró si los índices calculados de imágenes radar cuantifican la riqueza y densidad del sotobosque en plantaciones de *Pinus taeda* en Misiones. Se aplicó regresión lineal múltiple utilizando la densidad y riqueza del sotobosque como variables dependientes y los índices de la imagen como independientes. Los modelos presentaron buenos ajustes con la densidad del sotobosque si se incluye la edad de la plantación como predictor. No ocurrió lo mismo con la riqueza. Estos resultados son sólo de valor exploratorio ya que se dispuso de sólo 9 observaciones de campo. Sería posible monitorear la densidad del sotobosque en las plantaciones usando la edad del rodal y los índices calculados a partir de la imagen.

Palabras clave: Teledetección, radar, biometría forestal, biodiversidad

Summary

Structural variations of forest understorey are not usually detected by optical satellite images. However, radar images exhibit a sensitivity to structural variation at canopy and understorey level. It was explored here if indices from radar images are suitable for quantification of understorey density and species richness in *Pinus taeda* plantation in Misiones. Multiple regression models were fitted using tree saplings density and species richness as dependent variables and radar image indices as predictors. Suitable models were fitted for saplings combining image indices with stand age as predictors. No significant fit was attained for species richness. Results must be taken as exploratory since only 9 field observations were used. As a conclusion, tree saplings density could be monitored on the basis of stand age and radar image information.

Key words: Remote sensing, radar, forest biometry, biodiversity

Introducción

Las características estructurales de la vegetación pueden estimarse mediante la utilización de imágenes ópticas que son sensibles a la respuesta espectral de la superficie del dosel. Las variaciones estructurales del sotobosque pueden no reflejarse en la respuesta espectral a nivel de la superficie del dosel por lo que podrían no ser detectadas imágenes satelitales ópticas como LANDSAT. Por el contrario las imágenes RADAR son sensibles a variaciones en tres dimensiones de la estructura de la vegetación y podrían brindar información acerca de las variaciones estructurales de las plantaciones tanto a nivel del dosel como del sotobosque (Bergen *et al.* 2009).

Las plantaciones de *Pinus* representan un importante uso de la tierra en la Provincia de Misiones. Este uso de la tierra fue cuestionado en diferentes regiones geográficas por su efecto negativo sobre la biodiversidad, aunque existen evidencias de que la regeneración de especies vegetales nativas en su interior (Dummel y Pinazo 2013) llega a representar una importante contribución en términos de mantenimiento de la riqueza florística así como la provisión de hábitat y recursos para la fauna local (Lindenmayer 2003). La densidad y riqueza del sotobosque resulta afectado por la edad y las características estructurales de las plantaciones (Ritter *et al.* 2013). En las plantaciones de *Pinus taeda* de Misiones se encontró que la riqueza y densidad de la regeneración de árboles nativos aumentaron con la edad de la plantación y se vieron negativamente afectados por el área basal. El objetivo del presente trabajo fue explorar en que medida los índices copolarimétricos y creoss-polarimétricos calculados a partir imágenes radar permiten realizar estimaciones de la riqueza y densidad de la regeneración de arboles nativos en las plantaciones de *Pinus taeda* en Misiones. Se evaluó si la relación entre los datos obtenidos de la imagen y la densidad y riqueza del sotobosque fue indirecta, a través de la detección de variables estructurales del dosel de la plantación, o bien, si las variaciones estructurales del sotobosque fueron detectadas directamente por el sensor remoto.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en el Departamento de Iguazú. Se seleccionaron 9 rodales de *Pinus taeda* de diferentes edades y densidades. En cada rodal se establecieron cuatro parcelas de 300 m² distribuidas sistemáticamente con un espaciamiento mínimo de 20 m. Este grupo de parcelas fue tomado como una unidad de muestreo de 1200 m². En cada parcela se registró el número, DAP (diámetro del tallo a 1,3 m de altura) y especie de los individuos arbóreos nativos con DAP mayor o igual a 5 cm. También se registró el DAP y número de individuos de los pinos para caracterizar la estructura de la plantación. A partir de esas mediciones se estimó la densidad (ind./ha) y riqueza (número de especies) de las especies arbóreas nativas y el diámetro cuadrático medio (cm), área basal m²/ha) y densidad (ind./ha) de los pinos.

