

Manzon Nunes, G.; Santos da Silva, D.; Eloisa de Freitas Milani, J.; Tatiana Vilani, M.; Pereira Rezende, S.; Pirolla, M.; Scognamiglio Torres, F. Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de *Tectona grandis* mediante datos multiespectrales orbitales y obtenidos con UAV

Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de *Tectona grandis* mediante datos multiespectrales orbitales y obtenidos con UAV

Manzon Nunes, Gustavo¹ **Santos da Silva, Diego**¹ **Eloisa de Freitas Milani, Jaçanan**¹
Tatiana Vilani, Maricéia¹ **Pereira Rezende, Segundo Durval**¹ **Pirolla, Mallu**²
Scognamiglio Torres, Fernando²

¹ Federal University of Mato Grosso, Brasil

² 4M Agroflorestal Ltda, Brasil

ORCID: Manzon Nunes 0000-0002-5124-5898 Santos da Silva 0009-0008-2186-7056 Eloisa de Freitas Milani 0000-0002-4831-2551 Tatiana Vilani 0000-0003-0701-570X Pereira Rezende 0009-0008-9662-397X Pirolla 0009-0002-1835-5355 Scognamiglio Torres 0009-0005-1171-1048

Correspondencia: gustavo.nunes@ufmt.br diegossefisst@gmail.com jacanan.milani@gmail.com mtvilani@gmail.com segundo.rezende@sou.ufmt.br mallu@proteca.com.br fernando@proteca.com.br

RESUMEN

El estudio propuesto se centra en comparar análisis aplicados a rodales de *Tectona grandis* manejados por la empresa 4M Agroflorestal Ltda, ubicados en la Fazenda Rancho Alegre, en el municipio de São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brasil. La finca se encuentra a aproximadamente 300 km de Cuiabá y abarca un área total de 483 hectáreas, de las cuales 284 hectáreas están cubiertas por rodales de teca divididos en 10 parcelas. Los datos se recolectaron en octubre de 2022 mediante levantamientos aéreos con la cámara multiespectral Micasense Altum integrada en un RPAS DJI Matrice 100, así como imágenes del satélite Planet SuperDove. Posteriormente, se procesaron los datos para obtener el Índice de Área Foliar (IAF) de cada parcela, con el objetivo de cuantificar el porcentaje de área foliar y, consecuentemente, comparar estos porcentajes, considerando la relación estadística derivada del hecho de que ambas fuentes de datos (Altum y Planet) imagenaron el área de estudio en la misma fecha (4 de octubre de 2022). El análisis de datos confirmó que en las cinco parcelas ubicadas en la parte norte de la finca, los datos Planet subestimaron la cobertura foliar, mientras que en las cinco parcelas del sur, sobreestimaron el área foliar. Por otro lado, los datos de la cámara Micasense Altum, integrada con un UAV, demostraron mayor exactitud y precisión en la medición espacial de doseles individuales, principalmente debido a su resolución espacial a nivel centimétrico, lo que permite avances en el manejo forestal de rodales plantados.


Palabras clave: Fenotipificación; activos forestales; teca; índice de área foliar; multiespectral.


Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 9 febrero 2026


Análisis de la caducidad foliar en plantaciones de *Tectona grandis* mediante datos multispectrales orbitales y obtenidos con UAV


Manzon Nunes, Gustavo ⁽¹⁾, Santos da Silva, Diego ⁽¹⁾, Eloisa de Freitas Milani, Jaçanan ⁽¹⁾, Tatiana Vilani, Maricéia ⁽¹⁾, Pereira Rezende, Segundo Durval ⁽¹⁾, Arenhart Pirolla, Mallu ⁽²⁾, Scognamiglio Torres, Fernando ⁽²⁾


⁽¹⁾ Federal University of Mato Grosso, Brasil.

 0000-0002-5124-5898, gustavo.nunes@ufmt.br.


 0009-0008-2186-7056, diegosseflsst@gmail.com.


