

Estado de la publicación: El preprint no ha sido enviado para publicación

# Flujos de gases de efecto invernadero invernales en ejemplares jóvenes de *Tectona grandis* L. f. y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica utilizando la técnica de covarianza de remolinos

David Antonio Carvajal Arroyo, Ana Gabriela Salazar Ruiz, Jose Felix Rojas Marín, Rafael Angel Murillo Cruz, Mónica Lisbeth Cortés Cortés, Diana Mora Campos Mora Campos, Ana Paula Pérez Poveda, Luis Felipe Herrera Jiménez, Federico Alice Guier

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.17938>

Enviado en: 2026-09-09

Postado en: 2026-09-24 (versión 1)

(AAAA-MM-DD)

## **Flujos de gases de efecto invernadero en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* L. f. y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica usando la técnica de Eddy covarianza.**

## **Greenhouse gas fluxes in young plantations of *Tectona grandis* L. f. and *Gmelina arborea* Roxb. in Costa Rica using the Eddy covariance technique.**

**David Antonio Carvajal Arroyo**

Académico, Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-4090-2485>

**Ana Gabriela Salazar Ruiz**

Egresada, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica [https://orcid.org/0000-0001-](https://orcid.org/0000-0001-8394-2658)

[8394-2658](https://orcid.org/0000-0001-8394-2658)

**José Felix Rojas Marín**

Académico (a), Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica [https://orcid.org/0000-](https://orcid.org/0000-0002-4658-3227)

[0002-4658-3227](https://orcid.org/0000-0002-4658-3227)

**Mónica Lizbeth Cortes Cortes**

Académico (a), Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-7261-340x>

**Rafael Murillo Cruz**

Académico (a), Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

<http://orcid.org/0000-0002-5326-3563>

**Federico Alice Guier**

Académico (a), Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica [http://orcid.org/0000-](http://orcid.org/0000-0002-6155-0562)

[0002-6155-0562](http://orcid.org/0000-0002-6155-0562)

**Diana Mora Campos**

Académico (a), Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-9335-016X>

**Paula Pérez Poveda**

Egresada, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica [https://orcid.org/0009-0008-](https://orcid.org/0009-0008-6456-635X)

[6456-635X](https://orcid.org/0009-0008-6456-635X)

**Felipe Herrera Mejía**

Egresada, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica [https://orcid.org/0009-0007-](https://orcid.org/0009-0007-5803-8086)

[5803-8086](https://orcid.org/0009-0007-5803-8086)

### **Resumen**

**[Introducción]:** Las plantaciones forestales pueden contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la fijación de carbono; sin embargo, su capacidad para funcionar como sumideros depende de factores como la edad, el desarrollo del dosel, las condiciones del sitio y la disponibilidad de agua. **[Objetivo]:** El estudio caracterizó el intercambio neto ecosistémico de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el flujo de vapor de agua (H<sub>2</sub>O) en plantaciones jóvenes de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* mediante la técnica de Eddy Covariance, considerando su variación según la edad y la estacionalidad. **[Metodología]:** La investigación se realizó en los distritos de Pocosal y San Jorge, Región Huetar Norte de Costa Rica. Se establecieron 18 parcelas temporales de 500 m<sup>2</sup> para caracterizar variables

dasométricas y edáficas. Los flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O se monitorearon mediante seis campañas entre noviembre de 2021 y octubre de 2022, y los datos se procesaron con EddyPro versión 7.0.9 y Tovi versión 2.9.1. **[Resultados]:** Durante los periodos evaluados, el flujo promedio de CO<sub>2</sub> fue de  $-4,45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en melina y  $-0,38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en teca, con diferencias significativas entre las plantaciones agrupadas por especie. El flujo promedio de H<sub>2</sub>O fue de  $3,36 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en teca y  $2,54 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en melina. La magnitud de los flujos varió entre campañas y estuvo asociada con el desarrollo del dosel y las condiciones ambientales. **[Conclusiones]:** La capacidad de las plantaciones jóvenes para actuar como sumideros de CO<sub>2</sub> se fortalece conforme avanza el desarrollo del dosel y está estrechamente vinculada con el intercambio de agua.

**Palabras clave:** dióxido de carbono; evapotranspiración; flujos turbulentos; intercambio neto ecosistémico; sumidero.

## Abstract

**[Introduction]:** Forest plantations can contribute to climate change mitigation through carbon sequestration; however, their capacity to function as carbon sinks depends on factors such as stand age, canopy development, site conditions, and water availability. **[Objective]:** This study characterized net ecosystem exchange of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O) fluxes in young *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* plantations using the Eddy Covariance technique, considering their variation according to stand age and seasonality. **[Methodology]:** The study was conducted in the districts of Pocosol and San Jorge, in the Huetar Norte Region of Costa Rica. Eighteen temporary 500 m<sup>2</sup> plots were established to characterize stand and soil variables. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes were monitored during six measurement campaigns between November 2021 and October 2022, and the data were processed using EddyPro version 7.0.9 and Tovi version 2.9.1. **[Results]:** During the evaluated periods, mean CO<sub>2</sub> flux was  $-4.45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in melina and  $-0.38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in teak, with significant differences between plantations grouped by species. Mean H<sub>2</sub>O flux was  $3.36 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in teak and  $2.54 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in melina. Flux magnitude varied among measurement campaigns and was associated with canopy development and environmental conditions. **[Conclusions]:** The capacity of young plantations to act as CO<sub>2</sub> sinks increases as canopy development progresses and is closely linked to water exchange.

**Keywords:** carbon dioxide; evapotranspiration; turbulent fluxes; net ecosystem exchange; carbon sink.

## 1. Introducción

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en los ciclos globales del carbono y del agua mediante el intercambio continuo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua y energía con la atmósfera. Dentro de estos ecosistemas, las plantaciones forestales pueden contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la fijación y

almacenamiento de carbono; sin embargo, su capacidad para funcionar como sumideros no es constante y depende de factores como la especie, la edad de la plantación, el desarrollo del dosel, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua, las características del suelo y las prácticas de manejo. A escala global, el intercambio de carbono de las plantaciones forestales presenta una amplia variabilidad y está estrechamente relacionado con variables biofísicas como la temperatura media anual, la precipitación y el área foliar (Tong *et al.*, 2023).

El balance de carbono de un ecosistema está determinado principalmente por la interacción entre la fijación fotosintética y la respiración ecosistémica. El intercambio neto de CO<sub>2</sub> del ecosistema (NEE, por sus siglas en inglés) representa el balance neto entre el carbono capturado mediante la producción primaria bruta (GPP) y el liberado mediante la respiración autotrófica y heterotrófica del ecosistema (Reco). Bajo la convención micrometeorológica utilizada comúnmente para los flujos de Eddy Covariance, valores negativos de NEE representan una transferencia neta de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera hacia el ecosistema, mientras que valores positivos indican una emisión neta hacia la atmósfera. Estos procesos presentan una marcada variación diurna y estacional y responden a cambios en la radiación, temperatura, humedad del suelo, déficit de presión de vapor y fenología de la vegetación (Rodda *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2026).

El intercambio de carbono se encuentra, además, estrechamente acoplado al ciclo del agua. La apertura estomática permite el ingreso de CO<sub>2</sub> necesario para la fotosíntesis y simultáneamente favorece la pérdida de agua mediante transpiración. En consecuencia, las condiciones ambientales que modifican la conductancia estomática pueden afectar de manera simultánea la captura de carbono y los flujos de vapor de agua del ecosistema. Estudios recientes realizados mediante Eddy Covariance han evidenciado que ecosistemas con altas tasas de fijación de carbono pueden presentar también una elevada evapotranspiración, lo que evidencia posibles compromisos entre secuestro de carbono, uso del agua y vulnerabilidad al estrés hídrico (Hanggara *et al.*, 2026).

