

SINCRONIZADA TEMPORAL ENTRE EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI Y LA PRECIPITACIÓN EN UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus* spp.

(Temporal Synchronization between the NDVI Vegetation Index and Precipitation in a Plantation of *Eucalyptus* spp.)

Zorilla Eleazar Vásquez¹ y Franklin Paredes-Trejo²

¹ Desarrollos Forestales San Carlos, S.A., eleazar.zorrilla@paveca.com.ve.

² Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales 'Ezequiel Zamora', San Carlos, estado Cojedes, Venezuela franklinparedes75@gmail.com

Autor de correspondencia: Zorilla Eleazar Vásquez¹

Recibido: 04-04-2020

Aceptado: 30-04-2020

RESUMEN

Recientemente, los índices de vegetación (IV) derivados de plataformas satelitales han atraído la atención del sector forestal como una novedosa herramienta para monitorear la biomasa aérea en plantaciones de eucaliptos. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), resalta sobre otros IV por su simplicidad, fiabilidad y uso generalizado en el sector forestal. Pese a lo anterior, el uso operacional del NDVI en las plantaciones de eucaliptos venezolanas no se ha generalizado. En este estudio se valoró el NDVI derivado del producto GIMMS MODIS Terra y su relación con la precipitación (P) en la Empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A (DEFORSA). El periodo de estudio abarcó desde mayo 2017 hasta junio 2019. Los resultados revelaron que: (i) el NDVI máximo a 30 días (NDVI30) provee información confiable sobre la generación de biomasa aérea; (ii) una vez que la plantación alcanza su máximo desarrollo a nivel del dosel superior, el NDVI30 guarda una estrecha relación lineal con la P.

Palabras clave: *NDVI, Eucalipto, crecimiento forestal.*

SUMMARY

Nowadays, satellite-based vegetation indices (IV) are receiving increasing attention of the forestry sector as a novel tool to monitor aerial biomass in eucalyptus plantations. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) stands out in relation to other IVs because its simplicity, reliability and extensive use within the forestry sector. Despite these features, the operational use of NDVI has not been generalized in Venezuelan eucalyptus plantations. In this study, the NDVI derived from the GIMMS MODIS Terra product and its linear relationship with precipitation (P) was assessed at the Empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A (DEFORSA). The study period spanned from May 2017 to June 2019. The results revealed that: (i) the maximum 30-day NDVI (NDVI30) provides reliable information on the generation of canopy-level biomass; (ii) once the plantation reaches its canopy-level maximum development, NDVI30 shows a strong linear relationship with P.

Keywords: *NDVI, Eucalyptus, forest growth.*

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de Eucalyptus de rápido crecimiento (i.e. 5-7 años) tienen gran importancia en las regiones tropicales como sumideros de carbono (Zhou et al. 2017), siendo una alternativa para afrontar el incremento de los gases de efecto invernadero (Luna et al. 2016) y proveer servicios ecosistémicos a las comunidades donde se establecen (Teixeira et al. 2019). En términos de cobertura espacial y velocidad de crecimiento, Brasil es líder en Latinoamérica con 7,7 millones de hectáreas (ha) plantadas de eucalipto (IBA, 2017).

Venezuela cuenta cerca de 1 x 10⁶ ha de Eucalyptus plantados, las cuales proveen materia prima para elaborar pulpa de papel, paletas, estantillos, carbón entre otros productos (Hillstrom y Hillstrom, 2004). Debido a la gran extensión espacial de las plantaciones forestales hay una ingente necesidad de desarrollar herramientas de bajo costo para monitorear su biomasa sobre el terreno. En este contexto, la percepción remota con sensores orbitales ha captado el interés del sector forestal. Por ejemplo, el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) ha demostrado su utilidad como bioindicador de la producción de biomasa aérea en plantaciones brasileñas de Eucalipto (Marsden et al. 2010; Le Maire et al. 2011; Berra et al. 2017), también permite valorar el impacto que causa la sequía sobre ellas (i.e. ausencia prolongada de precipitaciones) (McMahon y Jackson, 2019). A pesar de estos hallazgos, las empresas venezolanas del ramo forestal con Eucalyptus no suelen contemplar en sus planes de manejo el uso operacional de índices de vegetación satelitales.

La Empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A (DEFORSA) se dedica a la producción de materia prima para la elaboración de pulpa del papel a partir de plantaciones de Eucaliptos. Motivada por los avances en el uso de índices de vegetación derivado de satélites sobre grandes plantaciones de Eucalyptus en Brasil, DEFORSA exploró la evolución del NDVI y su relación con

la precipitación (P) a lo largo de tres años con el objeto de evaluar su implementación operacional en el mediano plazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las parcelas 21 (46,50 ha), 25 (10,69 ha) y 26 (8,55 ha) son la unidad de estudio (UE, Figura 1). Los criterios para su selección fueron: i) plantados en 2017; ii) manejo silvopastoril con densidad multiclonar de 1111 plantas/ha (en gran medida, E. urophylla); iii) superficie mayor a 10 ha; iv) historial sobre afectaciones bióticas (e.g. plagas) y abióticas (e.g. sequías) disponible.

De acuerdo a la base de datos LocClim de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), la UE se localiza a 142 metros sobre el nivel medio del mar (msnm); se categoriza como BSh según la clasificación climática de Köppen; con temperatura media, máxima y mínima del aire promedio anual de 26,60, 32,60 y 18,20 °C, respectivamente; P con un régimen unimodal y media anual de 1365 mm, siendo junio-agosto y enero-marzo los trimestres más húmedo y seco; con una evaporación media anual de 1066 mm (Gommes et al. 2004). Por capacidad de uso, los suelos son clase III (Strebin y Larreal, 1984). Bajo la clasificación de suelo de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), las parcelas presentan suelos PVA_{d5}, exceptuando las dos subparcelas 21 más al noreste donde prevalecen FX_{d2}.

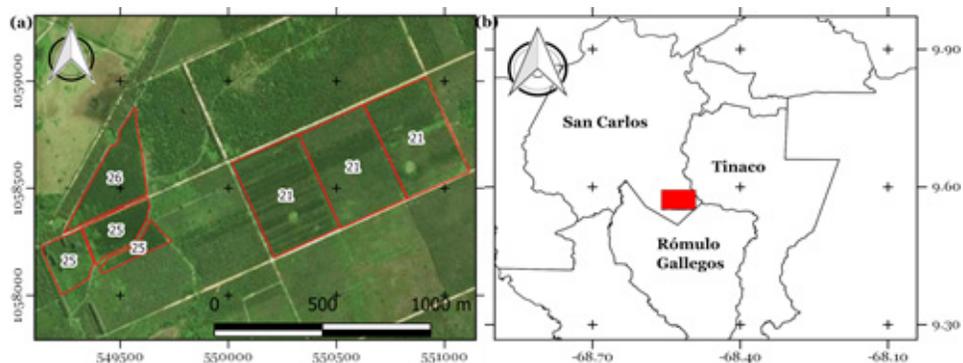


Figura 1. Se muestra la ubicación espacial de: (a) las parcelas estudiadas; (b) DEFORSA respecto a los municipios San Carlos, Tinaco y Rómulo Gallegos en Cojedes.

Nota: la imagen en Figura 1a fue tomada por PlanetScope™ (fecha: 04 julio 2019).

Los montos diarios de P (en mm) se tomaron del pluviómetro Lote 1 (549 982 E 1 058 622 N), por ser el más próximo a la UE, cubriendo desde 01/05/2017 hasta 31/07/2019 sin ocurrencia de datos faltantes (822 días). Del producto GIMMS MODIS Terra (i.e. GMOD09Q1) distribuido por la agencia The Global Inventory Modelling and Mapping Studies – National Aeronautics and Space Administration (GIMMS-NASA) se extrajeron 155 imágenes de NDVI compuesto a 8 días (<https://go.nasa.gov/2QyI4hd>) entre enero 2017 y junio 2019. Luego, sobre cada parcela (i.e. 21, 25 y 26) se promedió el NDVI vía media aritmética. Para preservar la coherencia temporal con P y minimizar el efecto de las nubes sobre el NDVI, se acumuló P a 30 días (P30) y extrajo el NDVI máximo sobre igual cantidad de días (NDVI30), resultando dos series cubriendo desde 30/05/2017 hasta 19/06/2019 (26 valores de NDVI30 y P30; en lo sucesivo, periodo de estudio). El NDVI de GMOD09Q1 se deriva de la reflectancia en las bandas espectrales rojo e infrarrojo cercano captada por el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite de órbita baja Terra. La escogencia de este producto respondió a su uso frecuente en la valoración de biomasa aérea en plantaciones de Eucalyptus (Le Maire et al. 2011). Se refiere el lector a Marsden et al. (2010) para más detalles sobre NDVI-MODIS.