 0000-0002-4831-2551, jacanan.milani@gmail.com.

 0000-0003-0701-570X, mtvilani@gmail.com.

 0009-0008-9662-397X, segundo.rezende@sou.ufmt.br.

⁽²⁾ 4M Agroflorestal Ltda, Brasil.

 0009-0002-1835-5355, mallu@proteca.com.br.

 0009-0005-1171-1048, fernando@proteca.com.br.

Resumen: El estudio propuesto se centra en comparar análisis aplicados a rodales de *Tectona grandis* manejados por la empresa 4M Agroflorestal Ltda, ubicados en la Fazenda Rancho Alegre, en el municipio de São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brasil. La finca se encuentra a aproximadamente 300 km de Cuiabá y abarca un área total de 483 hectáreas, de las cuales 284 hectáreas están cubiertas por rodales de teca divididos en 10 parcelas. Los datos se recolectaron en octubre de 2022 mediante misiones de vuelo con la cámara multispectral Micasense Altum integrada en un UAV DJI Matrice 100, así como se adquirieron imágenes del satélite Planet SuperDove. Posteriormente, se procesaron los datos para obtener el Índice de Área Foliar (IAF) de cada parcela, con el objetivo de cuantificar el porcentaje de área foliar y, consecuentemente, comparar estos porcentajes, considerando la relación estadística derivada del hecho de que ambas fuentes de datos (Altum y Planet) para el área de estudio en la misma fecha (4 de octubre de 2022). El análisis de datos confirmó que en las cinco parcelas ubicadas en la parte norte de la finca, los datos Planet subestimaron la cobertura foliar, mientras que en las cinco parcelas del sur, sobreestimaron el área foliar. Por otro lado, los datos de la cámara Micasense Altum, integrada con un UAV, demostraron mayor exactitud en la medición espacial de doseles individuales, principalmente debido a su resolución espacial a nivel centimétrico, lo que permite avances en el manejo forestal de rodales plantados.

Palabras clave: Fenotipificación; activos forestales; teca; índice de área foliar; multispectral.

Deciduousness Analysis of Tectona grandis Plantations Using Orbital and UAV-Based Multispectral Data

Abstract: The proposed study focuses on comparing analyses applied to *Tectona grandis* stands managed by the company 4M Agroflorestal Ltda, located on the Rancho Alegre Farm in the municipality of São José dos Quatro Marcos, Mato Grosso, Brazil. The farm is situated approximately 300 km from Cuiabá and spans a total area of 483 hectares, with 284 hectares covered by teak stands divided into 10 plots. Data were collected in October 2022 through aerial surveys using the Micasense Altum multispectral camera integrated into a DJI Matrice 100 RPAS, as well as imagery from the Planet SuperDove satellite. Subsequent data processing was carried out to obtain the Leaf Area Index (LAI) for each plot, aiming to quantify the percentage of leaf area and, consequently, compare these percentages, taking into account the statistical relationship derived from the fact that both data sources (Altum and Planet) for the study area on the same date (October 4, 2022). Data analysis confirmed that in the five plots located in the northern part of the farm, Planet data underestimated the foliar cover, whereas in the five southern plots, it overestimated the leaf area. On the other hand, data from the Micasense Altum camera, integrated with a UAV, demonstrated greater accuracy in the spatial measurement of individual canopies,

mainly due to its centimeter-level spatial resolution, thus enabling advancements in the forest management of planted stands.

Keywords: Phenotyping, forest assets, teak, leaf area index, multispectral.

1. INTRODUCCIÓN

Tectona grandis L.f., comúnmente conocida como teca (en India, Siam, Birmania, Indonesia, Estados Unidos e Inglaterra), teck (Francia), ojati (Java), may sak (Laos) y tiek (Alemania), es un árbol caducifolio de gran porte perteneciente a la familia Lamiaceae. Es nativa de los bosques tropicales monzónicos del sudeste asiático (India, Myanmar, Tailandia y Laos), donde puede alcanzar alturas de hasta 60 metros. Esta especie presenta un alto grado de caducidad foliar, con hojas opuestas, elípticas, coriáceas, con pecíolos cortos o ausentes y ápices y bases agudos. Produce una de las maderas duras tropicales más valiosas y conocidas (Weaver, 1993; Pandey & Brown, 2000; Pelissari, 2014).

