

Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia en especies forestales

Design and calibration of a low-cost device for measuring sap flow in forest species

Ana Milena López-Aguirre ¹ y Alonso Barrios-Trilleras ²

Fecha de Recepción: 25 de mayo de 2024

Fecha de Aceptación: 1 de agosto de 2024

Cómo citar: López Aguirre, A. M., y Barrios Trilleras, A. (2024). Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia en especies forestales. *Tecnura*, 28(81), 123-146. <https://doi.org/10.14483/22487638.22220>

Resumen

Objetivo: El estudio tiene como objetivo diseñar y calibrar un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia en especies leñosas, utilizando el método de la razón de calor como equivalente de la transpiración.

Métodología: El dispositivo consta de un sensor y un sistema de control y adquisición de datos programado con *Arduino IDE*. La capacidad de detectar variaciones mínimas de temperatura, y el consumo energético fueron evaluados. La calibración del dispositivo incluyó la comparación y evaluación de la velocidad del flujo de savia (F_d) estimada frente a la obtenida mediante un lisímetro de pesaje en plantas de *Gmelina arborea* en invernadero. Adicionalmente, una evaluación en condiciones de campo comparó las tasas de transpiración obtenidas con el dispositivo en un árbol de *Gmelina arborea* con la evapotranspiración potencial (ET_0).

Resultados: El dispositivo demostró una alta efectividad, ya que permitió la medición de variaciones de temperatura de hasta 0,004 °C, con un bajo consumo energético promedio de 6,84 mAh. Los datos de F_d obtenidos por el dispositivo mostraron una relación lineal significativa con los valores de F_d medidos con el lisímetro, con un $R^2 = 0,791$. Una prueba t indicó que no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre la F_d medida por ambos métodos. Además, se observó una fuerte congruencia entre las mediciones de transpiración obtenidas con el dispositivo y la ET_0 , lo cual señala la confiabilidad del dispositivo.

Conclusiones: El dispositivo desarrollado demostró un comportamiento estable y adecuado. Pudo detectar con precisión las variaciones de temperatura asociadas al flujo de savia en árboles de *Gmelina arborea*. También, generó información crucial para comprender los requerimientos hídricos de especies leñosas, lo que puede orientar decisiones de manejo forestal y silvicultura, especialmente en el contexto del cambio climático.

Palabras clave: *Gmelina arborea*, transpiración, método de la razón de calor.

¹Magíster en Recursos Forestales, candidata a doctora en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas. Profesora asociada, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.  Email: amlopeza@ut.edu.co

²Doctor en Ciencias Forestales. Profesor asociado, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.  Email: abarriost@ut.edu.co

Abstract

Objective: The study aims to design and calibrate a low-cost device to monitor sap flow in woody species, using the heat ratio method as a proxy of transpiration.

Methodology: The device consists of a sensor and a data acquisition and control system programmed with Arduino IDE. The ability to detect minimal temperature variations and energy consumption were evaluated. Device calibration included comparing and evaluating the estimated sap flow rate (F_d) against that obtained using a weighing lysimeter on *Gmelina arborea* plants in a greenhouse. Additionally, a field evaluation compared the transpiration rates obtained with the device on a *Gmelina arborea* tree with potential evapotranspiration (ET_0).

Results: The device demonstrated high effectiveness, allowing the measurement of temperature variations down to 0.004 °C, with a low average energy consumption of 6.84 mAh. The F_d data obtained by the device showed a significant linear relationship with the F_d values measured by the lysimeter, with an $R^2 = 0,791$. A t -test indicated no significant differences ($p > 0,05$) between the F_d measured by both methods. Additionally, a strong congruence was observed between the transpiration measurements obtained with the device and ET_0 , demonstrating the reliability of the device.

Conclusions: The developed device demonstrated stable and adequate performance. It was able to accurately detect temperature variations associated with sap flow in *Gmelina arborea* trees. The device can generate crucial information to understand the water requirements of species, which can guide forest management and silviculture decisions, especially in the context of climate change.

Keywords: *Gmelina arborea*, transpiration, heat ratio method.

Introducción

La cuantificación del agua utilizada por los bosques es fundamental para comprender su papel en el balance hídrico y en el funcionamiento de los ecosistemas. En particular, esto adquiere una relevancia crítica en ecosistemas forestales secos, donde el agua es un recurso limitado, y en sistemas de producción forestal que dependen de su manejo eficiente (Bhattacharya, 2019; Medrano *et al.*, 2007; Suárez *et al.*, 2021). Conocer los requerimientos hídricos de los bosques es esencial no solo para evaluar su capacidad de resiliencia frente a eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas, sino también para prever cómo podrían responder a los cambios climáticos proyectados (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Además, esta información es clave para desarrollar estrategias de manejo y adaptación que aseguren la sostenibilidad de los bosques y los servicios ecosistémicos que proveen, como la regulación del ciclo del agua y la mitigación del cambio climático (Hakamada *et al.*, 2020).

El agua utilizada por un árbol generalmente se determina mediante la cuantificación del agua transpirada por las hojas. La medición de la transpiración puede efectuarse a diferentes escalas, donde la medición a nivel de hoja es el método más fácil, por tanto, el más utilizado en investigación, principalmente en viveros o invernaderos. Sin embargo, este método, que requiere equipos especializados y costosos para la medición del flujo de gases, tiene la dificultad

de escalar los valores obtenidos al nivel de toda la planta o rodal o cuenca hidrográfica (Cárdenas *et al.*, 2019; Miner *et al.*, 2017).

Métodos más robustos para la estimación de la transpiración a nivel de planta incluyen lisímetros que pueden usarse en macetas o árboles pequeños, ya que su operación requiere conocer el peso del agua transpirada y evaporada del suelo (Howell, 2005; Meissner *et al.*, 2010). La principal desventaja radica en la complejidad que implica su empleo en árboles de gran tamaño. En las últimas décadas, se han desarrollado aproximaciones más simples basadas en la medición de la velocidad del flujo de savia (F_d) (Granier y Gross, 1987); no obstante, su principal limitación es que se aplica de forma puntual, es decir, en un único punto del tallo del árbol, ignorando la variabilidad intrínseca del xilema a lo largo de su circunferencia. Sin embargo, una de sus ventajas es que existen varios procedimientos para extrapolar los resultados a nivel de planta (Hatton, 1990) y, posteriormente, escalarlos a nivel de la masa forestal, cuenca hidrográfica o ecosistema, según densidades de plantas y dominancia de especies (Cárdenas *et al.*, 2019). Entre las técnicas disponibles para la cuantificación de la transpiración, se ha encontrado que el análisis del flujo de savia es eficiente para estimar la transpiración del árbol y del bosque (Burgess *et al.*, 2000; Burgess *et al.*, 2001).

El flujo de savia es el movimiento de minerales, nutrientes y agua en el xilema causado por el gradiente de potencial desde el suelo (una región de alto potencial de agua) hasta la atmósfera (una región de bajo potencial de agua) (Ehsani *et al.*, 2017). Varía según la especie, la hora del día y la época del año; aumenta cuando ocurre la mayor radiación solar (al mediodía). Por tanto, durante la noche, normalmente ocurre muy poco (o nulo) flujo de savia. Además, en los días fríos y nublados, el flujo de savia disminuye debido a la menor incidencia de luz o radiación solar en las copas de los árboles (Giménez *et al.*, 2013).

Los métodos de medición del flujo de savia disponibles son térmicos, y estos lo estiman a partir de la F_d y escalando posteriormente por el área de la albura conductora (A_s) (Quiñonez-Piñón y Valeo, 2017). Hay dos enfoques generales para determinar la F_d : por calor continuo o disipación de calor (Granier y Gross, 1987), y por pulso de calor (Marshall, 1958). La diferencia principal es que en el primero se aplica calor continuamente a una sonda (sensor), mientras se registra la diferencia de temperatura entre esta sonda y otra no calentada ubicada 10 cm más abajo en el xilema (Vandegheuchte y Steppe, 2013). La segunda aproximación se basa en la ecuación de conducción-convección de calor presentada por Marshall (1958). En este caso, el calor se aplica en pulsos de 2 a 6 segundos a través de una sonda, mientras que la diferencia de temperatura antes y después del pulso se registra en otra u otras sondas ubicadas a una distancia conocida. Estas mediciones se realizan durante un periodo mínimo de 100 segundos, y las variaciones de temperatura se emplean para determinar la F_d (Vandegheuchte y Steppe,

2013). La F_d está estrechamente relacionada con la transpiración de la planta; sin embargo, se requiere un proceso de calibración para convertir eficientemente los valores observados en tasas de transpiración efectivas.