La técnica de covarianza de vórtices o *Eddy Covariance* (EC) constituye una de las principales herramientas para cuantificar directamente los intercambios de CO<sub>2</sub>, vapor de agua y energía entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera. La técnica se basa en la

covarianza entre las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento y las fluctuaciones en la concentración de un escalar atmosférico, permitiendo obtener mediciones continuas y de alta frecuencia que integran espacialmente el área de influencia o *footprint* de la torre (Burba, 2013). El desarrollo de redes internacionales de torres de flujo, particularmente FLUXNET, ha permitido utilizar estas mediciones para caracterizar la variación diurna, estacional e interanual de los sumideros y fuentes de carbono, la evapotranspiración y la eficiencia en el uso del agua en numerosos tipos de ecosistemas (Xiao *et al.*, 2026). No obstante, la aplicación de EC requiere procedimientos rigurosos de control de calidad, correcciones micrometeorológicas y delimitación del *footprint* para garantizar que los flujos representen adecuadamente la cobertura estudiada.

En ecosistemas forestales tropicales, la disponibilidad de agua y la estacionalidad pueden ejercer un fuerte control sobre los intercambios de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. En bosques deciduos con predominio de *Tectona grandis*, se han registrado disminuciones importantes de la absorción de CO<sub>2</sub> durante los periodos secos y aumentos durante la estación lluviosa, asociados con cambios fenológicos, disponibilidad hídrica y desarrollo del dosel (Igarashi *et al.*, 2013; Rodda *et al.*, 2021). En términos generales, estudios de plantaciones forestales también indican que el índice o desarrollo del área foliar constituye uno de los principales reguladores de la productividad y del balance de carbono a escala ecosistémica (Tong *et al.*, 2023). Sin embargo, las mediciones continuas mediante EC en plantaciones tropicales comerciales son comparativamente escasas y la información disponible para plantaciones puras de *T. grandis* y, particularmente, de *Gmelina arborea* continúa siendo limitada.

Esta ausencia de información adquiere especial relevancia en Costa Rica, donde ambas especies constituyen una parte importante de la producción forestal comercial. Según la Encuesta Nacional Agropecuaria 2024, el país mantiene aproximadamente 50 977,9 ha plantadas con *T. grandis* y 11 283,7 ha con *G. arborea* (INEC, 2025). Para estas especies se han desarrollado modelos alométricos y estudios orientados a estimar biomasa y carbono almacenado en diferentes componentes de los árboles (Fonseca-González, Ávila-Arias *et al.*, 2021, Fonseca-González, Murillo-Cruz *et al.*, 2021; Fonseca-González *et al.*, 2022). Sin embargo, las estimaciones de carbono almacenado representan existencias acumuladas en la biomasa y no permiten describir directamente la dinámica temporal del intercambio de CO<sub>2</sub>

entre las plantaciones y la atmósfera. En particular, existe poca información sobre cómo varían simultáneamente los flujos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua durante las primeras etapas de desarrollo de las plantaciones bajo las condiciones tropicales húmedas de Costa Rica.

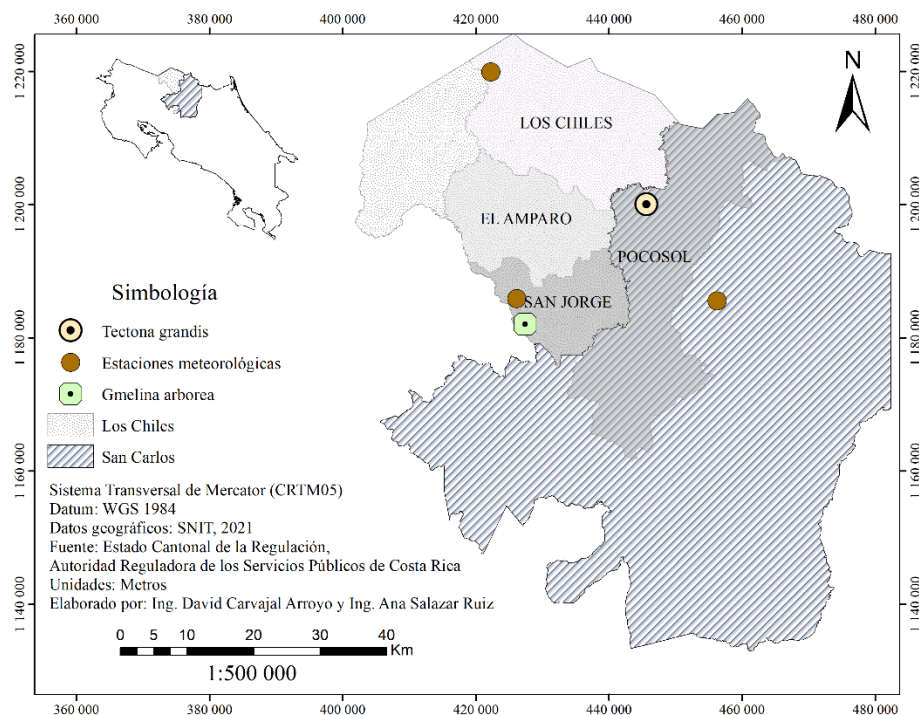
En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar el intercambio neto ecosistémico de CO<sub>2</sub> y el flujo de vapor de agua en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* mediante la técnica de Eddy Covariance, y evaluar su variación temporal en relación con la edad de las plantaciones, la estacionalidad y características dasométricas y edáficas de los sitios.

## 2. Metodología

### 2.1 Descripción del sitio de muestreo

El estudio se realizó en plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* ubicadas en la Región Huetar Norte de Costa Rica. La plantación de *G. arborea* se localizó en el distrito de San Jorge, cantón de Los Chiles (10.689241° N y -84.663437° O), mientras que la plantación de *T. grandis* se ubicó en el distrito de Pocosol, cantón de San Carlos (10.852337° N y -84.497307° O) (**Figura 1**).

El distrito de San Jorge presenta un clima tropical húmedo, con precipitaciones anuales entre 2 000 y 3 000 mm y temperaturas que oscilan entre 17 °C y 24 °C. Los suelos predominantes corresponden a los órdenes Ultisoles e Inceptisoles. Entre las principales actividades productivas de la zona se encuentran los cultivos de piña, naranja, tubérculos, frijol y caña de azúcar, además de la ganadería y la pesca (Municipalidad de Los Chiles, 2018; Chaves y Chavarría, 2017; MIDEPLAN-PNUD, 2012).



**Figura 1.** Ubicación de las plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* y de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio, Alajuela, Costa Rica.

Pocosol presenta un clima tropical lluvioso, con una precipitación media anual entre 3 000 y 4 000 mm y una temperatura promedio cercana a 25 °C. Los suelos predominantes corresponden al orden Ultisol y entre las principales actividades productivas se encuentran el cultivo de piña y caña de azúcar, la ganadería, la reforestación, la producción pecuaria y el agroturismo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020; Municipalidad de San Carlos, 2014).

## 2.2 Levantamiento de la información y periodos de medición

El levantamiento de la información se realizó entre noviembre de 2021 y octubre de 2022 mediante seis campañas de medición, tres en plantaciones de *T. grandis* y tres en plantaciones de *G. arborea*. Las campañas tuvieron una duración de entre 35 y 57 días y abarcaron plantaciones de diferentes edades y periodos correspondientes a las épocas seca y lluviosa.