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) para la evaluación y el monitoreo de grandes áreas plantadas de difícil acceso en un corto período de tiempo presenta una amplia aplicabilidad, especialmente debido a la adquisición de imágenes con alta resolución espacial y temporal en comparación con las imágenes satelitales. Esto sirve de base para la implementación de estrategias de manejo a corto y largo plazo, optimizando tanto el tiempo como los costos (Pedrali *et al.*, 2019).

Existe una demanda creciente del uso de la Teledetección y la Agricultura de Precisión, que involucra la generación de índices de vegetación para la evaluación de cultivos agrícolas. Esta tecnología permite la recolección de datos en tiempo real, ciclos de análisis periódicos más cortos y una reducción de la mano de obra en comparación con los métodos tradicionales de evaluación en campo (Costa *et al.*, 2020).

Los índices de vegetación son herramientas que pueden utilizarse para analizar las propiedades espectrales de la vegetación en un ecosistema o en un área agrícola mediante operaciones aritméticas entre las bandas espectrales de las imágenes recolectadas por sensores, con base en el comportamiento de la reflectancia de las superficies analizadas (Francisco *et al.*, 2020).

En este contexto, 4M Agroflorestal LTDA es una empresa forestal del estado de Mato Grosso-Brasil, especializada en la plantación y el manejo de bosques clonales de teca, donde se llevó a cabo este estudio. El objetivo era comparar los datos de dos sensores (la cámara Micasense Altum e imágenes orbitales del satélite Planet), mediante la generación del Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI) para cuantificar el área foliar durante el pico del período anual de caducidad en parcelas de plantaciones de teca.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el área de la Fazenda Rancho Alegre, propiedad de 4M Agroflorestal LTDA, compuesta por 10 parcelas de plantaciones de *Tectona*

grandis, ubicadas en el municipio de São José dos Quatro Marcos, en el estado de Mato Grosso, Brasil. Los datos utilizados incluyeron información obtenida de la constelación de satélites orbitales Planet (satélites SuperDove, PSB.SD), que ofrecen resolución espacial de 3 metros y ocho bandas espectrales siendo B1-azul costero (431-452nm), B2-azul (465-515nm); B3-verde 1 (513-549nm); B4-verde 2 (547-583nm); B5-amarillo (600-620nm); B6-rojo (650-680nm), B7- borde rojo (697-713nm), B8-infrarrojo cercano (845- 885nm). Las bandas son radiométricamente corregidas para reflectancia de la superficie. Datos adicionales se adquirieron mediante misiones programadas con una plataforma UAV (DJI Matrice 100) integrada con una cámara Micasense Altum, que capta cinco bandas espectrales que cubren las longitudes de onda del visible (VIS), Red Edge y NIR. Tanto los datos orbitales como los del UAV fueron recolectados el 4 de octubre de 2022.

Los planes de vuelo para la adquisición de datos con la cámara multiespectral Micasense Altum se basaron en los siguientes parámetros: altura de vuelo de 120 metros, traslape longitudinal del 80% y traslape lateral del 75%, además de la adquisición de imágenes con un panel de reflectancia antes y después de cada vuelo. Se utilizaron cuatro puntos de control en tierra para la ortorrectificación de los mosaicos generados para cada parcela, manteniendo la integridad geométrica para la comparación con los datos Planet. Estos ajustes permitieron el procesamiento de la fotogrametría aérea mediante el software Agisoft Metashape, resultando en ortomosaicos radiométricamente calibrados para las cinco bandas espectrales, con resolución espacial ultraalta y un GSD de 7 centímetros.