Análisis de imágenes

Las imágenes utilizadas en este trabajo son CSK Duales (dos modos de polarización), con una resolución espacial de 15 m, el modo de adquisición es Ping Pong/Stripmap (PP) con un ancho de barrido de 30 km. Las imágenes CSK nivel de procesamiento 1B fueron calibradas utilizando el programa de uso gratuito NEST 4C, convirtiendo la imágenes de Amplitud a coeficiente de dispersión (σ°), que es una magnitud física que contiene las propiedades del blanco. Las imágenes calibradas, fueron filtradas y reproyectadas con el fin de superponerlas con los datos medidos en las parcelas. Estas imágenes fueron exportadas a formato TIFF para leerla con el programa ERDAS Imagine, con el cual se realizó el análisis cuantitativo.

Finalmente, en ERDAS se generó un archivo con seis bandas de distintas polarizaciones y tres fechas distintas a partir de las cuales se generaron los índices co y cross polarimétricos: HH/VV y VV/HH y los índices cross-polarimétricos VV/HV y HH/HV.

Análisis estadísticos

Se aplicaron modelos de regresión lineal múltiple utilizando la densidad de la regeneración de arboles nativos como variable dependiente y los índices co-polarimétricos y crosspolarimétricos obtenidos de las imágenes radar como independientes (Modelo 1). Se llevó a cabo un proceso manual de selección de variables sobre la base de los valores de “t” en los coeficientes de regresión de cada una. De la misma manera se desarrolló un modelo lineal múltiple con la densidad de arboles nativos sobre el área basal de pino y la edad de la plantación (Modelo 2). Luego, los residuos de ese modelo fueron utilizados como variable dependiente en función de los índices radar seleccionados en el Modelo 1. De esta manera se evaluó si el modelo desarrollado sobre la base de la información satelital (Modelo 1) aportaba información adicional a la explicación basada en el Modelo 2. Finalmente se evaluó mejoraba el ajuste del modelo 1 si, además de las variables obtenidas de la imagen, se incorporaba la edad de la plantación (Modelo 4).

El mismo procedimiento se llevó a cabo para evaluar la capacidad de predecir la riqueza de la regeneración de arboles nativos a partir de la imagen RADAR.

Debido a que todos estos análisis se llevaron a cabo con solo 9 observaciones de campo los resultados derivados de los mismos deben tomarse con carácter exploratorio.

Resultados

Se halló un modelo de ajuste significativo de la densidad del sotobosque sobre la el índice cross-polarimétrico X-VV/HV (Tabla1). El mismo presentó alta dispersión con un R² de 0,24. El modelo de regresión de densidad del sotobosque sobre la edad y el área basal del rodal presentó un buen ajuste con un efecto positivo de la edad y negativo del área basal (Tabla 1). Los residuos de este modelo presentaron una regresión significativa sobre el índice cross-polarimétrico. El modelo de mayor R² fue el que incluyó la edad de la plantación e índice cross-polarimétrico con un R² de 0,89. El análisis gráfico de la distribución de los residuos no puso en evidencia falta de linealidad ni heterogeneidad de la varianza residual (Figura 1).

Tabla 1. Modelos de regresión de la densidad de la regeneración de arboles nativos sobre los índices calculados a partir de imágenes radar (modelo 1), sobre variables conocidas de la plantación (modelo 2), de los residuos del modelo 2 sobre índices de la imagen (modelo 3) y una combinación de información de la imágenes y del rodal (Modelo 4).

Table 1. Regression models for understory density as a function of indices calculated from radar images (Modelo 1), stand level information (Modelo 2), residuals from Modelo1 as a function of radar indices (Modelo 3) and a combination of radar and stand level information (Modelo 4). t: statistics value, P: value of probability, R²: coefficient of determination.