Este estudio propone el diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia en árboles como un indicador de la transpiración a nivel de la planta. Con este dispositivo, será posible generar información de alta calidad que permita cuantificar la cantidad de agua utilizada y requerida por las especies forestales y así lograr una producción óptima. En el estudio se emplea como material experimental plantas de *Gmelina arborea* Roxb. para la calibración y la evaluación del dispositivo. Esta es una especie de rápido crecimiento originaria del sudeste asiático, que ha sido introducida en países tropicales de América Latina (Valverde *et al.*, 2020), y actualmente es de las más importantes en los programas de reforestación en Colombia (Barrios-Trilleras *et al.*, 2021).

Los objetivos del estudio fueron: (a) diseñar y evaluar el funcionamiento de un dispositivo de bajo costo que integre un sistema de control y adquisición de datos, junto con un sensor de flujo de savia, optimizado para su uso en especies leñosas; (b) calibrar las estimaciones de velocidad de flujo de savia (F_d) obtenidas por el dispositivo mediante comparaciones precisas con observaciones de transpiración registradas, a partir de un lisímetro de pesaje; (c) evaluar el desempeño del dispositivo en la medición de tasas de transpiración de *Gmelina arborea*, tanto en condiciones controladas de invernadero como en entornos de campo abierto.

Metodología

Teoría del método de la razón de calor

Para determinar la velocidad del flujo de savia se trabajó método de la razón de calor (*heat ratio method* [HRM]) (Burgess *et al.*, 2001; Forster, 2020; Marshall, 1958), el cual mide la proporción del aumento de temperatura, después de retirar un pulso térmico en puntos equidistantes aguas arriba y aguas abajo de un emisor de calor (Burgess *et al.*, 2001). La velocidad del pulso de calor se calcula como:

$$v_h = k \cdot \frac{1}{x} \cdot \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \cdot 3600 \quad (1)$$

Donde, v_h es la velocidad del pulso de calor (cm h^{-1}), k es la difusividad térmica de la madera fresca ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), x es la distancia entre el emisor de calor y las sondas de temperatura (generalmente 6 mm), v_1 y v_2 son los aumentos de temperatura aguas abajo y aguas arriba del emisor de calor, generalmente calculados entre 60 y 80 s después de retirar el pulso de calor (Burgess *et al.*, 2001).

Debido al daño causado al xilema por las sondas insertadas, la velocidad del pulso de calor (v_h) debe corregirse. La velocidad del pulso de calor corregida (v_c) se obtiene empleando los coeficientes de corrección propuestos por [Burgess et al. \(2001\)](#), los cuales se integran en la siguiente ecuación:

$$v_c = b \cdot v_h + c \cdot v_h^2 + d \cdot v_h^3 \quad (2)$$

Donde, b , c y d son coeficientes que dependen del tamaño de la herida.

La velocidad del pulso de calor v_c se convierte en velocidad del flujo de savia (F_d) a través de la ecuación:

$$F_d = \frac{\rho_b \cdot (c_w + m_c \cdot c_s)}{\rho_s \cdot c_s} \cdot v_c \quad (3)$$

Donde, F_d es la velocidad del flujo de savia ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$), ρ_b es la densidad básica de la albura (kg m^{-3}), ρ_s es la densidad de la savia (asumida 1000 kg m^{-3}), m_c es el contenido de humedad de la albura (kg kg^{-1}), c_w y c_s es la capacidad calorífica específica de la madera seca ($1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y de la savia ($4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), respectivamente ([Forster, 2020](#)).

Finalmente, el volumen de savia transpirada (Q , L h^{-1}) por la planta se obtiene mediante el producto entre F_d y el área de la albura conductora ($Q = F_d \cdot A_s$).

Fabricación de sondas

El sensor de flujo de savia consistió en tres sondas, un emisor de calor central y dos sondas de temperatura equidistantes aguas arriba y aguas abajo del emisor de calor (6 mm). Las sondas se fabricaron con agujas de dosificación de acero inoxidable de 1,5 mm de diámetro y 38 mm de longitud. El emisor de calor se construyó con una resistencia de alambre esmaltado Ni80Cr20 de 20-25 Ω (figura 1). Cada una de las sondas de temperatura estuvo compuesta por dos termistores NTC recubiertos de resina epoxi (Lingee Sensor, China) ubicados a 10 mm y 20 mm desde la punta de la sonda (figura 1). NTC significa *negative temperature coefficient*, lo que indica que la resistencia del termistor disminuye a medida que aumenta la temperatura. El costo de construcción de un sensor de flujo de savia fue de aproximadamente USD 6.

Sistema de control y adquisición de datos

Este se construyó en una placa de circuito impreso alrededor de un microprocesador ATMe-ga328P (Microchip Technology Inc.) (figura 2). El emisor de calor ($\approx 5,74 \text{ W}$) fue controlado por una señal digital del microprocesador a un transistor (ME60N03A, VBSemi Co.). Los termistores se midieron con un circuito puente y una resistencia de precisión de 10 $\text{k}\Omega$ (tolerancia del

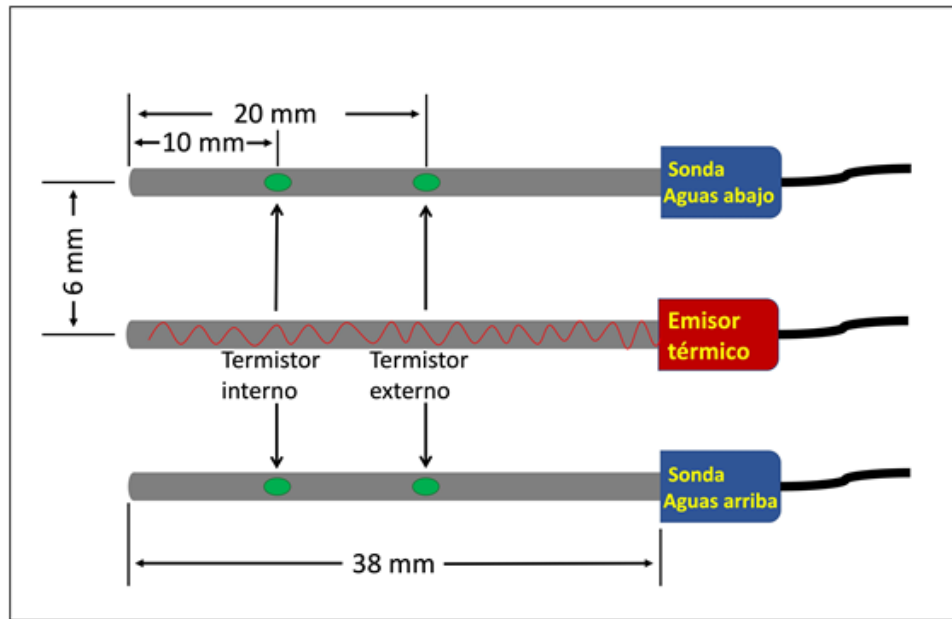


Figura 1. Detalles de la fabricación del sensor de flujo de savia

0,1 %) como referencia y un voltaje de excitación de 2,048 V controlado por un circuito regulador de voltaje de precisión (LM4040, Texas Instruments). La señal analógica de cada termistor se recibió en uno de los ocho canales disponibles de un multiplexor analógico (74HC4051D, NXP Semiconductors). Las señales analógicas se convirtieron en señales digitales por medio de un convertidor analógico-digital de 16 bits de resolución (ADS1110, Texas Instruments), y posteriormente se convirtieron en voltaje. Luego, se calculó la resistencia de cada termistor utilizando la siguiente fórmula de divisor de voltaje:

$$R_T = R_{Ref} \left(\frac{V_{Entrada}}{V_{Salida}} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde, R_T es la resistencia del termistor en Ω , R_{Ref} es la resistencia de referencia (10 k Ω), y $V_{Entrada}$ y V_{Salida} es el voltaje de entrada (2,048 V) y de salida al divisor de voltaje (medido por el dispositivo).