Posteriormente, los ortomosaicos multiespectrales Planet y Micasense Altum se procesaron con el software ENVI para generar el Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI), con el objetivo de determinar la cobertura foliar en las parcelas de *Tectona grandis*. A partir de los mosaicos de LAI, cada parcela fue analizada utilizando tanto los datos Planet como Altum para clasificar dos categorías mediante valores umbral: Teca con follaje y Teca sin follaje/suelo (caducifolia). A continuación, se realizaron cuantificaciones de área para cada clase, así como el cálculo de porcentajes y análisis estadísticos para sustentar la discusión de los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través del procesamiento y uso del IAF, fue posible generar mapas que cubren las 10 parcelas de la Fazenda Rancho Alegre, involucrando ortomosaicos obtenidos con la cámara Micasense Altum y datos del satélite Planet, ambos del 4 de octubre de 2022 (Figura 1).

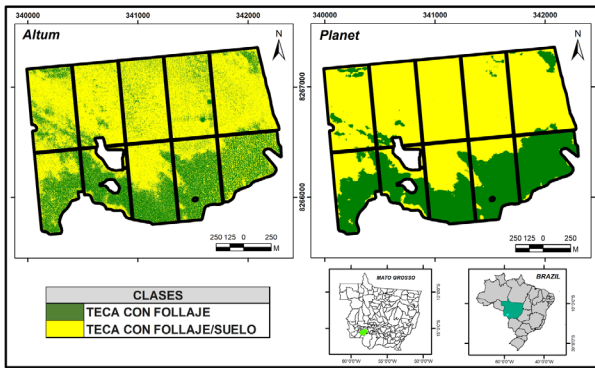


Figura 1. Resultados de diferenciación de clases basados en el IAF - Micasense Altum y de imágenes satelitales Planet. Parcelas T1 a T5 (norte). Parcelas T6 a T10 (sur).

La Figura 2 presenta una visualización comparativa de dos salidas de clasificación para la caducidad foliar de *Tectona grandis* en la parcela 8: datos Micasense Altum vs PlanetScope. Se distinguen dos clases de vegetación: Teca con follaje y Teca sin follaje/Suelo (caducifolia). La comparación ilustra diferencias en el detalle espacial entre ambas fuentes de datos, con Altum mostrando una delineación más fina de la variabilidad del dosel y Planet patrones más amplios y generalizados.

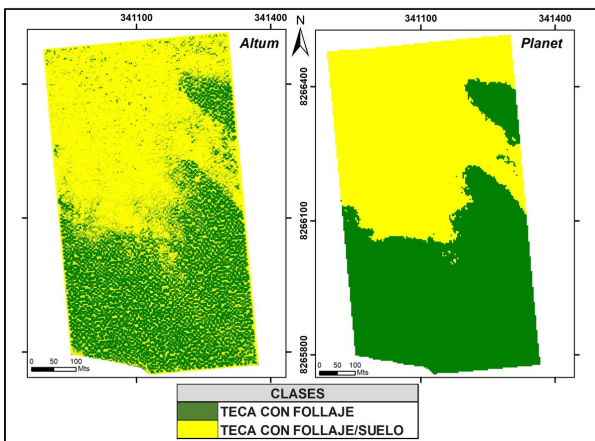


Figura 2. Parcela 8 utilizando datos de IAF de Altum (basados en UAV) y Planet (satelitales).

Se observa mayor detalle en los datos generados con la cámara multispectral, donde la mejor resolución permitió distinguir entre copas y el espaciado entre individuos, incluyendo áreas de teca sin follaje. En el mapeo con datos orbitales, se representa el dosel de más de un individuo en un solo píxel, con tendencia a valores más altos de IAF donde ocurrió baja pérdida foliar y hojas bajas o escasas en regiones con menor IAF.

Al analizar el contexto completo que involucra la ubicación de las parcelas, es evidente que existe variabilidad debida a factores ambientales como el tipo de suelo arcilloso y mayor humedad en la porción sur por la proximidad de un curso de agua, además de suelo arenoso con menor humedad en la porción norte de la finca.