Para cada campaña se trasladó e instaló en el sitio correspondiente todo el sistema de medición, constituido por la torre de Eddy Covariance, los sensores de flujo y la estación

meteorológica. Para la ubicación del equipo se seleccionaron sectores relativamente planos, con cobertura forestal homogénea y altura del dosel uniforme. La altura de instalación del sistema de Eddy Covariance se ajustó de acuerdo con el desarrollo de la plantación y la altura del dosel durante cada campaña. Las alturas del sistema variaron entre 8,5 y 13,5 m, mientras que la altura media del dosel osciló entre 2,3 y 11,0 m (**Cuadro 1**).

**Cuadro 1.** Características de los sitios de muestreo según especies, edad y fecha de medición.

| Muestreo | Especie | Edad (meses) | Fecha Inicial | Fecha final | Días medidos | Época del año | Altura equipo (m) | Dosel (m) |
|----------|---------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------------|-----------|
| 1        | Teca    | 5.0          | 12/11/2021    | 17/12/2021  | 35           | Transición    | 8.5               | 0.65      |
| 2        | Teca    | 44.5         | 20/1/2022     | 10/3/2022   | 49           | Seca          | 13.5              | 8.76      |
| 3        | Melina  | 8.5          | 1/4/2022      | 15/5/2022   | 44           | Seca          | 12.8              | 2.43      |
| 4        | Melina  | 12.0         | 16/5/2022     | 7/7/2022    | 52           | Transición    | 12.8              | 4.14      |
| 5        | Teca    | 48.5         | 13/7/2022     | 8/9/2022    | 57           | Lluviosa      | 13.5              | 9.13      |
| 6        | Melina  | 14.5         | 9/9/2022      | 27/10/2022  | 48           | Lluviosa      | 13.5              | 5.81      |

### 2.3 Variables dasométricas y edáficas

En cada sitio de muestreo se establecieron tres parcelas circulares temporales de 500 m<sup>2</sup>, para un total de 18 parcelas durante el estudio. A los árboles se les midió el diámetro a 1,30 m de altura (DAP, cm) mediante cinta diamétrica y la altura total (Ht, m) mediante vara telescópica o clinómetro, según el tamaño de los individuos. El DAP se registró únicamente en aquellos árboles que alcanzaron una altura igual o superior a 1,30 m.

Además, se evaluó el estado fitosanitario de los individuos de acuerdo con la escala propuesta por Salas-Rodríguez *et al.* (2016). El diámetro de copa se determinó mediante dos mediciones realizadas en direcciones perpendiculares con cinta métrica, utilizando como referencia los extremos de la copa; posteriormente, se calculó el promedio de ambas mediciones.

Para determinar el área foliar específica (AFE), se recolectaron aleatoriamente diez hojas en cada parcela. El área foliar (cm<sup>2</sup>) se estimó a partir de fotografías digitales procesadas mediante el software ImageJ. Posteriormente, las hojas se secaron en horno a 60 °C durante un periodo de 48 a 72 h y se pesaron en una balanza analítica para determinar su masa seca. El AFE se calculó mediante la relación entre el área de la hoja y su masa seca:

$$AFE = AF / MS$$

donde AFE corresponde al área foliar específica ( $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ), AF al área de la hoja ( $\text{cm}^2$ ) y MS a la masa seca (g).

Adicionalmente, en cada parcela se seleccionaron diez árboles para estimar el número de hojas por individuo como una variable asociada con el desarrollo del dosel.

Para la caracterización edáfica se realizó un muestreo de suelo a una profundidad de 0–15 cm. Se recolectaron diez submuestras en cada finca, las cuales fueron homogenizadas para conformar una muestra compuesta mediante el método de cuarteo (Schweizer, 2011). Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliares del Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica. Se determinaron el pH, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y la saturación de acidez.

## **2.4 Variables meteorológicas**

Las variables meteorológicas se registraron mediante una única estación portátil, la cual se trasladó juntamente con el sistema de Eddy Covariance en cada campaña de medición. La estación se instaló en las proximidades de la plantación evaluada y permitió registrar humedad relativa, precipitación, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento.

La información registrada por la estación propia fue contrastada con datos proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). Para ello, se utilizaron registros meteorológicos correspondientes al periodo comprendido entre enero de 2020 y enero de 2023 procedentes de las estaciones Comando Los Chiles ( $11^{\circ}01'54'' \text{ N}$ ,  $84^{\circ}42'42'' \text{ O}$ ), Laguna Caño Negro ( $10^{\circ}53'31'' \text{ N}$ ,  $84^{\circ}47'17'' \text{ O}$ ) y Saint George, Los Chiles ( $10^{\circ}46'25,51'' \text{ N}$ ,  $84^{\circ}40'30,57'' \text{ O}$ ).

Los registros de las estaciones del IMN fueron promediados y utilizados únicamente como información complementaria para verificar la consistencia de los datos obtenidos mediante la estación meteorológica instalada durante las campañas. Los valores registrados por la estación propia no fueron sustituidos ni modificados a partir de la información de las estaciones externas.

## 2.5 Flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O

Los flujos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) se cuantificaron mediante la técnica de covarianza de vórtices o *Eddy Covariance*. Para ello se utilizó el equipo perteneciente al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica. El sistema estuvo constituido por un anemómetro sónico tridimensional WindMaster para registrar las componentes de la velocidad del viento y un analizador infrarrojo de gases de circuito cerrado LI-7200 (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, EE. UU.) para determinar las concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

La altura de instalación del equipo fue ajustada según la altura del dosel de cada plantación y varió entre 8,5 y 13,5 m durante las seis campañas de medición (**Cuadro 1**). Las componentes tridimensionales de la velocidad del viento y las concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O fueron registradas a una frecuencia de 10 Hz. Los datos se almacenaron en formato ghg y se generaron archivos correspondientes a intervalos de 30 minutos.

## 2.6. Procesamiento de la información

### 2.6.1. Variables dasométricas

El volumen total individual se estimó mediante:

$$V = AB \times H \times FF$$

donde V corresponde al volumen total del árbol (m<sup>3</sup>), AB al área basal (m<sup>2</sup>), H a la altura total del árbol (m) y FF al factor de forma. Se utilizaron factores de forma de 0,55 para *T. grandis* ([Aguilar-Rodríguez et al., 2017](#)) y 0,40 para *G. arborea* ([Garro-Fuentes, 2021](#)).

El volumen por parcela se obtuvo mediante la sumatoria del volumen individual de todos los árboles presentes. Posteriormente, se calculó el volumen promedio de las tres parcelas y este valor fue extrapolado a una hectárea.

El incremento medio anual (IMA) para el DAP y la altura total se calculó mediante:

$$IMA = Y / E$$

donde IMA corresponde al incremento medio anual, Y al DAP (cm) o a la altura total (m), según la variable evaluada, y E a la edad de los árboles expresada en años.

### 2.6.2. Procesamiento y control de calidad de los flujos

Los archivos ghg obtenidos durante las campañas fueron procesados mediante EddyPro versión 7.0.9, utilizando el modo EddyPro Express, para obtener los flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O correspondientes a intervalos de 30 minutos. Posteriormente, los datos fueron procesados y sometidos a control de calidad mediante Tovi® versión 2.9.1. Para los análisis se conservaron únicamente los registros clasificados con banderas de calidad 0 y 1, mientras que los datos clasificados con bandera 2 fueron eliminados.

Asimismo, se eliminaron los registros de flujo de CO<sub>2</sub> superiores a 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e inferiores a  $-50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , así como aquellos asociados con valores de velocidad de fricción ( $u^*$ ) inferiores a 0,10  $\text{m s}^{-1}$ . Posteriormente, se realizó el análisis de la huella de medición (*footprint*) con el propósito de identificar y excluir aquellos registros cuyo origen se encontrará fuera de los límites de la plantación forestal evaluada.