Los valores de resistencia (R_T) se convirtieron en temperatura en grados Celsius, con la ecuación de Steinhart-Hart (Steinhart y Hart, 1968):

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R_T) + C \cdot (\ln(R_T))^3 \quad (5)$$

Donde, T_K es la temperatura del termistor en Kelvin, R_T es la resistencia del termistor, y A , B y C son coeficientes proveídos por el fabricante. Para convertir la temperatura de Kelvin a grados Celsius se trabajó la relación $T^{\circ}C = T_K - 273,15$.

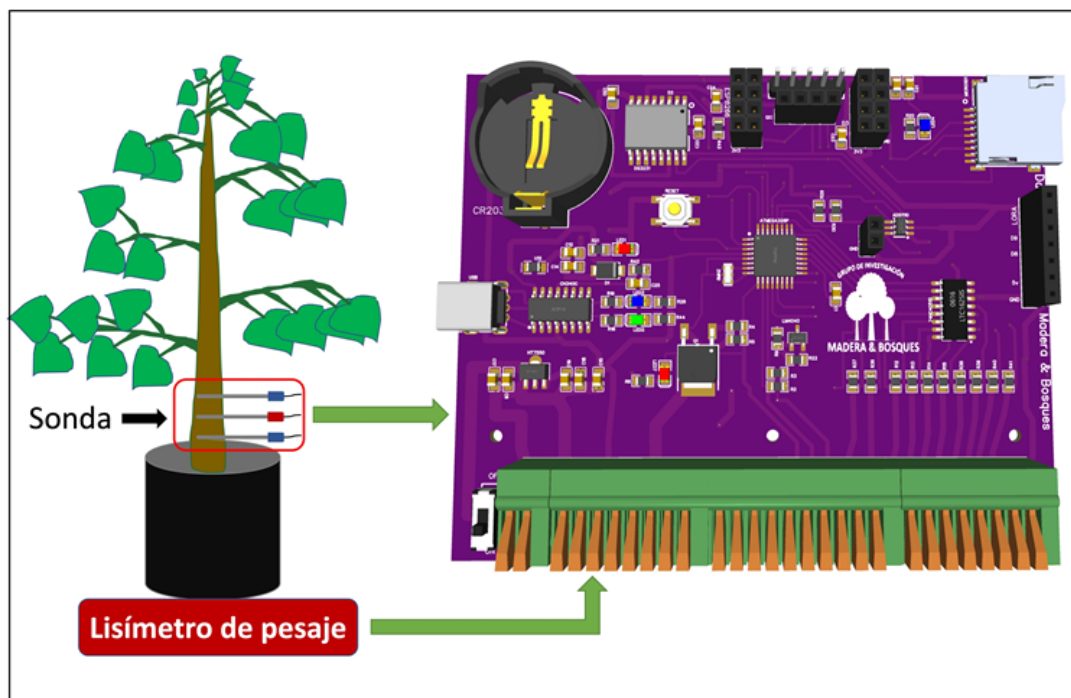


Figura 2. Detalles de la placa de circuito impreso del sistema de control y adquisición de datos, y configuración para la calibración del dispositivo

La placa del circuito impreso se diseñó con el *software* abierto *EasyEDA* ([EasyEDA, 2023](#)), y el *software* para el sistema de control y adquisición de datos se programó con *Arduino IDE*, v. 2.1.1 ([Arduino, s. f.](#)). El costo de los materiales para la construcción del sistema de control y adquisición de datos fue de aproximadamente USD 100.

El ciclo de trabajo del dispositivo se configuró para una medición inicial de las sondas de temperatura durante 10 s; luego se aplicó un pulso térmico durante 5 s; posteriormente, se continuó registrando las sondas de temperatura durante 100 s adicionales; por último, el dispositivo entró en hibernación durante 15 min (900 s) y reinició el ciclo. Se obtuvieron y registraron marcas de tiempo con un reloj en tiempo real (DS3231, Maxim Integrated TM). Todos los datos se almacenaron en una tarjeta microSD en un archivo con extensión .csv.

Evaluación del consumo de energía del dispositivo

Se llevó a cabo una evaluación del consumo de energía del dispositivo, para lo cual se midió la corriente (mA) por medio de un sensor de corriente (INA229, Texas Instruments), conectado a una placa Arduino UNO Rev3 (Arduino LLC). El dispositivo fue alimentado con tres baterías de litio NCR18650B con una capacidad de 3400 mAh conectadas en serie, que proporcionaban un voltaje de ~12 V.

Durante la prueba, se monitoreó la corriente a lo largo de 33 ciclos de trabajo para obtener datos detallados sobre el consumo de energía en cada componente del ciclo operativo del dispositivo. El objetivo era identificar los patrones de consumo y determinar la eficiencia energética del sistema en condiciones reales de funcionamiento.

Evaluación del dispositivo en invernadero

El experimento de calibración se efectuó en condiciones de invernadero en un sitio a 1100 m s. n. m. en Ibagué (Colombia). Para la calibración se utilizaron cuatro plantas jóvenes de *Gmelina arborea* de un año de edad con diámetro de cuello de 3,89-4,51 cm y altura promedio de 2,0 m cultivadas en macetas de 20 L llenas de sustrato homogéneo (tabla 1).

Tabla 1. Descripción del material experimental de *Gmelina arborea* utilizado para la calibración

Planta	Diámetro de cuello (cm)	Área de albura (cm ²)	Densidad básica (kg m ⁻³)	Contenido de humedad (kg kg ⁻¹)
1	3,89	11,95	487,49 ± 18,16	1,165 ± 0,061
2	4,51	16,01	471,20 ± 8,14	1,283 ± 0,037
3	4,04	12,81	444,78 ± 8,71	1,321 ± 0,045
4	4,20	13,86	438,98 ± 9,37	1,383 ± 0,035
Promedio	4,16	13,65	460,61 ± 22,94	1,288 ± 0,092

La evaluación consistió en la comparación de la F_d obtenida simultáneamente a través del dispositivo desarrollado y la F_d medida por un lisímetro de pesaje (figura 2), el cual consistió en una celda de carga de 50 kg con una precisión de aproximadamente 0,1 g conectada directamente al dispositivo (sistema de adquisición).

Antes de cada medición, el sustrato de las macetas se saturó con agua hasta capacidad de campo y luego se cubrió con un aislante de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación. Luego, el dispositivo inició la recolección de información, y registró los aumentos de temperatura aguas abajo y aguas arriba del emisor de calor (v_1 y v_2), y la pérdida de peso (transpiración observada) obtenida del lisímetro de pesaje. La medición se realizó cada 15 minutos durante 3-5 días consecutivos, o hasta que la planta mostrara un estrés hídrico evidente en las hojas. El mismo proceso se repitió hasta alcanzar un periodo de medición de ~ 15-20 días para cada planta. Al final del experimento, se cortaron las plantas, y se extrajeron cuatro discos de ~ 3-4 cm de grosor de cada planta para determinar su área de albura conductora (A_s), densidad básica (ρ_s) y contenido de humedad (m_c) de la albura, según la norma American Society for Testing y Materials (ASTM, 2017).

El A_s se evaluó visualmente, y debido a que no observó una formación distintiva de duramen, el A_s se definió como el área de circunferencia total alrededor del cuello de la planta, que oscilaba entre 11,95 cm² y 16,01 cm². La ρ_s promedio de la albura varió entre 438,98 y 487,49 kg m⁻³, con una media de 460,61 kg m⁻³, mientras que el m_c de las muestras frescas osciló entre 1,165 y 1,383 kg kg⁻¹, con una media de 1,288 kg kg⁻¹ (tabla 1).

Con la información obtenida se calcularon valores horarios de v_c , F_d , Q y de transpiración observada a partir del lisímetro de pesaje, promediando los valores registrados cada 15 minutos. La transpiración registrada mediante el lisímetro de pesaje se convirtió en F_d observada, dividida en el A_s de cada planta.