Al diferenciar las clases Teca con follaje y Teca sin follaje/Suelo, fue posible calcular los valores porcentuales, como se muestra en la Tabla 1.

Utilizando estos datos, se calcularon parámetros estadísticos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Parcela de teca – Área foliar de datos Altum y Planet.

Teca / Parcela	Altum	Planet
T 1	21.06	9.39
T 2	9.98	5.22
T 3	11.91	0.00
T 4	14.80	1.23
T 5	11.68	7.33
T 6	45.34	58.95
T 7	56.00	63.43
T 8	39.36	50.21
T 9	54.17	71.69
T 10	50.32	90.44

Tabla 2. Parámetros estadísticos del área foliar de datos Altum y Planet.

Parámetros	Altum	Planet
Promedio	31.46	35.79
Mediana	30.21	29.80
Varianza	372.18	1188.89
Desviación estándar	19.29	34.48
Coefficiente de variación	61.32	96.35

Al analizar los valores medios y la dispersión (desviación estándar) de los dos tratamientos (% área foliar), se observó que el tratamiento Planet presentó un promedio de área foliar ligeramente superior (35.79%) en comparación con Altum (31.46%). Sin embargo, la desviación estándar para Planet (34.48%) fue considerablemente mayor que la calculada para Micasense Altum (19.29%).

Esto indica que los valores de % área foliar obtenidos con Planet fueron mucho más dispersos, oscilando desde valores muy bajos (0%) hasta muy altos (90.44%), mientras que los resultados de Altum se concentraron más entre las parcelas.

La aplicación de la prueba t pareada arrojó una estadística $t = -0.806$, grados de libertad = 9 y valor $p = 0.441$, lo que indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre el % promedio de área foliar medido por Altum y Planet al nivel de significancia del 5% ($p < 0.05$). Así, a pesar de los valores medios y dispersión diferentes, la variabilidad entre parcelas fue tan alta que la diferencia no resultó estadísticamente significativa en la prueba.

El siguiente boxplot (Figura 3) ilustra la comparación entre ambas fuentes de datos. Para Altum, los valores oscilaron desde aproximadamente 9.98% hasta 56%, con una mediana alrededor del 35–40%. Para Planet, los valores fueron más ampliamente dispersos, desde 0% hasta 90.44%, con una mediana más alta (por encima del 50%), mostrando la presencia de valores tanto bajos como muy altos, lo que indica mayor variabilidad.

En cuanto a la distribución, los datos Planet mostraron mayor dispersión, con mayor variabilidad y un rango más amplio (de 0% a 90.44%). La tendencia central, representada por la mediana, fue mayor para Planet que para Altum, sugiriendo que, en general, Planet produjo una estimación de área foliar mayor que Altum. En términos de dispersión y valores atípicos, Planet presentó alta variabilidad en el desempeño, mientras que los datos Altum parecieron más consistentes.

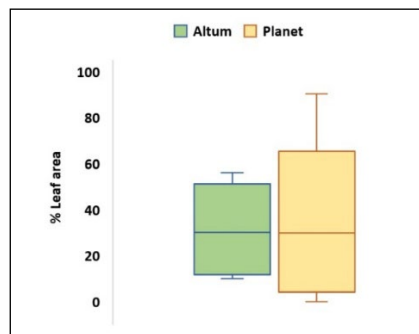


Figure 3. Boxplot comparando el % de área foliar de datos Altum vs. Planet.

Por lo tanto, los datos de ultra alta resolución obtenidos mediante el sensor Altum permitieron un mapeo preciso de la variabilidad de caducidad foliar entre árboles individuales y pérdida de hojas en las copas. Por otro lado, los datos Planet sobreestimaron la caducidad en las parcelas ubicadas en la parte norte de la finca (T1 a T5) y la subestimaron en las parcelas del sur (T6 a T10).