Debido a que no se contó con información suficiente para modelar adecuadamente los periodos sin datos, no se realizó el procedimiento de llenado de vacíos (*gap filling*). Por esta razón, los análisis presentados en el estudio se realizaron exclusivamente con los datos observados que superaron los criterios establecidos de control de calidad.

### 2.7 Análisis estadístico

Inicialmente se evaluaron los supuestos estadísticos de los datos. La normalidad se determinó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Levene. Para evaluar diferencias entre los grupos se realizó un análisis de varianza (ANOVA), considerando un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ . En los casos en que los datos fueran no paramétricos, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para la comparación entre los grupos evaluados. Los análisis estadísticos fueron realizados mediante el software R-Studio.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Caracterización dasométrica y edáfica

##### 3.1.1 *Tectona grandis*

El crecimiento de *T. grandis* aumentó conforme avanzó la edad de la plantación. A los 5 meses, los árboles presentaron una altura total promedio de  $0,65 \pm 0,28$  m, mientras que a los 44,5 y 48,5 meses alcanzaron  $8,76 \pm 1,35$  m y  $9,13 \pm 1,42$  m, respectivamente. El incremento medio anual (IMA) en altura fue de  $1,56 \text{ m año}^{-1}$  a los 5 meses y alcanzó valores de  $2,37$  y  $2,25 \text{ m año}^{-1}$  a los 44,5 y 48,5 meses, respectivamente.

El DAP, registrado únicamente en las plantaciones que habían superado 1,30 m de altura, fue de  $10,18 \pm 1,99$  cm a los 44,5 meses y de  $10,45 \pm 2,04$  cm a los 48,5 meses. Para estas mismas edades, el IMA en DAP fue de  $2,74$  y  $2,58 \text{ cm año}^{-1}$ , respectivamente. El volumen total aumentó de  $35,48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  a los 44,5 meses a  $39,42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  a los 48,5 meses.

El suelo de la plantación de teca presentó una capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de  $4,9 \text{ cmol}(+) \text{ L}^{-1}$ , un pH de 5,2 y una saturación de acidez del 6 %. Estas condiciones indican un suelo ácido y con baja capacidad de retención de bases intercambiables, características que pueden limitar el crecimiento de *T. grandis*. Alvarado y Fallas (2004) señalaron que el desarrollo de la especie en suelos ácidos de Costa Rica puede verse afectado por incrementos en la saturación de acidez y por condiciones de baja fertilidad.

La influencia del sitio sobre el crecimiento de la teca continúa siendo relevante incluso cuando se utiliza material genético seleccionado. Pérez Poveda *et al.* (2026) encontraron diferencias en el crecimiento de clones de *T. grandis* establecidos bajo distintas condiciones de suelo y manejo en Costa Rica, con una importante variación ambiental entre sitios. Por tanto, las características edáficas observadas en la plantación evaluada deben considerarse como uno de los factores que potencialmente condicionaron su desarrollo dasométrico.

##### 3.1.2. *Gmelina arborea*

En *G. arborea* se observó un incremento progresivo de las variables dasométricas entre los 8,5 y 14,5 meses (**Cuadro 2**). La altura total aumentó de  $2,43 \pm 0,50$  m a los 8,5 meses a  $4,14 \pm 0,58$  m a los 12 meses y  $5,81 \pm 0,63$  m a los 14,5 meses. De forma paralela, el DAP aumentó de  $3,92 \pm 0,82$  cm a  $5,37 \pm 1,13$  cm y  $8,01 \pm 1,41$  cm, respectivamente. El IMA en altura

aumentó de 3,37 m año<sup>-1</sup> a los 8,5 meses a 4,82 m año<sup>-1</sup> a los 14,5 meses. El IMA en DAP presentó valores de 5,37 cm año<sup>-1</sup> a los 8,5 y 12 meses y aumentó hasta 6,64 cm año<sup>-1</sup> a los 14,5 meses. Este rápido crecimiento se reflejó también en el volumen total, que pasó de 0,96 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a los 8,5 meses a 3,44 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a los 12 meses y 10,25 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a los 14,5 meses.

El suelo de la plantación de melina presentó una CICE de 5,1 cmol(+) L<sup>-1</sup>, un pH de 5,6 y una saturación de acidez del 2 %. En comparación con el sitio de teca, presentó una CICE ligeramente superior, menor acidez y una saturación de acidez considerablemente más baja. Sin embargo, el valor de CICE evidencia que el sitio presenta una capacidad relativamente limitada para retener cationes intercambiables.

La fertilidad del suelo puede ejercer un efecto importante sobre el crecimiento temprano de *G. arborea*. En plantaciones clonales de Costa Rica, Carvajal-Arroyo *et al.* (2024) determinaron que la respuesta del crecimiento está relacionada con la fertilidad natural del sitio y que condiciones de baja CICE y elevada saturación de acidez pueden limitar el desarrollo de la especie. En el sitio evaluado en este estudio, aunque la CICE fue baja, la saturación de acidez fue únicamente del 2 %, lo que sugiere que la acidez intercambiable no representó una restricción severa durante el periodo de evaluación.

**Cuadro 2.** Características dasométricas de las plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según la edad.

| Especie       | Edad (meses) | Árb ha <sup>-1</sup> | Ht (m)      | IMA Ht (m año <sup>-1</sup> ) | DAP (cm)     | IMA DAP (cm año <sup>-1</sup> ) | Vt (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------|--------------|----------------------|-------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Teca</b>   | 5.0          | 820                  | 0.65 ± 0.28 | 1.56                          | —            | —                               | —                                     |
|               | 44.5         | 847                  | 8.76 ± 1.35 | 2.37                          | 10.18 ± 1.99 | 2.74                            | 35.48                                 |
|               | 48.5         | 853                  | 9.13 ± 1.42 | 2.25                          | 10.45 ± 2.04 | 2.58                            | 39.42                                 |
| <b>Melina</b> | 8.5          | 800                  | 2.43 ± 0.50 | 3.37                          | 3.92 ± 0.82  | 5.37                            | 0.96                                  |
|               | 12.0         | 840                  | 4.14 ± 0.58 | 4.14                          | 5.37 ± 1.13  | 5.37                            | 3.44                                  |
|               | 14.5         | 820                  | 5.81 ± 0.63 | 4.82                          | 8.01 ± 1.41  | 6.64                            | 10.25                                 |

Los valores de Ht y DAP corresponden a promedio ± desviación estándar. Árb ha<sup>-1</sup> = árboles por hectárea; Ht = altura total; IMA = incremento medio anual; DAP = diámetro a 1,30 m de altura; Vt = volumen total por hectárea. El DAP no se determinó en la plantación de teca de 5 meses debido a que los árboles aún no alcanzaban 1,30 m de altura.m.

## 3.2 Flujo de gases de efecto invernadero

### 3.2.1 Flujos de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Considerando únicamente los registros que superaron los criterios de control de calidad, el flujo promedio de CO<sub>2</sub> presentó diferencias significativas entre las plantaciones agrupadas por especie ( $p < 0,05$ ). En *Gmelina arborea* se registró un flujo promedio de  $-4,45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mientras que en *Tectona grandis* fue de  $-0,38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . De acuerdo con la convención de signos utilizada, los valores negativos representan una transferencia neta de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera hacia el ecosistema y los valores positivos una transferencia hacia la atmósfera. Por tanto, durante los periodos evaluados predominó la absorción neta de CO<sub>2</sub> en ambas especies, aunque con una mayor magnitud en las plantaciones de melina.