Variable dependiente en cada modelo	Parámetro	Estimación	t	P	R ²
Modelo 1: densidad (ind./ha)	Ordenada al origen	-5361	-1,83	0,1104	0,39
	b (x-VV/HV)	2113	2,46	0,0432	
Modelo 2: densidad (ind./ha)	Ordenada al origen	3142	2,14	0,0792	0,85
	b1 (Área basal del rodal)	-218	-2,98	0,0246	
	b2 (Edad del rodal)	201	6,65	0,0006	
Modelo 3: residuos del Modelo 2	Ordenada al origen	-2577	-2,89	0,0232	0,49
	b (x-VV/HV)	766	2,94	0,0216	
Modelo 4: densidad (ind./ha)	Ordenada al origen	-5289	-4,21	0,0056	0,89
	b1 (x-VV/HV)	1423	3,67	0,0104	
	b2 (Edad del rodal)	116	5,66	0,0013	

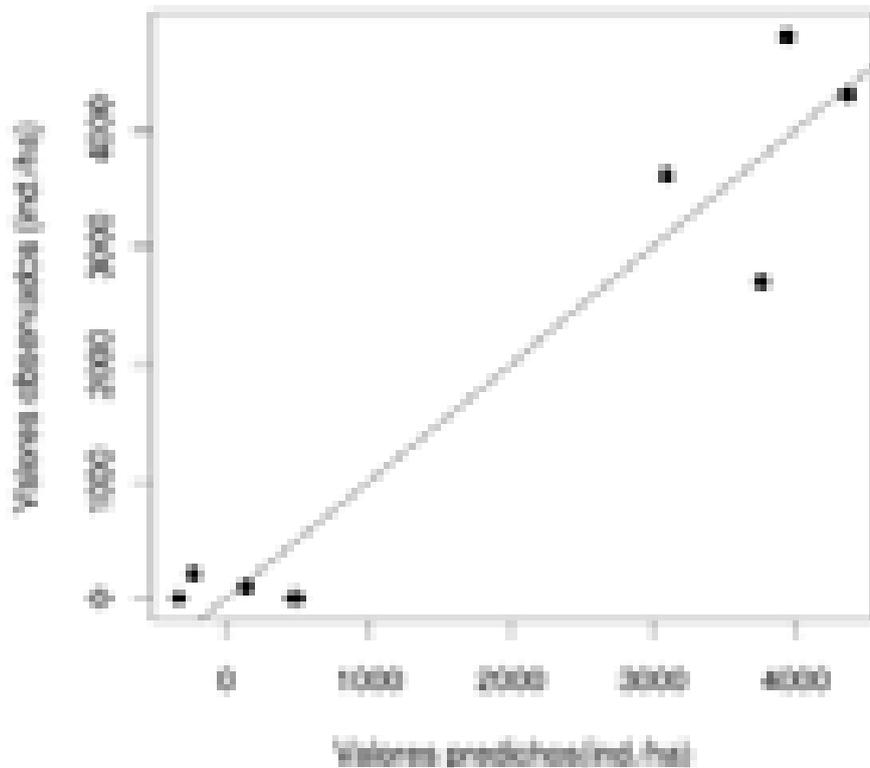


Figura 1. Valores observados y predichos para el modelo de la densidad de regeneración de árboles nativos sobre los valores de los índices polarimétricos. La línea indica la relación esperada para un modelo de ajuste perfecto con ordenada al origen 0 y pendiente 1.

Figure 1. Observed and predicted values for the model of sapling density as a function of polarimetric ratio. The line shows the expected relation for a perfect fit with origin=0 and slope=1.

Los modelos calculados para la riqueza del sotobosque no presentaron un ajuste significativo con los índices de la imagen radar (Tabla 2). En cambio el área basal y la edad del rodal presentaron un buen ajuste con un fuerte efecto positivo de la edad y un efecto marginalmente significativo y negativo del área basal. Los residuos de este modelo no se ajustaron con las variables provenientes de la imagen (Tabla 2). El modelo que combinó la edad del rodal con la información de la imagen presentó un efecto significativo de la edad pero no del índice cross-polarimétrico.

Tabla 2. Modelos de regresión de la riqueza de la regeneración de arboles nativos sobre los índices calculados a partir de imágenes radar (modelo 1), sobre variables conocidas de la plantación (modelo 2), de los residuos del modelo 2 sobre índices de la imagen (modelo 3) y una combinación de información de la imágenes y del rodal (Modelo 4).

Table 2. Regression models for tree saplings species richness as a function of indices calculated from radar images (Modelo 1), stand level information (Modelo 2), residuals from Modelo1 as a function of radar indices (Modelo 3) and a combination of radar and stand level information (Modelo 4). t: statistics value, P: value of probability, R2: coefficient of determination.