Calibración y análisis de datos

Para todos los análisis de datos se trabajó el paquete estadístico *R* versión 4.3.2 ([R Core Team, 2024](#)). Después de una cuidadosa revisión y depuración de datos, se dispuso de un total de 68 días de datos para el análisis y la calibración del dispositivo. Se utilizó una prueba *t* para muestras pareadas para comparar las medias entre la F_d observada (lisímetro) y F_d estimada (dispositivo). Además, se utilizaron métricas para evaluar la precisión del sistema de medición del flujo de savia, como el error medio (EM), el error absoluto medio (EAM) y la raíz del error cuadrático medio (REMC), y el índice de Willmott (IW) para determinar hasta qué punto las estimaciones del dispositivo coinciden con los datos observados por el lisímetro de pesaje. Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$EM = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (6)$$

$$EAM = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

$$REMC = \sqrt{n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$IW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (9)$$

Donde, y_i e \hat{y}_i son la F_d observada y estimada, respectivamente, \bar{y} es la F_d observada media, y n el número de observaciones.

La calibración del dispositivo se efectuó mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal simple, y con la ecuación $y_i = b \cdot x_i$, donde y_i representa los valores de F_d de referencia obtenidos del lisímetro de pesaje; x_i , los de F_d con el dispositivo; y el coeficiente b es la pendiente del modelo. Para el ajuste del modelo se utilizó regresión ponderada, la cual asigna pesos variables a cada observación en función de su varianza para mitigar el impacto de la heterocedasticidad (Kutner *et al.*, 2005).

Para evaluar la precisión y la capacidad de generalización del modelo de regresión lineal simple, se empleó validación cruzada. Este proceso implicó ajustar iterativamente el modelo n veces, entrenándolo cada vez con datos de $n - 1$ días y reservando los datos de un día para la validación (Hastie *et al.*, 2009). A partir de la validación cruzada, se obtuvieron la media y los intervalos de confianza para el coeficiente de regresión (b), determinados como los percentiles 2,5 y 97,5 de la distribución del coeficiente.

La media del coeficiente de los modelos obtenidos a través de la validación cruzada, (" b "), sirvió como factor de calibración para ajustar las mediciones del dispositivo para que coincidieran con las del lisímetro de pesaje. Una vez determinado el factor de calibración, se calibró F_d , seguida del recálculo de todas las métricas mencionadas anteriormente.

valuación del dispositivo en campo

El dispositivo desarrollado se probó en condiciones de campo en una plantación forestal de *Gmelina arborea* de 6 años y una densidad de 1333 árboles ha^{-1} en Armero-Guayabal, Tolima (Colombia). El dispositivo fue acondicionado para funcionar con tres baterías de litio NCR18650B de 3400 mAh conectadas en serie (~ 12 V).

La evaluación se efectuó en un árbol de 21,5 cm de diámetro a 1,3 m sobre el suelo y un $A_s = 171,07 \text{ cm}^2$. El periodo de medición incluyó 12 días desde el 17 al 28 de noviembre de 2023. Los valores de Q se convirtieron en transpiración (mm día^{-2}); se dividió Q en la superficie de terreno ocupado por el árbol ($a = 7,5 \text{ m}^2$) (González-García *et al.*, 1995). Estos valores de transpiración fueron comparados con la evapotranspiración potencial (ET_0) del sitio, calculada a partir de datos provenientes de una microestación meteorológica instalada a 200 m, con el método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006).

Resultados

Operación del dispositivo

La figura 3 ilustra el proceso del dispositivo para obtener F_d . Las figuras 3a -3d muestran los aumentos de temperatura promedio después de la aplicación de un pulso de calor, registrados por el dispositivo en diferentes momentos del día (día del año = 229). Las figuras 3a-3d muestran un comportamiento creciente en los aumentos de temperatura hasta alcanzar un máximo entre 25 s y 50 s después de retirar el pulso de calor, y luego disminuir linealmente. El sistema de adquisición de datos permitió la medición de variaciones de temperatura de aproximadamente 0,004 °C.

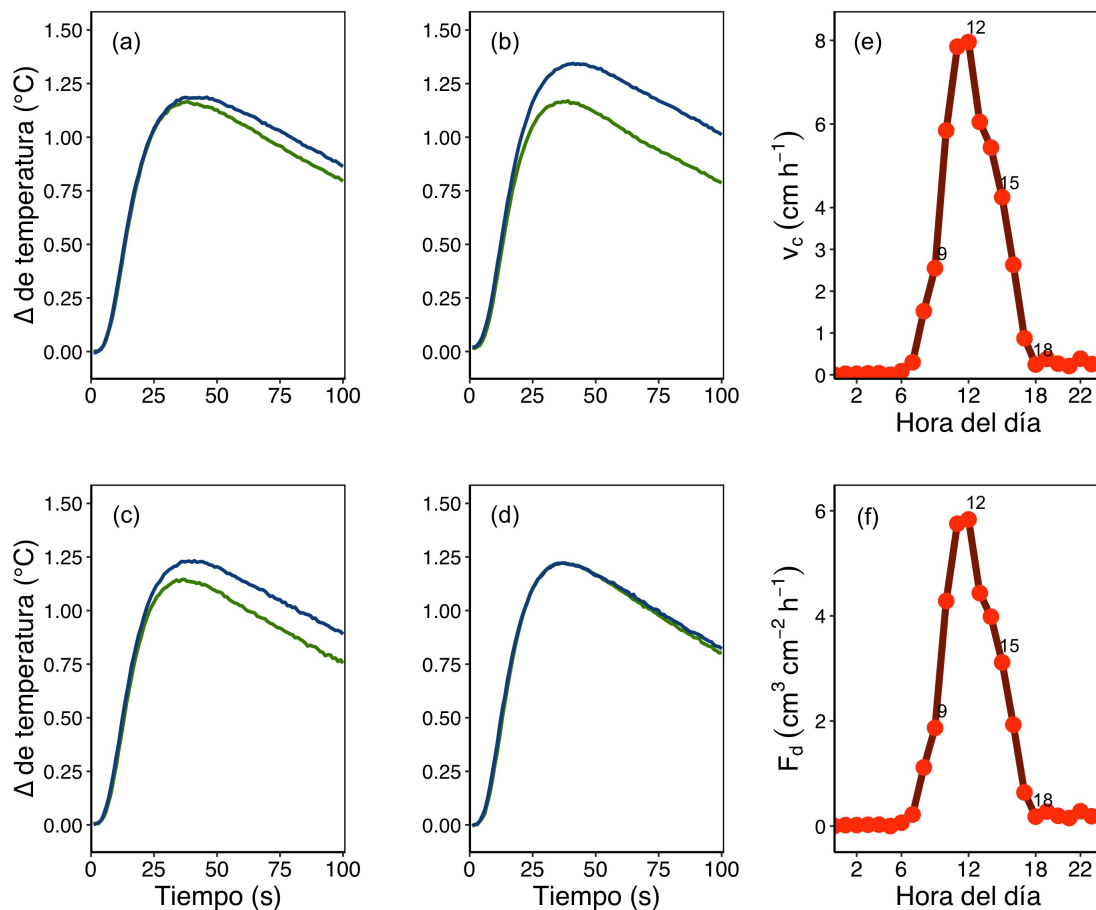


Figura 3. Aumentos de temperatura promedio en las sondas aguas arriba (líneas verdes) y aguas abajo (líneas azules)

Nota: datos después de retirar el pulso de calor medido a las 9 (a), 12 (b), 15 (c) y 18 (d) horas del día del año 229 y v_c (e) y F_d calculada durante el mismo día del año (f).

Los aumentos de temperatura entre 60 s y 80 s sirvieron para calcular las razones de temperatura que posteriormente se convirtieron en v_c , con la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) (figura 3e); y finalmente se convirtieron en F_d con la ecuación (3) (figura 3f). La v_c y F_d tendieron a ser bajas en la madrugada, luego aumentaron a un máximo al mediodía y disminuyeron por la tarde, y en la noche, alcanzaron valores similares a los registrados en la madrugada.