Esta interpretación corresponde específicamente a los periodos monitoreados y no debe considerarse equivalente a un balance anual de carbono, debido a que las campañas fueron temporales y únicamente se analizaron los registros observados que superaron los criterios de calidad.

El comportamiento del flujo presentó variaciones entre campañas relacionadas con la edad de las plantaciones y las condiciones estacionales (**Cuadro 3**). En melina, el flujo promedio fue de  $-2,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 8,5 meses durante la época seca y disminuyó a  $-5,00$  y  $-5,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 12 y 14,5 meses, respectivamente, durante la época lluviosa. En teca, el flujo promedio fue de  $-0,74 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 44,5 meses durante la época seca y de  $-1,68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 48,5 meses durante la época lluviosa. Este patrón evidencia una mayor absorción de CO<sub>2</sub> durante las campañas realizadas en condiciones lluviosas, aunque el efecto de la estacionalidad ocurre simultáneamente con cambios en la edad y el desarrollo del dosel.

**Cuadro 3.** Flujo de CO<sub>2</sub> en plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según edad y época del año.

| Flujo de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |            |              |              |                  |                |             |                          |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|--------------|--------------|------------------|----------------|-------------|--------------------------|------------|
| Especie                                                          | Época      | Edad (meses) | Promedio     | Absorción máxima | Emisión máxima | Copa (m)    | AFE (cm <sup>2</sup> /g) | Hojas*arb  |
| Melina                                                           | Transición | 12.0         | -5.00 A      | -21.33 A         | 13.70          | 3.4         | 186.00                   | 502        |
|                                                                  | Seca       | 8.5          | -2.80 B      | -11.63 E         | 15.80          | 1.6         | 160.30                   | 253        |
|                                                                  | Lluviosa   | 14.5         | -5.91 A      | -18.87 B         | 17.60          | 3.5         | 186.00                   | 717        |
| Teca                                                             | Transición | 5.0          | 0.74 C       | -6.93 F          | 9.60           | 1.2         | 76.52                    | 12         |
|                                                                  | Seca       | 44.5         | -0.74 B      | -16.13 C         | 16.60          | 3.6         | 101.75                   | 338        |
|                                                                  | Lluviosa   | 48.5         | -1.68 B      | -14.74 C         | 14.80          | 3.5         | 101.75                   | 579        |
| <b>Promedio</b>                                                  |            | <b>21.8</b>  | <b>-2.56</b> | <b>-14.94</b>    | <b>14.68</b>   | <b>2.80</b> | <b>135.39</b>            | <b>400</b> |

AFE: área foliar específica. Prueba de medias con una significancia de 0.05. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre los valores. Letras diferentes señalan que si hay diferencias significativas.

La respuesta observada es consistente con la estrecha relación existente entre el intercambio de carbono y las condiciones biofísicas de las plantaciones. Una síntesis global de mediciones mediante Eddy Covariance mostró que el balance de carbono de las plantaciones forestales está regulado por factores como la temperatura, precipitación y desarrollo del área foliar, mientras que la producción primaria bruta responde particularmente a la precipitación y al área foliar (Tong *et al.*, 2023). Estos resultados respaldan que la disponibilidad de agua y el desarrollo progresivo del dosel pueden modificar significativamente la capacidad fotosintética de las plantaciones.

En ecosistemas tropicales con presencia de teca también se han observado cambios estacionales importantes. Igarashi *et al.* (2013) registraron en una plantación madura de *T. grandis* en Tailandia una mayor absorción de CO<sub>2</sub> durante la estación lluviosa y una reducción marcada durante la época seca. De forma similar, Rodda *et al.* (2021) encontraron en un bosque tropical seco deciduo de la India que el intercambio neto de carbono varió considerablemente entre estaciones y que las condiciones secas redujeron la capacidad del ecosistema para actuar como sumidero. Estos antecedentes sugieren que la disponibilidad hídrica constituye uno de los principales factores que regulan la dinámica estacional del carbono en ecosistemas tropicales con especies deciduas.

El efecto de la edad y del desarrollo del dosel también fue evidente. La plantación de teca de 5 meses presentó un flujo promedio positivo de 0,74 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, a pesar de que la campaña

se desarrolló durante la época de transición la época seca, mientras que las plantaciones de 44,5 y 48,5 meses presentaron balances promedio negativos. A los 5 meses, la plantación tenía una altura promedio de únicamente 0,65 m y un reducido número de hojas por individuo, condiciones que limitaban la superficie fotosintéticamente activa del sistema.

Durante las primeras etapas de establecimiento, la baja cobertura foliar puede ser insuficiente para compensar mediante fotosíntesis las pérdidas de CO<sub>2</sub> asociadas con la respiración del suelo y de la vegetación. Además, las actividades previas de preparación del terreno, como rastreo y formación de camellones, pudieron favorecer temporalmente la descomposición y liberación del carbono del suelo. Estudios recientes basados en redes de Eddy Covariance han mostrado que, aunque las plantaciones desarrolladas pueden presentar una elevada capacidad de absorción de carbono, los ecosistemas durante la etapa de establecimiento pueden mostrar balances considerablemente menores e incluso comportarse temporalmente como fuentes de carbono ([Hanggara \*et al.\*, 2026](#)).

Un patrón similar de incremento de la absorción con el desarrollo de la plantación se observó en melina. El flujo promedio pasó de  $-2,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 8,5 meses a  $-5,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a los 14,5 meses. Durante el mismo periodo, la altura promedio aumentó de 2,43 a 5,81 m, el DAP de 3,92 a 8,01 cm y el número estimado de hojas por árbol de 253 a 717. Estos cambios indican un rápido desarrollo estructural del dosel y un aumento de la superficie fotosintéticamente activa, lo que podría contribuir a explicar la mayor absorción registrada en las campañas de mayor edad.

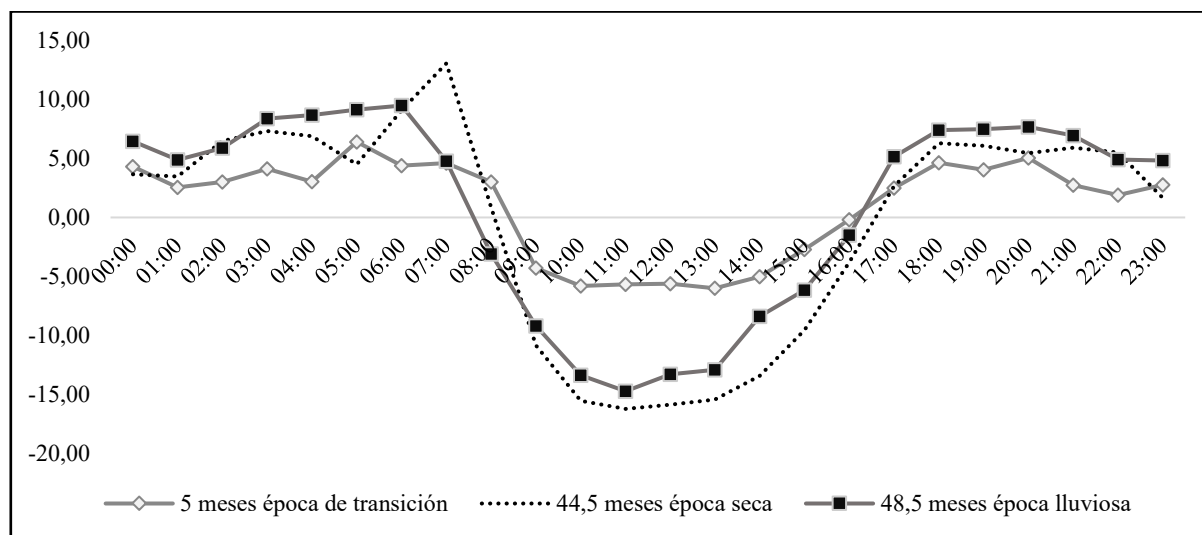
Las plantaciones de melina presentaron valores de flujo más negativos que las de teca, aun cuando las mediciones de melina correspondieron a edades considerablemente menores. Este comportamiento coincidió con una mayor velocidad de crecimiento de *G. arborea*. Como se mostró en el **Cuadro 2**, la melina presentó IMA en altura de hasta  $4,82 \text{ m año}^{-1}$  e IMA en DAP de hasta  $6,64 \text{ cm año}^{-1}$ , mientras que los máximos registrados para teca fueron de  $2,37 \text{ m año}^{-1}$  y  $2,74 \text{ cm año}^{-1}$ , respectivamente.