Discusión

Variable dependiente en cada modelo	Parámetro	Estimación	t	P	R ²
Modelo 1: riqueza (número de especies)	Ordenada al origen	-14,71	-1,34	0,2231	0,24
	b (x-VV/HV)	6,03	1,87	0,1031	
Modelo 2: riqueza (número de especies)	Ordenada al origen	8,89	1,43	0,2027	0,77
	b1 (Área basal del rodal)	-0,65	-2,13	0,0791	
	b2 (Edad del rodal)	0,64	5,08	0,0022	
Modelo 3: residuos del Modelo 2	Ordenada al origen	-5,89	-1,15	0,2872	0,04
	b (x-VV/HV)	1,75	1,49	0,2794	
Modelo 4: riqueza (número de especies)	Ordenada al origen	-14,18	-2,28	0,0624	0,75
	b1 (x-VV/HV)	0,41	3,89	0,0081	
	b2 (Edad del rodal)	3,64	1,87	0,1111	

La información proveniente de las imágenes permitió desarrollar modelos con un buen ajuste para estimación de la densidad del sotobosque de las plantaciones de *Pinus taeda* aunque no ocurrió lo mismo con la riqueza. Debido a que estos modelos fueron desarrollados con solamente 9 puntos de observación a campo los resultados deben ser considerados como de valor exploratorio. El modelo de la densidad de sotobosque en función de la edad y el área basal de los rodales arrojó el resultado indicado por trabajos previos que indicaron que la densidad y riqueza del sotobosque aumentan con la edad y disminuyen con el área basal de los rodales. El resultado destacable, en los análisis realizados en este trabajo, es que la información proveniente de la imagen explicó casi el 50% de la variación no explicada por la edad y el área basal del rodal. Ese ajuste indica que la imagen se diferencian directamente las variaciones estructurales aportadas por la regeneración de arboles nativos y que el ajuste del modelo no se debe a que la imagen detecta variaciones del área basal, que a su vez están relacionadas con la densidad del sotobosque.

La falta de ajuste de la riqueza indica que en la imagen no se detectan diferencias estructurales entre situaciones de similar densidad del sotobosque pero diferente riqueza florística. El modelo calculado con la edad y el área basal del rodal arrojaron los resultados esperados indicando un efecto positivo de la edad y negativo del área basal no se encontró un ajuste entre la riqueza del sotobosque y la información proveniente de la imagen.

Conclusión

Los resultados encontrados sugieren que sería posible monitorear la densidad del sotobosque en las plantaciones ya que el modelo que incluyó como variables predictoras a la edad del rodal y los índices calculados a partir de la imagen presentó un buen ajuste. La edad de las plantaciones puede determinarse mediante el análisis de secuencias temporales de imágenes y, en combinación con las imágenes radar, podrían realizarse estimaciones de la densidad del sotobosque, mediante el uso de sensores remotos.

Agradecimientos

Este trabajo contó con el financiamiento del Proyecto Forestal de Desarrollo, Ministerio de agricultura Ganadería y Pesca de la Nación y de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de La Plata. Las imágenes utilizadas fueron provistas por CO-NAE (Comisión de Actividades Espaciales) por la provisión de las imágenes radar a través del Proyecto AO-SAOCOM N° 38.

Bibliografía

- Bergen, K. M., S. J. Goetz, R. O. Dubayah, G. M. Henebry, C. T. Hunsaker, M. L. Imhoff, R. F. Nelson, G. G. Parker, y V. C. Radeloff. 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research* 114: 1-13.
- Dummel, C. y M. Pinazo. 2013. Efecto de variables de paisaje y de rodal sobre la diversidad de especies arbóreas en el sotobosque de plantaciones de *Pinus taeda* en la provincia de Misiones, Argentina. *Bosque* 34: 331-342.
- Faraway J.J., 2006. *Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models*: Chapman & Hall, 301 pp.
- Lindenmayer D.B. , R.J. Hobbs and D. Salt. 2003. Plantation forests and biodiversity conservation. *Australian Forestry*, 66: 62–66.
- Ritter, L.J., M.F Arturi, S.L. Burns, J. F. Goya y M.A. Pinazo. 2013. Regeneración de árboles nativos en plantaciones de *pinus taeda* l. en misiones, argentina: efectos de la edad de la plantación y la aplicación de raleos. 4to Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano Iguazú.