Consumo de energía del dispositivo

La tabla 2 muestra el consumo de energía del dispositivo en distintos componentes de su ciclo de trabajo, medido en miliamperios (mA) durante 33 ciclos. La fase de aplicación del pulso térmico fue la de mayor consumo energético, con un promedio de 536,012 mA y una desviación estándar de 9,801 mA. En contraste, la fase de hibernación presentó el menor consumo, con un promedio de 3,671 mA y una baja variabilidad (desviación estándar de 0,273 mA), lo que indicó un comportamiento estable y eficiente en este estado. Las fases de medición inicial y medición posterior (antes y después del pulso térmico) tuvieron consumos moderados, con valores promedio de 7,736 mA y 8,780 mA respectivamente, lo cual mostró una consistencia razonable en su consumo energético.

El dispositivo presenta un consumo energético promedio de aproximadamente 6,84 mAh, basado en los datos obtenidos de la medición del consumo en distintos componentes de su ciclo de trabajo. Para cada ciclo de trabajo individual, el consumo de energía se estimó en 1,9285 mAh, considerando una duración total de ciclo de trabajo de aproximadamente 1015 s. Esto significó que, en una hora, el dispositivo completó aproximadamente 3,546 ciclos de trabajo. Este ciclo incluyó periodos de medición inicial, pulso térmico, medición posterior e hibernación.

Tabla 2. Consumo de energía por ciclo de trabajo del dispositivo

Componente	Duración (s)	Consumo de energía (mA)	
		Media	Desviación estándar
Medición inicial	10	7,736	0,279
Pulso térmico	5	536,012	9,801
Medición posterior	100	8,780	4,189
Hibernación	900	3,671	0,273

Nota: información generada a partir de la medición de $n = 33$ ciclos de trabajo ejecutados.

Utilizando tres baterías de litio CR18650B conectadas en serie, cada una con una capacidad nominal de 3400 mAh y un voltaje combinado de ~ 12 V, y considerando un consumo promedio

de energía de 6,84 mAh, los cálculos indican que el dispositivo podría operar sin problemas durante aproximadamente 20 días continuos con esta configuración.

Calibración y evaluación del dispositivo en invernadero

La F_d sin calibrar obtenida por el dispositivo demostró ser una estimación confiable de la F_d observada obtenida con el lisímetro. Esto se respalda con las siguientes métricas: EM = - 0,031 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$, EAM = 0,755 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$; REMC = 1,296 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$, y un IW cercano a uno (0,90) (tabla 3). Adicionalmente, una prueba t para muestras pareadas reveló que la F_d estimada (sin calibrar) obtenida a través del dispositivo no fue significativamente diferente ($p > 0,05$) de la F_d medida a través del lisímetro de pesaje (tabla 3).

Los datos de F_d sin calibrar obtenidos de las mediciones en cuatro plantas de *Gmelina arborea* se muestran en la figura 4a junto con la F_d observada. Como se observa, la relación entre las dos variables es lineal, con un $R^2 = 0,791$ (figura 4a). Los datos sugieren que el dispositivo tiende a sobrestimar las F_d máximas (figura 4a). El coeficiente de la línea de regresión que sirve como factor de calibración se determinó como $b = 0,954051$ (intervalo de confianza: 0,946800-0,962952).

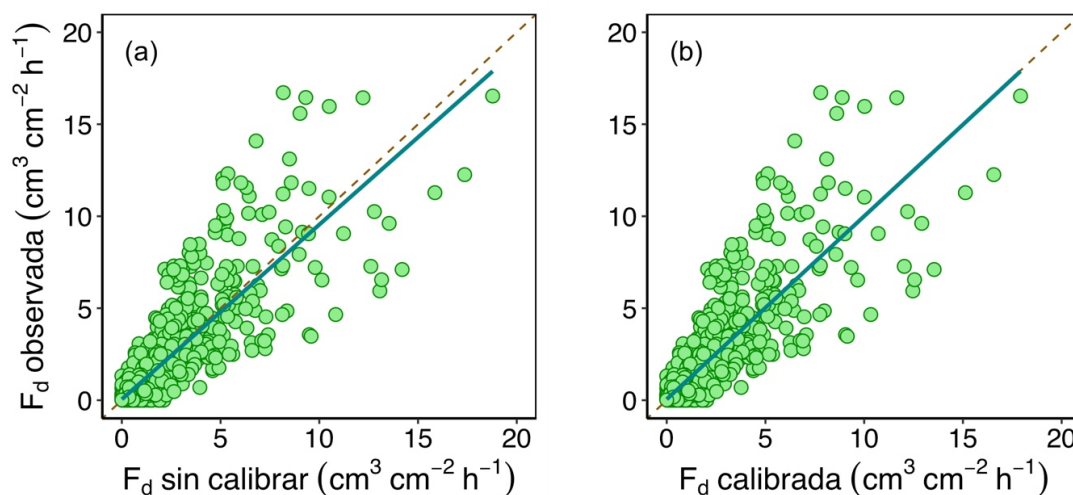


Figura 4. Velocidad del flujo de savia (F_d) observada versus F_d sin calibrar (a) y calibrada (b)

Nota: las líneas discontinuas representan la relación diagonal 1:1, mientras que la línea turquesa representa una línea de regresión ajustada.

La figura 4b muestra la F_d después de aplicar el factor de calibración, lo cual indica una corrección de la tendencia de sobrestimación observada en la figura 4a. Además, corrige el lige-

Tabla 3. Estadísticas de evaluación para la velocidad del flujo de savia (F_d) sin calibrar y calibrada

Estadísticos	Velocidad del flujo de savia (F_d)	
	Sin calibrar	Calibrada
Prueba t pareada (valores t de Student)	0,914 ^{ns}	0,553 ^{ns}
Error medio ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$)	-0,031	0,018
Error absoluto medio ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$)	0,755	0,745
Raíz del error medio cuadrático ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$)	1,296	1,292
Índice de Willmott (IW)	0,900	0,903

Nota: *ns* es no significativo para $\alpha = 0,05$.

ro sesgo ilustrado en la figura 4a, lo que resulta en que la línea de regresión ahora siga de cerca la diagonal 1:1. La aplicación del factor de calibración resultó en mejoras en todas las métricas de evaluación: una reducción del 41,9 % en el EM, una disminución del 1,3 % en el EAM, una reducción del 0,3 % en el REMC y un aumento del 0,3 % en el IW (tabla 3). Estos resultados subrayan la consistencia y correspondencia entre los valores de F_d obtenidos con el dispositivo y los observados con el lisímetro.

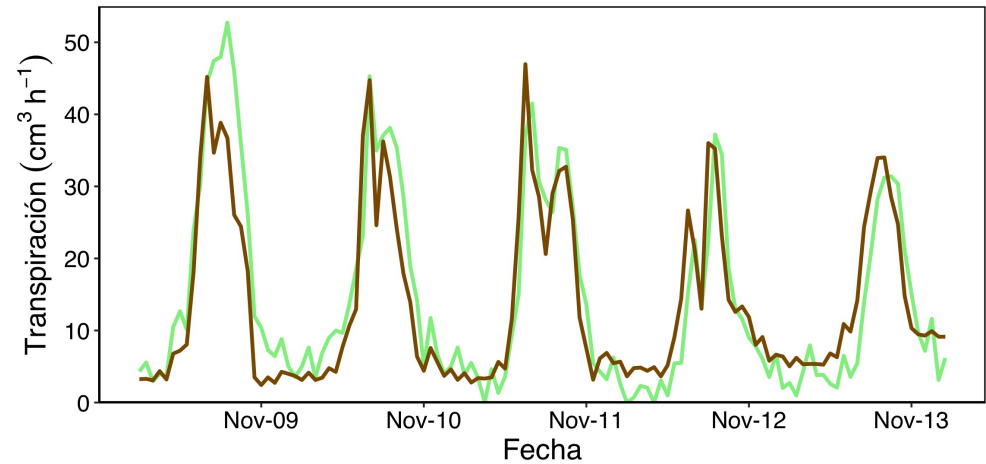


Figura 5. Transpiración observada (línea marrón) y Q medido con el dispositivo (verde claro) para una planta de *Gmelina arborea* medida durante cinco días consecutivos en noviembre de 2023

A partir de los valores calibrados de F_d , se observó que las plantas de *Gmelina arborea* presentaron v_c relativamente bajas con media de $2,25 \text{ cm h}^{-1}$, con un rango amplio de 0 cm h^{-1} a $25,62 \text{ cm h}^{-1}$. De manera similar, la F_d varió de 0 a $18,21 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ con media de $1,58 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$.