También se observaron diferencias en el área foliar específica (AFE). El promedio fue de  $173,14 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  para melina y  $89,14 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  para teca. Una mayor AFE representa una mayor superficie foliar por unidad de biomasa seca y puede estar asociada con una estrategia de

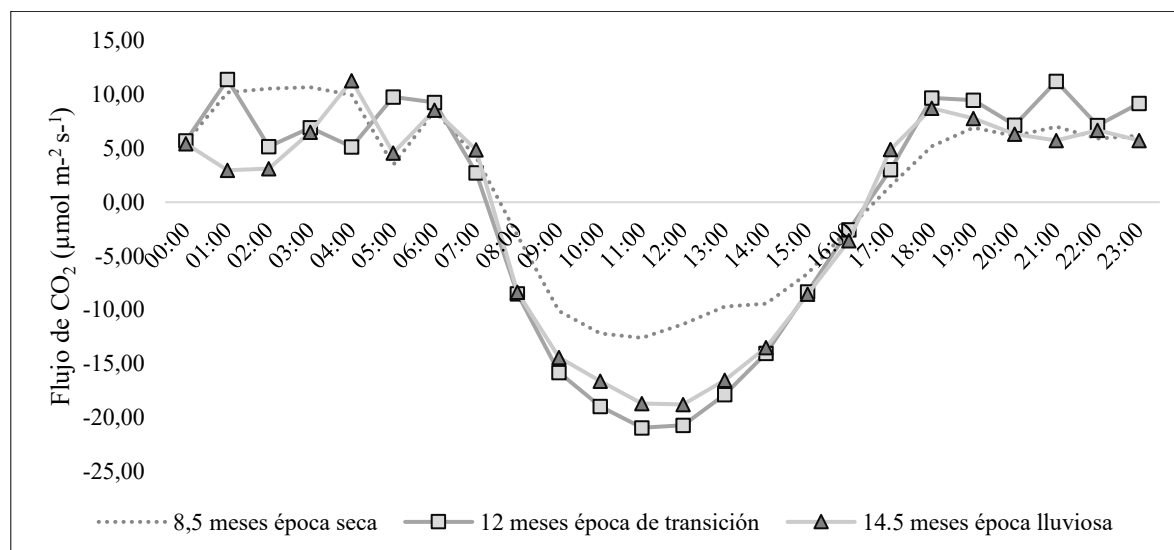
adquisición rápida de recursos y elevada actividad fotosintética. Sin embargo, esta variable no equivale al índice de área foliar ni representa directamente la cantidad total de superficie foliar del dosel, por lo que debe interpretarse juntamente con el número de hojas, la dimensión de las copas y el crecimiento de las plantaciones.

Las diferencias observadas entre ambas especies podrían, por tanto, estar asociadas con una combinación de características fisiológicas, velocidad de crecimiento y desarrollo del dosel. Estudios previos han documentado diferencias entre *G. arborea* y *T. grandis* en características relacionadas con la respuesta fotosintética y el estrés hídrico (Sachan *et al.*, 2020; Valverde *et al.*, 2021). No obstante, debido a que las especies fueron evaluadas en sitios, edades y periodos distintos, los resultados deben interpretarse como patrones observados en las plantaciones estudiadas y no como un efecto aislado de la especie.

El patrón diario de intercambio de CO<sub>2</sub> fue consistente entre las campañas (**Figuras 2 y 3**). Los valores comenzaron a hacerse negativos aproximadamente a partir de las 8:00 h, coincidiendo con el inicio de una mayor actividad fotosintética, y la mayor absorción se registró generalmente entre las 11:00 y las 12:00 h. Posteriormente, la magnitud de la absorción disminuyó y, a partir de aproximadamente las 16:00 h, los flujos tendieron a hacerse positivos. Durante las horas sin radiación, la ausencia de fotosíntesis y la continuidad de la respiración autotrófica y heterotrófica explican el predominio de flujos positivos.



**Figura 2.** Flujo diario de CO<sub>2</sub> en plantaciones forestales de *Tectona grandis* según la época del año.



**Figura 3.** Flujo diario de CO<sub>2</sub> en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* según la época del año.

Este patrón diurno es consistente con lo reportado por Igarashi *et al.* (2013), Jha *et al.* (2013) y Rodda *et al.* (2021) para ecosistemas tropicales con presencia de teca, donde la máxima absorción de CO<sub>2</sub> ocurrió durante las horas de mayor disponibilidad de radiación y disminuyó hacia el final de la tarde.

### 3.2.2 Flujos de vapor de agua (H<sub>2</sub>O)

El flujo de vapor de agua también presentó diferencias significativas entre las plantaciones agrupadas por especie ( $p < 0,05$ ). En teca se registró un promedio de  $3,36 \pm 4,07 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mientras que en melina el promedio fue de  $2,54 \pm 2,87 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Los valores positivos representan un transporte de vapor de agua desde la superficie y la vegetación hacia la atmósfera, asociado principalmente con los procesos de evaporación y transpiración.

En melina, el flujo promedio fue de  $2,37 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  durante la campaña realizada a los 8,5 meses en época seca, de  $2,19 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a los 12 meses y de  $3,10 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a los 14,5 meses, estos últimos durante la época lluviosa. El mayor pico registrado fue de  $6,45 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a los 14,5 meses (Cuadro 4). El incremento observado en esta campaña coincidió con un mayor desarrollo de la plantación, particularmente en altura, diámetro, tamaño del dosel y número de hojas.

**Cuadro 4.** Flujo de vapor de agua en plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según edad y época del año, 2022.

| Información del sitio |            |              |               | Flujo de vapor de agua<br>(mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |             |
|-----------------------|------------|--------------|---------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| Especie               | Época      | Edad (meses) | Datos válidos | Promedio                                                          | Máximo pico |
| Melina                | Seca       | 8.5          | 1 054         | 2.37 B                                                            | 4.78 B      |
|                       | Transición | 12           | 1 329         | 2.19 B                                                            | 5.06 B      |
|                       | Lluviosa   | 14.5         | 1 148         | 3.10 C                                                            | 6.45 C      |
| Teca                  | Transición | 5            | 831           | 1.62 A                                                            | 3.49 A      |
|                       | Seca       | 44.5         | 1 337         | 4.64 D                                                            | 9.42 D      |
|                       | Lluviosa   | 48.5         | 1 401         | 3.19 C                                                            | 6.87 C      |
| <b>Promedio</b>       |            |              | <b>1183</b>   | <b>2.85</b>                                                       | <b>6.01</b> |

Prueba de medias con una significancia de 0.05. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre los valores. Letras diferentes señalan que sí hay diferencias significativas.