El sincronizado temporal entre NDVI30 y P30 se examinó con un análisis de correlación lineal de Pearson (R). La respuesta retardada entre ambas se exploró desfasando 'k' veces P30 con relación a NDVI30 en un tiempo 't', donde t representa intervalos de 30 días y 'k' al número de intervalos desfasados. Por ejemplo, P30 [t-k] versus NDVI30 [t] siendo k = 1, compara NDVI30 en un momento t con P30 registrada 30 días previos a t. Se partió de la hipótesis que la variabilidad del NDVI en el dosel superior del Eucalipto depende parcialmente de la humedad disponible en la zona radicular, por tanto, del aporte o ausencia de P antecedente. Por simplicidad, los resultados refieren al último día del intervalo de 30 días analizado. Por ejemplo, P30 el 19/06/2019, es la precipitación diaria acumulada entre el 21/05/2019 y 19/06/2019.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el periodo de estudio (i.e. 30/05/2017 hasta 19/06/2019), P30 mostró una media de 113,08 mm. El máximo P30 sucedió el 29/06/2017 (284,60 mm), mientras que los mínimos (ausencia de lluvia) ocurrieron el 26/12/2017; en 2018, el 24/02 y 21/12; en 2019, el 20/01, 19/02, 21/03 y 20/04. Es decir, se observaron 1, 2 y 4 rachas secas, con al menos 30 días de duración en 2017, 2018 y 2019 respectivamente. En DEFORSA, la ocurrencia de rachas secas es frecuente durante estos meses (Carrero et al. 2018).

En las parcelas 21, 25 y 26 el NDVI30 varió desde 0,402 hasta 0,880 con media = 0,737; 0,556 hasta 0,874 con media = 0,767; y 0,388 hasta 0,884 con media = 0,758, respectivamente. Como se esperaba, el NDVI30 evolucionó en estrecha relación con el manejo y la típica fenología del eucalipto (Figura 2). Un rápido descenso del NDVI30 coincidió con la preparación del suelo precedente a las labores de plantación. El mínimo de NDVI30 fue cercano a 0,400 en las parcelas P21 y P26, y alrededor de 0,55 en la parcela 25. Aunque estos valores están dentro del rango reportado por Le Maire et al. (2011) para plantaciones con clones de *E. grandis* y *E. urophylla* en el estado brasileiro de São Paulo, son moderadamente altos con relación al promedio de 0,30 referido por Marsden et al. (2010) durante la etapa de corte y plantado. La discrepancia puede ser atribuida al manejo silvopastoril que lleva DEFORSA en la UE. En efecto, durante la preparación del suelo, este último no es totalmente desprovisto de vegetación, dada la presencia de pastos entre los hilos y en menor grado, residuos forestales.

En este caso, el NDVI30 refleja la actividad fotosintética del pastizal, explicando así, la ocurrencia de NDVI30 mínimos inusualmente altos.

El tiempo transcurrido entre la ocurrencia de los NDVI30 mínimo (labores de plantación) y máximo fue de 570, 600 y 510 días para las parcelas 21, 26 y 25 respectivamente. Sobre este particular, Le Maire et al. (2011) reportaron cerca de dos años (730 días), revelando que la velocidad de desarrollo de biomasa aérea es mayor en la UE. La prevalencia de condiciones ambientales más cálida en las plantaciones de DEFORSA (26,60 °C) que su contraparte brasilera (20,20 °C), podría haber favorecido la conformación del dosel en menor tiempo.