Los datos de F_d calibrados se multiplicaron por el A_s de cada planta y se obtuvo el volumen de flujo de savia (Q) (figura 5). En la figura 5 se observa una alta correspondencia entre los valores de transpiración obtenidos mediante el lisímetro y los de Q mediante el dispositivo desarrollado.

Evaluación del dispositivo en campo

La evaluación realizada en campo en un árbol de *Gmelina arborea* durante 12 días mostró una v_c media de $9,38 \text{ cm h}^{-1}$, con valores mínimos y máximos promedio de $1,82 \text{ cm h}^{-1}$ y $23,35 \text{ cm h}^{-1}$, respectivamente. La F_d alcanzó un valor medio de $6,93 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, con un rango promedio entre $1,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $17,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. El volumen de flujo de savia (Q) promedió $1,19 \text{ L h}^{-1}$, con un rango promedio entre $0,23$ y $2,95 \text{ L h}^{-1}$ (figura 6a). Tras sumar estos valores a diario, se encontró que la F_d presentó una media de $166,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con un rango promedio entre $155,89$ y $179,96 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Mientras que Q mostró valores medios de $28,46 \text{ L día}^{-1}$, con un rango promedio entre $26,67 \text{ L día}^{-1}$ y $30,79 \text{ L día}^{-1}$.

Los valores de transpiración diaria variaron entre $2,93 \text{ mm día}^{-1}$ y $3,37 \text{ mm día}^{-1}$, con una media de $3,17 \text{ mm día}^{-1}$. Asimismo, la ET_0 varió entre $3,44 \text{ mm día}^{-1}$ y $3,91 \text{ mm día}^{-1}$, con una media de $3,64 \text{ mm día}^{-1}$ (figura 6b). Como se observa en la figura 6b, existe una alta concordancia entre los valores de transpiración y ET_0 , además, se aprecia que los de transpiración nunca superaron los de ET_0 durante el periodo de medición.

Discusión

El estudio presenta el diseño y evaluación de un dispositivo de bajo costo para monitorear el flujo de savia de especies leñosas, como un equivalente de la transpiración a nivel de planta. Entre los métodos disponibles para cuantificar la transpiración, la medición de las tasas de flujo de savia se ha destacado como un enfoque eficiente para estimar la transpiración del árbol completo y, posteriormente, extrapolarla a todo el bosque (Burgess *et al.*, 2001).

El dispositivo desarrollado presentó un comportamiento estable y apropiado, con la capacidad de detectar las variaciones en temperatura asociadas a las variaciones en los flujos de savia en diferentes momentos del día. El comportamiento de la velocidad del pulso de calor (v_c) concuerda con lo reportado en estudios previos; muestra máximos de v_c al mediodía y valores bajos durante la noche (Dawson *et al.*, 2007). El sistema de adquisición de datos permitió la medición de variaciones de temperatura de aproximadamente $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$. Estudios previos han mostrado que configuraciones de dispositivos de bajo costo son capaces de medir cambios de hasta $0,002 \text{ }^\circ\text{C}$ (Cárdenas *et al.*, 2019; Miner *et al.*, 2017).

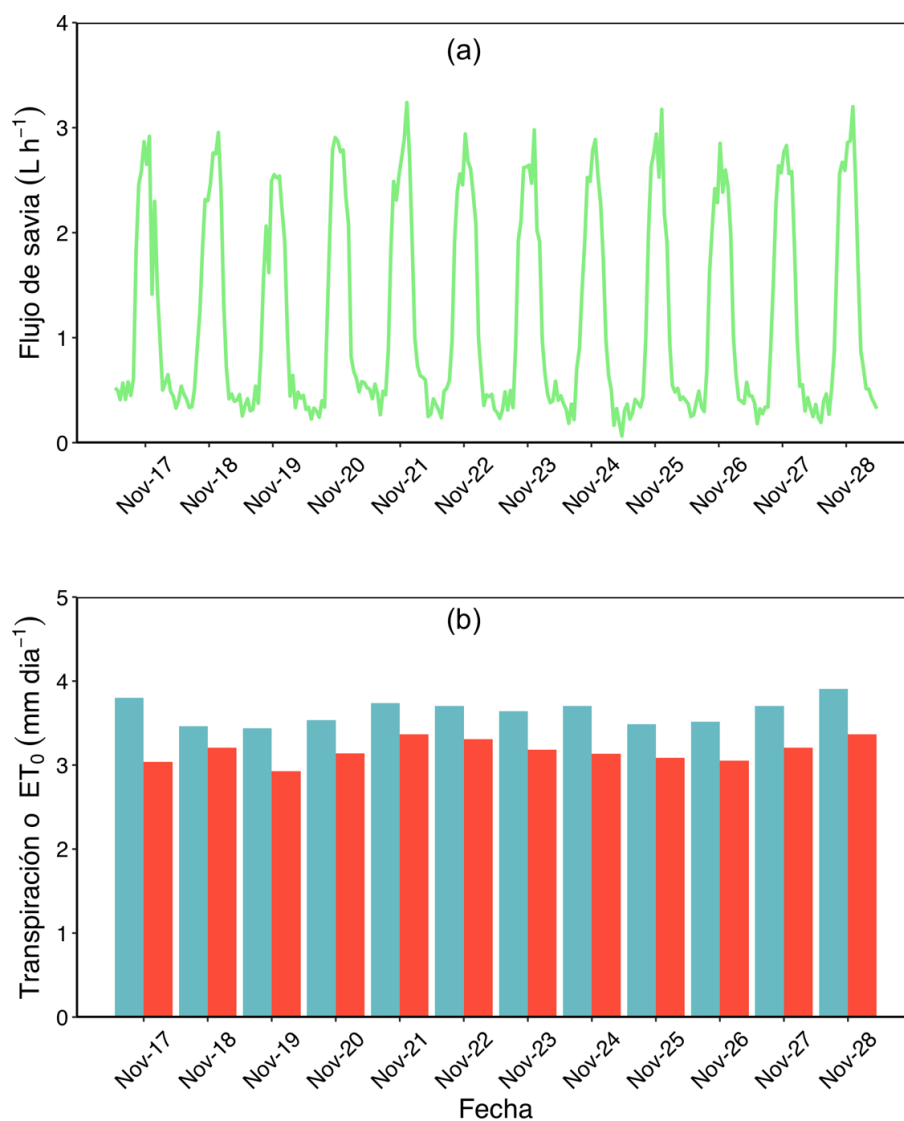


Figura 6. Volumen de flujo de savia diario (Q) (a) y transpiración diaria medida con el dispositivo (barras color rojo) en un árbol de Gmelina arborea (b) y comparación entre la ET_0 diaria (barras color cian)

Nota: determinada por el método de FAO-Penman-Monteith para un periodo de 12 de días en noviembre de 2023.

En términos generales, el dispositivo presenta un bajo consumo de energía promedio de 6,84 mAh; sin embargo, el dispositivo experimenta variaciones significativas en su consumo de energía según la fase del ciclo de trabajo. [Beslity et al. \(2022\)](#) reportaron para un dispositivo basado en Arduino un consumo promedio durante la fase de medición de temperatura de 30 mA, el cual es mayor al reportado en el presente estudio. Asimismo, [Sebastian \(2020\)](#) reporta consumos entre 5,2 mA hasta 94,2 mA para dispositivos Arduino basados en el microprocesador ATmega328, dependiendo de su configuración. Similar a estudios previos, el pulso térmico emerge como el componente con el consumo más alto ([Beslity et al., 2022](#)). El pulso térmico demanda una gran cantidad de energía para poder emitir suficiente calor para que sea detectado por las sondas de temperatura ([Beslity et al., 2022](#); [Gutiérrez et al., 2021](#)). El análisis sugiere que el dispositivo podría funcionar con baterías por espacios de tiempo prologados, dependiendo del tipo de batería utilizada.