Marzialetti *et al.* (2022) evaluaron la detección de *Acacia saligna* mediante sensores multispectrales embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAV) en comparación con imágenes de Sentinel-2 y PlanetScope, destacando que los UAV permitieron identificar bordes y manchas pequeñas con mayor precisión, superando a los satélites en la estimación de biomasa e índice de área foliar (LAI) en doseles exóticos densos. Esta superioridad espacial explica la mayor exactitud con cámara MicaSense Altum frente a Planet al discriminar copas individuales de *Tectona grandis*

Rossi *et al.* (2024) correlacionaron flujos de CO₂ edáfico con índices multispectrales derivados del sensor Parrot Sequoia (UAV montado en eBee RTK, resolución de 0,1 m) en plantaciones de *Eucalyptus*, proponiendo los UAV como proxy superior a plataformas satelitales debido a su elevada resolución y flexibilidad operativa en bosques exóticos plantados, lo que corrobora con los resultados de este estudio en plantíos de teca en Brasil.

4. CONCLUSIÓN

En general, puede concluirse que el análisis utilizando el IAF con datos Planet alcanzó valores máximos más altos; sin embargo, su alta variabilidad sugiere que es menos consistente entre las parcelas. Por el contrario, los datos Altum demostraron la mayor exactitud del sensor UAV con un desempeño más regular y predecible, principalmente debido al GSD más alto.

El análisis estadístico muestra que los datos Planet presentaron un promedio y mediana de % área foliar más altos, pero con un desempeño menos predecible (mayor variabilidad). Los datos Altum, aunque arrojaron promedios más bajos, exhibieron resultados más uniformes, representando una mayor fidelidad cualitativa y cuantitativa con la variabilidad ambiental, como el contenido de humedad, la existencia de diferentes tipos de suelo, entre otros.

Los resultados presentados aquí pueden no ser generalizables a otras regiones o especies forestales, y las condiciones locales y de sitio deben analizarse de manera individual. No obstante, los resultados obtenidos con la cámara Altum serán superiores a los datos orbitales en cualquier condición de estudio, apoyando una mejor toma de decisiones en el manejo de rodales forestales plantados.

5. REFERENCIAS

- Costa, L.; Nunes, L.; Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* (172), New York, n. 1, p.1-3. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>
- Francisco, C. N.; Ruiz, P. R. S.; Almeida, C. M.; Gruber, N. C.; Anjos, C. S. (2020). Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. *Revista Brasileira de Geografia Física* (13), Recife n. 1, p. 76-86. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p076-086>
- Marzialetti, F.; Di Febbraro, M.; Frate, L.; De Simone, W.; Acosta, A.T. R. and Carranza, M. L. (2022) Synergetic use of unmanned aerial vehicle and satellite images for detecting non-native tree species: An insight into *Acacia saligna* invasion in the Mediterranean coast. *Front. Environ. Sci.* (10) <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880626>
- Pandey, D.; Brown, C. (2000). La teca: una visión global. *Unasyuva*, Roma, (51), n. 201, p.3-13.
- Pedrali, L. D.; Júnior, N. B.; Pereira, R. S.; Tramontina, J.; Alba, E.; Marchesan, J. (2019). Sensoriamento Remoto multispectral para determinação de níveis de severidade de seca de ponteiros em *Eucalyptus* spp. *Revista Scientia Forestalis* (122). <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.05>
- Pelissari, A. L. (2014). Cultivo da Teca: Características da Espécie para Implantação e Condução de Povoamentos Florestais. Centro Científico Conhecer (1) Goiânia, GO, n.01; p.129.
- Rossi, F. S., Della-Silva, J. L., Teodoro, L. P. R. *et al.* (2024). Assessing soil CO₂ emission on eucalyptus species using UAV-based reflectance and vegetation indices. *Sci Rep* (14) <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71430-2>
- Weaver, P. L. (1993). *Tectona grandis* L.f. Teak. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 18p.