La Figura 2 revela que después de ocurrir el NDVI30 máximo, este índice manifiesta una marcada estacionalidad caracterizada por descender en los meses secos (ralentización en la producción de hojas y caída de hojas), y ascender en los meses húmedos. Lo cual está en línea con los hallazgos de Le Maire et al. (2011), siendo por tanto un rasgo propio del eucalipto.

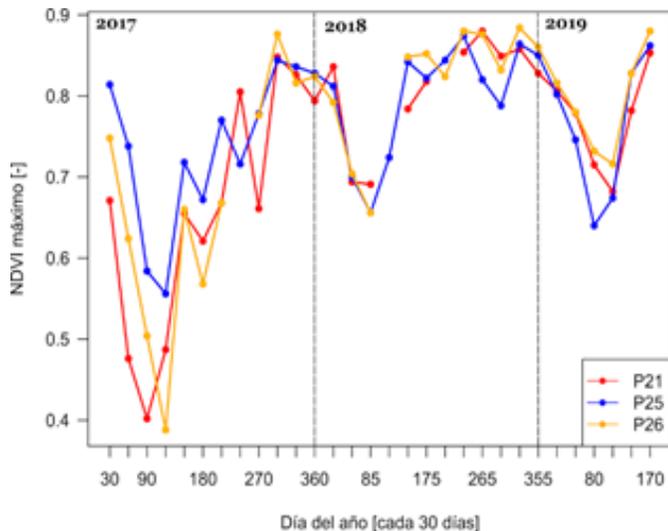


Figura 2. NDVI30 en las parcelas 21, 25 y 26 entre 30/05/2017 y 19/06/2019.

Nota: los vacíos en las series se deben a datos faltantes en el producto GMOD09Q1 (presencia de nubes).

La relación entre NDVI30 y P30 a través de R se resume en la Figura 3 y la Tabla 1. La mayor magnitud se observó con $k = 3$; es decir, la aportación o ausencia de P tiende a incrementar o decrecer ligeramente el NDVI unos 3 meses (90 días) después. Una inspección más profunda mostró que entre el momento de plantación y la ocurrencia del NDVI30 máximo (etapa 1), la relación NDVI-P es moderadamente débil, pero luego se robustece (etapa 2). A manera de ejemplo, en la parcela 25 se registró valores R de 0,201 y 0,609 respectivamente para las etapas 1 y 2, sugiriendo que la variabilidad de P en los primeros dos años es menos importante para la generación de biomasa aérea que en los años siguientes. Los datos colectados no proveen suficiente información para explicar el porqué de esta singularidad, siendo necesario su estudio en trabajos futuros; no obstante, el NDVI30 se muestra como un bioindicador de generación de biomasa aérea durante la etapa 2 de desarrollo de la plantación bastante confiable.

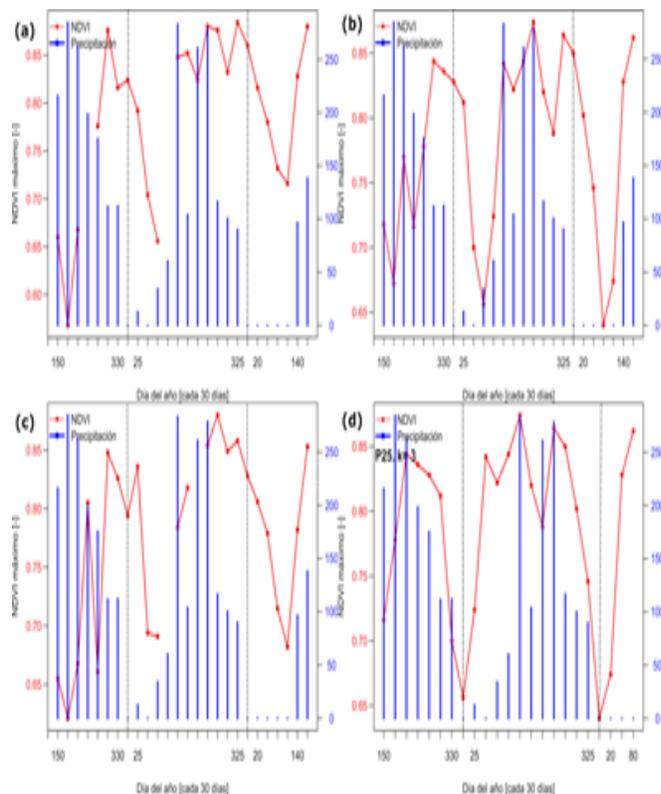


Figura 3. NDVI30 vs P30 en las parcelas: (a) 21; (b) 25; (c) 26; y (d) 25 con $k = 3$