El proceso de calibración demostró la fiabilidad del dispositivo desarrollado, mostrando una relación lineal $R^2 = 0,791$ entre los valores de F_d observados en plantas jóvenes de *Gmelina arborea* a través del lisímetro de pesaje y los obtenidos por el dispositivo desarrollado. Estudios previos han reportado R^2 entre 0,54 a 0,92 en la determinación de las tasas de transpiración en especies leñosas, con el método HRM ([Cárdenas et al., 2019](#); [Forster, 2017, 2020](#)). La pendiente del modelo lineal simple estimado sugiere que el dispositivo tiende a sobrestimar los valores de F_d ; sin embargo, la aplicación de un factor de calibración mejoró significativamente la concordancia entre las mediciones del dispositivo y las del lisímetro. Estos hallazgos corroboran estudios previos que han reportado que el método HRM tiende a sobrestimar las tasas de transpiración, para lo cual se requiere de un proceso de calibración adecuado ([Forster, 2017](#)). El empleo de un lisímetro de pesaje mostró ser un método robusto para calibrar las estimaciones del dispositivo, y permitió obtener información importante sobre la precisión y confiabilidad del dispositivo. Esta técnica de evaluación ha sido probada en otras especies, y ha arrojado resultados satisfactorios ([Deng et al., 2021](#); [Forster, 2020](#)).

Según los resultados, los valores de F_d obtenidos mediante el dispositivo desarrollado no registraron diferencias estadísticamente significativas en relación con los F_d medidos directamente por el lisímetro de pesaje. Esta observación subraya la confiabilidad y precisión del sensor de flujo de savia en capturar la dinámica de la transpiración; lo cual valida su utilidad en la medición de la transpiración de las plantas.

El método HRM demostró ser eficiente en la estimación de la F_d de plantas de *Gmelina arborea*. Según estudios, funciona bien en la medición de tasas de transpiración bajas ([Burgess y Dawson, 2004](#); [Burgess et al., 1998](#); [Forster, 2020](#); [Gutiérrez et al., 2021](#)). Generalmente, se asume que el método HRM tiene un límite superior teórico para medir la v_c entre 15 cm h⁻¹ y

54 cm h⁻¹, dependiendo la distancia entre las sondas (Burgess *et al.*, 2001; Forster, 2020; Green *et al.*, 2009). Este método resultó ser el más adecuado para la medición del flujo de savia de *Gmelina arborea*, la cual presentó vc máximas de 25,62 cm h⁻¹, debido a su capacidad para detectar y registrar con precisión los valores bajos de flujo de savia que caracterizan a esta especie.

Los valores de F_d registrados en el estudio obtenidos en plantas jóvenes y un árbol adulto de *Gmelina arborea* son similares a los reportados para la especie creciendo en plantaciones en Panamá y Filipinas, pero medidas utilizando el método de disipación de calor (Dierick y Hölscher, 2009; Kunert *et al.*, 2010). Los autores registraron F_d máximas de 20 cm³ cm⁻² h⁻¹ para plantaciones en Panamá y de 17,1 cm³ cm⁻² h⁻¹ en Filipinas, muy similares a las reportadas en el presente estudio, 18,21 cm³ cm⁻² h⁻¹ y 17,26 cm³ cm⁻² h⁻¹ en plantas jóvenes de un año de edad y en un árbol adulto de 6 años, respectivamente. Este resultado confirma la confiabilidad del dispositivo para registrar las variaciones en el flujo de savia en árboles de diferentes edades y condiciones ambientales.

La consistencia entre la transpiración medida y la evapotranspiración potencial calculada, respaldada por estudios previos (Miner *et al.*, 2017), demuestra la precisión del sistema desarrollado. Este hallazgo evidencia la relación esperada entre la transpiración y la evapotranspiración potencial, ambas influenciadas por factores ambientales compartidos como temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor, radiación solar y velocidad del viento (Zeppel *et al.*, 2004).

Estudios previos han expuesto que la densidad y el contenido de humedad de la madera pueden afectar la conductividad hidráulica de la planta y, consecuentemente, las tasas de transpiración (Ferdous *et al.*, 2023; Looker *et al.*, 2016; Markesteijn *et al.*, 2011). La densidad básica media observada, 460,61 kg m⁻³, se encuentra dentro del rango de 428 a 482 kg m⁻³ y de 338,2 a 534,7 kg m⁻³ reportados en estudios genéticos para la especie en Colombia (López-Aguirre y Barrios-Trilleras, 2023; López-Aguirre *et al.*, 2024). Así mismo, el contenido de humedad promedio de la madera fresca de *Gmelina arborea* fue de 1,288 kg kg⁻¹, muy similar al encontrado por González-Lozano y López-Rozo (2021) para la especie en Colombia, quienes reportaron una media de 1,3281 kg kg⁻¹ con un rango de 0,7277 kg kg⁻¹ a 2,0083 kg kg⁻¹. Estudios previos con otras especies han mostrado que el contenido de humedad puede oscilar desde un mínimo del 30 % (0,3 kg kg⁻¹) hasta más del 200 % (2,0 kg kg⁻¹) (Glass y Zelinka, 2010).

El dispositivo generó información a muy bajo costo sobre los requerimientos hídricos de especies forestales, lo que es de gran utilidad para guiar decisiones de manejo forestal y silvicultura, especialmente en el contexto de un clima cambiante. Contar con herramientas precisas es fundamental para adquirir una comprensión más profunda de la transpiración en los bos-

ques y su relación con los factores climáticos que la controlan.

No obstante, una posible limitación de este estudio podría ser la falta de evaluación del desempeño del dispositivo en un rango más amplio de especies y de condiciones ambientales. Aunque la prueba en campo ofreció resultados satisfactorios, sería relevante llevar a cabo pruebas adicionales en diversas especies y entornos climáticos para ampliar la validez del dispositivo en condiciones de campo.

Conclusiones

El dispositivo de bajo costo diseñado y evaluado para monitorear el flujo de savia en especies leñosas demostró un comportamiento estable y adecuado. Pudo detectar con precisión las variaciones de temperatura asociadas al flujo de savia, como se evidenció en las mediciones realizadas durante diferentes momentos del día. La capacidad del sistema de adquisición de datos para medir variaciones de temperatura mínimas, hasta 0,004 °C, fue esencial para su efectividad. Además, el análisis del consumo de energía reveló su eficiencia energética, con un bajo consumo promedio de 6,84 mAh. Aunque experimentó variaciones significativas durante el ciclo de trabajo, con el pulso térmico como el componente de mayor demanda energética, su funcionamiento global respaldó su viabilidad para operar durante periodos prolongados usando baterías.

El proceso de calibración, a partir de mediciones obtenidas mediante un lisímetro de pesaje como referencia, validó la precisión del dispositivo en la estimación del flujo de savia. La prueba exitosa del dispositivo en una plantación forestal, en un árbol de *Gmelina arborea*, complementó la validez de su aplicación en condiciones reales de campo. La consistencia entre las mediciones en invernadero y en campo respaldó su utilidad en el monitoreo de especies forestales en diferentes contextos ambientales.