La relación entre crecimiento y consumo de agua resulta particularmente importante para *G. arborea*, una especie caracterizada por altas tasas de crecimiento juvenil. Estudios recientes realizados en plantaciones de melina han señalado que la productividad y el uso del agua se encuentran estrechamente relacionados y que la disponibilidad hídrica constituye un factor determinante de su desempeño bajo condiciones de déficit (López-Aguirre *et al.*, 2024). Por tanto, el aumento del flujo de H<sub>2</sub>O observado en las plantaciones de mayor desarrollo podría estar relacionado tanto con una mayor disponibilidad de agua como con el incremento de la superficie transpirante del dosel.

En teca, el patrón fue diferente. La plantación de 5 meses presentó el menor flujo promedio, con 1,62 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, mientras que a los 44,5 meses, durante la época seca, se registró el valor promedio más alto del estudio, con 4,64 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> y un pico máximo de 9,42 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Posteriormente, a los 48,5 meses durante la época lluviosa, el promedio fue de 3,19 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

El mayor flujo registrado en la teca de 44,5 meses durante la época seca indica que la respuesta del intercambio de H<sub>2</sub>O no depende exclusivamente de la precipitación. La pérdida de agua desde el ecosistema responde simultáneamente a la disponibilidad hídrica del suelo, demanda atmosférica, radiación, temperatura, déficit de presión de vapor, desarrollo del dosel y capacidad de las raíces para acceder al agua almacenada en el perfil del suelo. En este caso, la plantación presentaba un dosel cercano a 10 m de altura y un sistema radicular

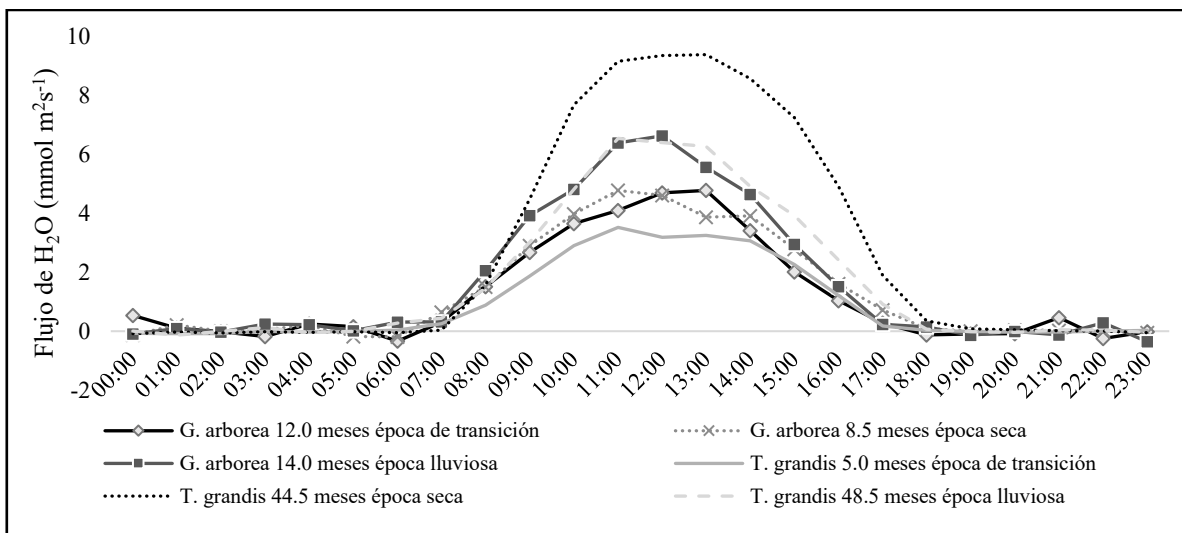
considerablemente más desarrollado que las plantaciones jóvenes, lo que potencialmente le permitió mantener la transpiración durante periodos con menor precipitación.

Sin embargo, debido a que no se realizaron mediciones directas de humedad del suelo ni profundidad radicular, este mecanismo debe interpretarse como una posible explicación y no como una relación causal demostrada por el estudio.

La respuesta encontrada concuerda con evidencia reciente de sistemas forestales tropicales y plantaciones, donde los flujos de carbono y agua muestran una interacción compleja con la disponibilidad hídrica. Hanggara *et al.* (2026), mediante el análisis de 16 sitios de Eddy Covariance del sudeste asiático, encontraron que las plantaciones con elevada productividad pueden presentar simultáneamente una alta absorción de carbono y elevados flujos de evapotranspiración, lo que genera un compromiso entre secuestro de carbono y utilización del agua.

Este aspecto resulta relevante para interpretar conjuntamente los resultados de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O del presente estudio: una mayor absorción de carbono no necesariamente implica una mayor eficiencia en el uso del agua. Estudios recientes en *G. arborea* también han destacado la necesidad de considerar simultáneamente productividad y eficiencia hídrica al evaluar el desempeño de plantaciones bajo escenarios de mayor estrés por sequía (López-Aguirre *et al.*, 2024).

A escala diaria, el flujo de vapor de agua comenzó a incrementarse aproximadamente a partir de las 7:00 h, alcanzó sus mayores valores entre las 10:00 y las 14:00 h y disminuyó progresivamente hacia las 18:00 h (**Figura 4**). Esta dinámica coincide con el aumento diario de la radiación y de la demanda evaporativa atmosférica, que favorecen la apertura estomática y la transpiración del dosel. Un comportamiento similar fue reportado por Jha *et al.* (2013) para bosques mixtos con teca, donde los máximos flujos de vapor de agua ocurrieron durante las horas centrales del día.



**Figura 4.** Flujo diario de vapor de H<sub>2</sub>O en plantaciones forestales de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*.

En conjunto, los patrones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O muestran que el intercambio entre las plantaciones y la atmósfera estuvo estrechamente asociado con el desarrollo estructural del dosel y las condiciones ambientales de cada campaña. Las plantaciones con mayor desarrollo foliar tendieron a presentar una mayor absorción de CO<sub>2</sub>, pero también mayores flujos de vapor de agua, evidenciando el acoplamiento entre los ciclos de carbono y agua que caracteriza el funcionamiento fisiológico de los ecosistemas forestales.

#### 4. Conclusiones

El funcionamiento de las plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* como sumideros de CO<sub>2</sub> depende del desarrollo progresivo del dosel y de su interacción con las condiciones ambientales. A medida que aumenta la superficie fotosintéticamente activa, se fortalece la capacidad del ecosistema para compensar las emisiones derivadas de la respiración, lo que evidencia que la función de sumidero se consolida conforme avanza el establecimiento de la plantación.

El intercambio simultáneo de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O confirma además que la captura de carbono está estrechamente vinculada con el uso del agua. Por ello, la contribución climática de estas plantaciones no debe interpretarse únicamente a partir de su capacidad de fijar carbono, sino

considerando conjuntamente la edad, el desarrollo del dosel, las condiciones del sitio y la disponibilidad hídrica que regulan su funcionamiento ecosistémico.

## 5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Proyecto D-TREE: Dinámica temprana de Remoción y Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en diferentes coberturas forestales en Costa Rica como metodología para la adaptación al cambio climático, de la Universidad Nacional (UNA), por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, se agradece a los dueños de fincas por facilitar el espacio y las condiciones necesarias para el establecimiento del proyecto.

## 6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

## 7. Referencias

- Aguilar-Rodríguez, C., Sequeira-Guillén, A. F., & Peralta-Tercero, E. J. (2017). Factor de forma para la *Tectona grandis* L.F., empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de Nicaragua. *Ciencia e Interculturalidad*, 21(2), 74–84. doi:10.5377/rci.v21i2.5602
- Alvarado, A., & Fallas, J. L. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81–87. doi:10.15517/rac.v28i1.61287
- Burba, G. (2013). *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-COR Biosciences.
- Carvajal Arroyo, D. A., Murillo Cruz, R. A., Alvarado Hernández, A., Ávila Arias, C., González Rojas, M., Hernández Castro, W., & Molina-Murillo, S. (2024). Efecto de la fertilización sobre el crecimiento temprano de clones de *Gmelina arborea* Roxb.