Tabla 1. Correlación lineal de Pearson entre P30 [t-k] versus NDVI30 [t] para k desfases.

k [30 días]	P21	P25	P26
-5	0,111	0,016	0,027
-4	0,242	0,230	0,166
-3	0,268	0,331	0,262
-2	0,184	0,275	0,169
-1	0,113	0,260	0,113
0	-0,167	0,201	0,101

Nota: la correlación de mayor magnitud se indica en negrita para cada parcela.

CONCLUSIONES

La inspección del NDVI máximo (derivado del producto GIMMS MODIS Terra) a 30 días (NDVI30) sobre algunas plantaciones de eucaliptos ubicadas en DEFORSA, reveló su potencial operacional para monitorear la generación de biomasa aérea. Por otro lado, se evidenció que una vez la plantación alcanza su máximo desarrollo a nivel del dosel superior, el NDVI30 provee información indirecta sobre la variabilidad de la precipitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berra, E. F.; Fontana, D. C. & Kuplich, T. M. 2017. Tree age as adjustment factor to NDVI. *Revista Árvore*, 41(3).
- Carrero, O.; Stape, J. L.; Allen, L.; Arrevillaga, M. C. & Ladeira, M. 2018. Productivity gains from weed control and fertilization of short-rotation Eucalyptus plantations in the Venezuelan Western Llanos. *Forest Ecology and Management*, (430), 566-575.
- Figura 3. NDVI30 vs P30 en las parcelas: (a) 21; (b) 25; (c) 26; y (d) 25 con $k = 3$
- Gommes, R.; Grieser, J. & Bernardi, M. 2004. FAO agroclimatic databases and mapping tools. *Eur Soc Agron Newsl*, (22), 32-36.
- Hillstrom, K. & Hillstrom, L.(2004. Latin America and the Caribbean: A Continental Overview of Environmental Issues. ABC-CLIO. 266 p.
- IBA 2017. Indústria Brasileira de Árvores. Árvores Plantadas. Recuperado de <https://www.iba.org/arvores-plantadas>.
- Le Maire, G.; Marsden, C.; Nouvellon, Y.; Grinand, C.; Hakamada, R.; Stape, J. L. & Laclau, J. P. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2613-2625.
- Luna, R. K.; Thakur, N. S.; Gunaga, R. P. & Kumar, V.(2016. Biomass, carbon stock and carbon dioxide removal across different girth classes of Eucalyptus species in Punjab: Implication for Eucalyptus plantations. *Journal of Tree Sciences*, 35(1), 13-20.
- Marsden, C.; Le Maire, G.; Stape, J. L.; Seen, D. L.; Roupsard, O.; Cabral, O. & Nouvellon, Y. 2010. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1741-1753.
- McMahon, D. E. & Jackson, R. B. 2019. Management intensification maintains wood production over multiple harvests in tropical Eucalyptus plantations. *Ecological Applications*, 29(4). <https://doi.org/10.1002/eap.1879>.
- Santos, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araujo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. 2018. 5ta ed. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Solos). Brasília, DF. 356 pp.
- Strebin, S. J. & Larreal, M. 1984. Capacidad de uso de los suelos del estado Cojedes. In 8. Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maracay (Venezuela). 4-10 Nov 1984.
- Teixeira, F. Z.; Bachi, L.; Blanco, J.; Zimmermann, I.; Welle, I. & Carvalho-Ribeiro, S. M. 2019. Perceived ecosystem services (ES) and ecosystem disservices (EDS) from trees: insights from three case studies in Brazil and France. *Landscape Ecology*, 34(7), 1583-1600.
- Zhou, X.; Wen, Y.; Goodale, U. M.; Zuo, H.; Zhu, H.; Li, X. & Huang, X. 2017. Optimal rotation length for carbon sequestration in Eucalyptus plantations in subtropical China. *New Forests*, 48(5), 609-627.