El dispositivo desarrollado constituye una herramienta económica y precisa para medir el flujo de savia en especies forestales, diseñado para ser accesible a la comunidad científica, académica y gestores de recursos naturales. Su diseño, códigos y manual estarán disponibles de forma abierta para facilitar su replicación, ajuste y mejora. Se sugiere probarlo en más especies y entornos para ampliar su aplicabilidad y robustez en la investigación y gestión forestal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por el apoyo financiero otorgado para desarrollar la investigación a través

del proyecto n.º 380120. También agradecen el apoyo ofrecido por el grupo de investigación Madera & Bosques de la Universidad del Tolima.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8802ddc9-86b6-4f13-96b7-4871dd3aee65/content>
- Arduino. (s. f.). *Arduino IDE (versión 2.1.1)*. <https://www.arduino.cc/en/software>
- American Society for Testing y Materials (ASTM). (2017). D-2395-17: *Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials*. <https://doi.org/10.1520/D2395-17>
- Barrios-Trilleras, A., López-Aguirre, A. M. y Báez-Aparicio, C. A. (2021). Modelamiento de la productividad de Gmelina arborea Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colombia Forestal*, 24(1), 71-87. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15345>
- Beslity, J., Shaw, S. B., Drake, J. E., Fridley, J., Stella, J. C., Stark, J. y Singh, K. (2022). A low cost, low power sap flux device for distributed and intensive monitoring of tree transpiration. *HardwareX*, 12, e00351. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00351>
- Bhattacharya, A. (2019). *Changing climate and resource use efficiency in plants*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04681-5>
- Burgess, S. S. O. y Dawson, T. E. (2004). The contribution of fog to the water relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): Foliar uptake and prevention of dehydration. *Plant, Cell & Environment*, 27, 1023-1034. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01207.x>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A. y Bleby, T. M. (2000). Measurement of sap flow in roots of woody plants: A commentary. *Tree Physiology*, 20(13), 909-913. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.909>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. y Chin, K. O. (1998). The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115, 306-311. <https://doi.org/10.1007/s004420050521>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H. y Bleby, T. M. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21, 589-498. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.589>

- Cárdenas, M. F., López-Ramírez, C., Mejía, J. D. y Escobar, J. F. (2019). Design and implementation of a low-cost device for measuring sap flow in woody species. *DYNA*, 86(208), 214-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.72039>
- Dawson, T. E., Burgess, S. S. O., Tu, K. P., Oliveira, R. S., Santiago, L. S., Fisher, J. B., Simonin, K. A. y Ambrose, A. R. (2007). Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. *Tree Physiology*, 27(4), 561-575. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.4.561>
- Deng, Z., Vice, H. K., Gilbert, M. E., Adams, M. A. y Buckley, T. N. (2021). A double-ratio method to measure fast, slow and reverse sap flows. *Tree Physiology*, 41(12), 2438-2453. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab081>
- Dierick, D. y Hölscher, D. (2009). Species-specific tree water use characteristics in reforestation stands in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1317-1326. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.003>
- EasyEDA. (2023). *EasyEDA*, versión 6.4.19. <https://easyeda.com>
- Ehsani, R., Alizadeh, A. y Kadyampakeni, D. (2017). Monitoring tree health using water-uptake rate. [https://crec.ifas.ufl.edu/media/crecifasufledu/new-site/documents/research/Monitoring-tree-health-using-water-uptake-rate-\(July\)-.pdf](https://crec.ifas.ufl.edu/media/crecifasufledu/new-site/documents/research/Monitoring-tree-health-using-water-uptake-rate-(July)-.pdf)
- Ferdous, J., Islam, M. y Rahma, M. (2023). The role of tree size, wood anatomical and leaf stomatal traits in shaping tree hydraulic efficiency and safety in a South Asian tropical moist forest. *Global Ecology and Conservation*, 43, e02453. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02453>
- Forster, M. A. (2017). How reliable are heat pulse velocity methods for estimating tree transpiration? *Forests*, 8(9), 350. <https://doi.org/10.3390/f8090350>
- Forster, M. A. (2020). The importance of conduction versus convection in heat pulse sap flow methods. *Tree Physiology*, 40(5), 683-694. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa009>
- Giménez, C., Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2013). Plant-water relations. En M. J. Shinderman (ed.), *Reference module in earth systems and environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05257-X>
- Glass, S. y Zelinka, S. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. En R. Ross (ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 4-1-4-19). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/37428>

- González-García, M. A., Paz-González, A. y Castelao-Gegunde, A. (1995). La medida térmica del flujo de savia aplicada al estudio de la extracción de agua por los árboles: revisión bibliográfica y puesta a punto del método. *Forest Systems*, 4(2), 205-220. https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/download/547/544/&ved=2ahUKEwib7NT3tKGGAxWaSzABHcYuC5UQFnoECA4QAusg=AOvVaw1LSJg7Eymd9fmiV_7-zzoH
- González-Lozano, L. F. y López-Rozo, J. D. (2021). *Evaluación de la variabilidad genética de la densidad básica y el módulo de elasticidad entre 40 familias de polinización abierta de Gmelina arborea Roxb. en condiciones medioambientales del Alto Magdalena* [Tesis de pregrado]. Universidad del Tolima.
- Granier, A. y Gross, P. (1987). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, 44(1), 1-14. <https://doi.org/10.1051/forest:19870101>
- Green, S., Clothier, B. y Perie, E. (2009). A re-analysis of heat pulse theory across a wide range of sap flows. *Acta Horticulturae*, 846, 95-104. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.846.8>
- Gutiérrez, J., Pypker, T., Licata, J., Burgess, S. S. O. y Asbjornse, H. (2021). Maximum heat ratio: Bi-directional method for fast and slow sap flow measurements. *Plant and Soil*, 469, 503-523. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05066-w>
- Hakamada, R. E., Hubbard, R. M., Moreira, G. G., Stape, J. L., Campoe, O. y Ferraz, S. F. B. (2020). Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 466, 118125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118125>
- Hastie, T., Tibshirani, R. y Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. (2.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Hatton, T. (1990). Integration of sap flow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology*, 6(2), 201-209. <https://doi.org/10.1093/treephys/6.2.201>
- Howell, T. A. (2005). Lysimetry. En D. Hillel (ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 379-386). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00391-X>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Kunert, N., Schwendenmann, L. y Hölscher, D. (2010). Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in Panamanian forest plantations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 150(3), 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.006>

- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. y Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. (5.^a ed.). McGraw-Hill Education. https://users.stat.ufl.edu/~winner/sta4211/ALSM_5Ed_Kutner.pdf
- Looker, N., Martin, J., Jencso, K. y Hu, J. (2016). Contribution of sapwood traits to uncertainty in conifer sap flow as estimated with the heat-ratio method. *Agriculture and Forest Meteorology*, 223, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.014>
- Lopez-Aguirre, A. M. y Barrios-Trilleras, A. (2023). Variación genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *Gmelina arborea* Roxb. en el alto Magdalena, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184), 641-653. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1878>
- López-Aguirre, A., Barrios-Trilleras, A. y Melo-Cruz, O. (2024). Balancing wood production and water use efficiency in the selection of open-pollinated families of *Gmelina arborea*. *New Forests*, 55, 961-978. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-10013-x>
- Markesteyn, L., Poorter, L., Bongers, F., Paz, H. y Sack, L. (2011). Hydraulics and life history of tropical dry forest tree species: Coordination of species' drought and shade tolerance. *New Phytologist*, 191(2), 480-495. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03708.x>
- Marshall, D. C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385-396. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J. y Ribas-Carbó, M. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Meissner, R., Rupp, H., Seeger, J., Ollesch, G. y Gee, G. W. (2010). A comparison of water flux measurements: Passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science*, 61(4), 609-621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01255.x>
- Miner, G. L., Ham, J. M. y Kluitenberg, G. J. (2017). A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D printed sensor bodies and low-cost electronics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246(4), 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.012>
- Quiñonez-Piñón, M. R. y Valeo, C. (2017). Allometry of sapwood depth in five boreal trees. *Forests*, 8(11), 457. <https://doi.org/10.3390/f8110457>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. <https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>

- Sebastian, S. (2020). A survey about power consumption for Arduino. *Carpathian Journal of Electrical Engineering*, 14(1), 105-109. <http://cee.cunbm.utcluj.ro/wp-content/uploads/CJEE20209.pdf>
- Steinhart, J. S. y Hart, S. R. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Research*, 15(4), 497-503. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90057-0)
- Suárez, J. C., Casanoves, F., Bieng, M. A. N., Melgarejo, L. M., Di Rienzo, J. A. y Armas, C. (2021). Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 11, 10512. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89876-z>
- Valverde, J. C., Méndez, D. y Arias, D. (2020). Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones controladas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 214-226. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1030>
- Vandegehuchte, M. W. y Steppe, K. (2013). Sap-flux density measurement methods: Working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, 40(3), 213-223. <https://doi.org/10.1071/FP12233>
- Zeppel, M. J. B., Murray, B. R., Barton, C. y Eamus, D. (2004). Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Functional Plant Biology*, 31(5), 461-470. <https://doi.org/10.1071/FP03220>