- ex Sm. en el Pacífico Norte y Sur de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(1), 1–16. doi:10.15359/rca.58-1.3
- Chaves-Solera, M. A., & Chavarría-Soto, E. (2017). *Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica. I. Órdenes de suelos*. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.
- Fonseca-González, W., Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., & Rojas-Vargas, M. (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24(1), 31–44. doi:10.14483/2256201X.15961
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M., & Spínola-Parallada, R. M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 143–159. doi:10.15359/rca.55-1.7
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Benavidez-Fallas, R., Arce-Ledezma, V., Carmona-Solís, R., Ulloa-Saborío, G., Salazar-Ruiz, A. G., & Carvajal-Arroyo, D. A. (2022). Predicción de biomasa en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f. y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(44). doi:10.18845/rfmk.v19i44.6104
- Garro-Fuentes, J. C. (2021). *Comportamiento de clones de Gmelina arborea Roxb. en Cañaza de Puerto Jiménez, Pacífico Sur de Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica].
- Hanggara, B. B., Stiegler, C., Hata, Y., Melling, L., June, T., Kumagai, T., Hirano, T., & Knohl, A. (2026). Trade-offs between carbon and water fluxes along a land use intensity gradient in Southeast Asian forests and plantations. *Global Change Biology*, 32(2), e70753. doi:10.1111/gcb.70753
- Igarashi, Y., Tanaka, N., Tanaka, K., Yoshifuji, N., Sato, T., Tantasirin, C., & Suzuki, M. (2013). Seasonality of water and carbon dioxide exchanges at a teak plantation in northern Thailand. *Ecohydrology*, 6(1), 125–133. doi:10.1002/eco.284
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2025). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2024: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. INEC.
- Jha, C. S., Thumaty, K. C., Rodda, S. R., Sonakia, A., & Dadhwal, V. K. (2013). Analysis of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes over an Indian teak mixed deciduous

- forest for winter and summer months using eddy covariance technique. *Journal of Earth System Science*, 122(5), 1259–1268. doi:10.1007/s12040-013-0350-7
- López-Aguirre, A. M., Barrios-Trilleras, A., & Melo-Cruz, O. A. (2024). Balancing wood production and water use efficiency in the selection of open-pollinated families of *Gmelina arborea*. *New Forests*, 55, 961–978. doi:10.1007/s11056-023-10013-x
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2020). *Caracterización de la Agencia de Santa Rosa: Dirección de Extensión Agropecuaria*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [MIDEPLAN-PNUD]. (2012). *Plan de Desarrollo Humano Local Cantón de Los Chiles 2013–2023*.
- Municipalidad de Los Chiles. (2018). *Plan de Desarrollo Municipal 2018–2022*. Municipalidad de Los Chiles.
- Municipalidad de San Carlos. (2014). *Plan de Desarrollo Distrital de Pocosal 2014–2024*. Municipalidad de San Carlos.
- Pérez Poveda, A. P., Murillo Cruz, R. Á., Ramírez Núñez, F., Hernández Castro, W., Carvajal Arroyo, D. A., Cortés Cortés, M. L., & Salazar Ruiz, A. G. (2026). Evaluación clonal de *Tectona grandis* L.f. bajo tres condiciones de suelo y de manejo silvicultural en Nicoya, Abangares y San Carlos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 60(2), 1–30. doi:10.15359/rca.60-2.10
- Rodda, S. R., Thumaty, K. C., Praveen, M. S. S., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2021). Multi-year eddy covariance measurements of net ecosystem exchange in tropical dry deciduous forest of India. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301–302, 108351. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108351
- Sachan, S., Verma, S., Kumar, S., & Kumar, A. (2020). Morphological, physiological and biochemical performance of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* under drought stress conditions. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 1305–1314. doi:10.22271/chemi.2020.v8.i1r.8437
- Salas-Rodríguez, A., Murillo-Gamboa, O., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., & Mata-Granados, X. (2016). Evaluación de la severidad de la pudrición del tronco en

- Gmelina arborea* Roxb. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 1–10. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2547
- Schweizer-Lassaga, S. (2011). *Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.
- Tong, X., Xiao, J., Liu, P., Zhang, J., Zhang, J., Yu, P., Meng, P., & Li, J. (2023). Carbon exchange of forest plantations: Global patterns and biophysical drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 336, 109379. doi:10.1016/j.agrformet.2023.109379
- Valverde, J. C., Arias-Aguilar, D., Montero-Zeledón, E., & Gutiérrez-Fallas, D. (2021). Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. *Uniciencia*, 35(1), 320–334. doi:10.15359/ru.35-1.20
- Xiao, J., Baldocchi, D., Ichii, K., Li, F., & Papale, D. (2026). Insights into terrestrial carbon and water cycling from the global eddy covariance network. *Nature Reviews Earth & Environment*, 7, 60–79. doi:10.1038/s43017-025-00743-1

### **Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial**

Durante la preparación del manuscrito se utilizó ChatGPT (OpenAI) como herramienta de apoyo para la traducción al inglés, revisión lingüística y mejora de la claridad de algunos fragmentos del texto. El contenido generado o modificado con apoyo de esta herramienta fue revisado, verificado y aprobado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido científico y la versión final del manuscrito.

### **Declaración sobre disposición de datos de investigación**

Los datos de la investigación están disponibles bajo petición, una condición que se justifica en el manuscrito.

## Contribución de autores

| <b>Autor(a)</b>               | <b>Contribución CRediT sugerida</b>                                                                              |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| David Antonio Carvajal Arroyo | Investigación, Curación de datos, Análisis formal, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición |
| Ana Gabriela Salazar Ruíz     | Investigación, Curación de datos, Análisis formal, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición |
| José Felix Rojas Marín        | Investigación, Curación de datos, Análisis formal, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición |
| Mónica Lizbeth Cortes Cortes  | Investigación, Curación de datos, Escritura – revisión y edición                                                 |
| Rafael Murillo Cruz           | Investigación, Curación de datos, Análisis formal, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición |
| Federico Alice Guier          | Escritura – revisión y edición                                                                                   |
| Diana Mora Campos             | Análisis formal, Escritura – revisión y edición                                                                  |
| Paula Pérez Poveda            | Investigación, Curación de datos, Escritura – revisión y edición                                                 |
| Felipe Herrera Mejía          | Investigación, Curación de datos, Escritura – revisión y edición                                                 |

## Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que los datos, las aplicaciones y otros contenidos subyacentes al manuscrito están referenciados.
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación, cuando corresponda, se describen en el manuscrito.
- Los autores declaran que una vez que un manuscrito es postado en el servidor SciELO Preprints, sólo puede ser retirado mediante solicitud a la Secretaría Editorial deSciELO Preprints, que publicará un aviso de retracción en su lugar.
- Los autores aceptan que el manuscrito aprobado esté disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- El autor que presenta el manuscrito declara que las contribuciones de todos los autores y la declaración de conflicto de intereses se incluyen explícitamente y en secciones específicas del manuscrito.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints o publicado en una revista.
- Si el manuscrito está siendo evaluado o siendo preparando para su publicación pero aún no ha sido publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.
- El autor que envía el manuscrito declara que todos los autores del mismo están de acuerdo con el envío a SciELO Preprints.