

Sistema híbrido para el cálculo del balance hídrico en palma de aceite: aplicación distribuida con procesamiento en nube y acceso local

Osmar R. Barrera Agudelo¹, Andrea Zabala-Quimbayo¹, Tulia E. Delgado², Arley D. Zapata², Greydy S. Ladino², José J. Monroy³, Carlos R. Bojacá Aldana¹, Nólver A. Arias²

¹Área de Geomática, Programa Agronomía, autor para correspondencia: obarrera@cenipalma.org

²Área de Suelos y Aguas, Programa Agronomía, ³Unidad de Campos Experimentales, Campo Experimental Palmar de la Sierra, Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma.

Introducción

La gestión eficiente del agua es un pilar estratégico para la sostenibilidad de los territorios (IDEAM, 2023) y un factor clave para mejorar la productividad de las plantaciones de palma de aceite, especialmente, en un contexto de creciente variabilidad climática y escasez hídrica. Esto requiere la adopción de esquemas y prácticas de sostenibilidad ambiental que garanticen la conservación y el uso eficiente de los recursos en el desarrollo de estos cultivos (Fedepalma *et al.*, 2003). En este sentido, optimizar el manejo del riego no solo reduce costos, sino que también mejora la rentabilidad. El balance hídrico es esencial en la gestión del riego; sin embargo, su precisa estimación considerando las particularidades de cada plantación, sigue siendo un desafío clave para la sostenibilidad y eficiencia del sector.

Para responder a esta necesidad, Cenipalma ha construido una herramienta informática a partir del desarrollo de un modelo de balance hídrico ajustado a las condiciones del cultivo de palma de aceite en Colombia (Delgado *et al.*, 2025). Esta herramienta incluye todos los parámetros climáticos, de suelo y de cultivo necesarios para un adecuado manejo del riego (Figura 1), y se caracteriza por ser práctica y de fácil uso para los palmicultores.

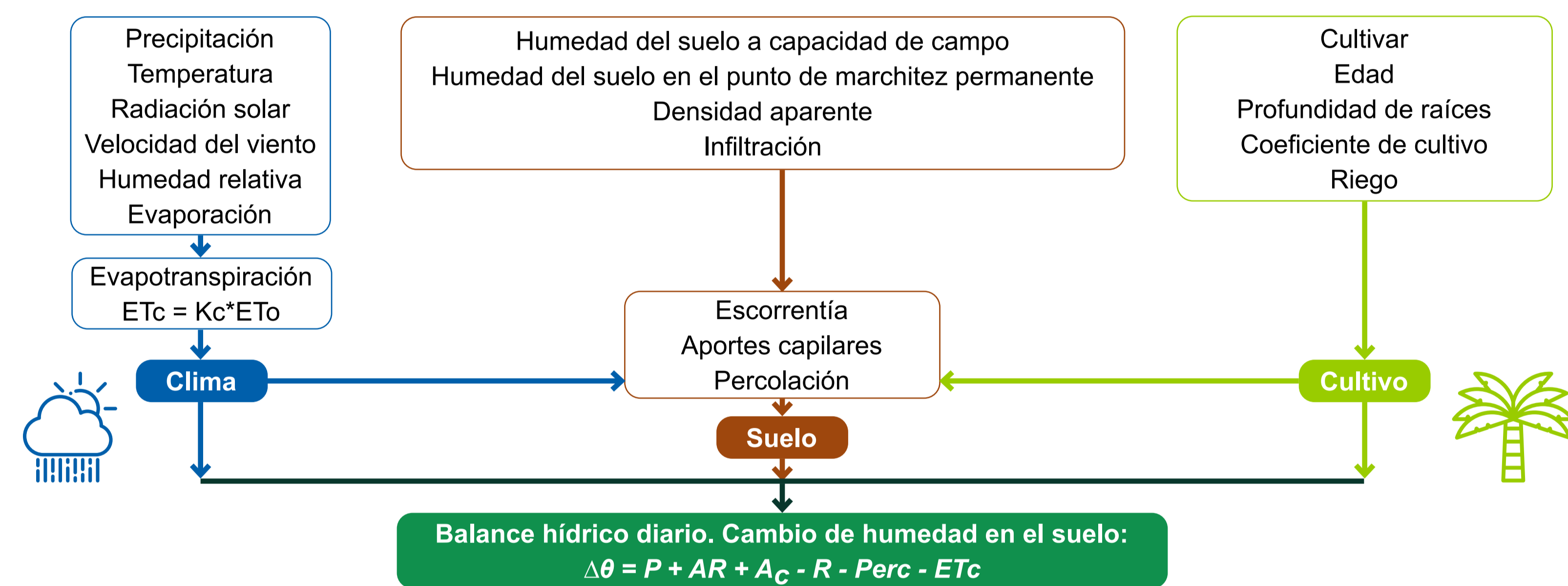


Figura 1. Parámetros de clima, suelo y cultivo considerados en el balance hídrico.

Esta herramienta informática está implementada como una plantilla en Microsoft Excel, que integra una interfaz intuitiva con un motor de cálculo avanzado en Python. Su diseño permite gestionar datos claves para definir cuándo y cuánto regar. Genera automáticamente tablas dinámicas y gráficos ilustrativos para facilitar la interpretación de los resultados. De este modo, los palmicultores pueden estimar la lámina de agua disponible del suelo en sus predios para definir los momentos oportunos de riego, optimizando la gestión del agua y promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

Desarrollo

El cálculo del balance hídrico se realiza mediante una conexión segura con una aplicación alojada en un servidor en la nube, desarrollada en Python. A partir de los datos ingresados en las hojas de entrada (Unidad Espacial, Clima y Riego), la herramienta procesa y configura los conjuntos de datos, presentando los resultados de manera visual en la hoja *dashboard* mediante gráficos y tablas dinámicas para facilitar su interpretación (Figura 2).

Unidad espacial: datos de manejo del cultivo asociados al riego (año de siembra, propiedades hidrodinámicas del suelo, sistema de riego, coordenadas).

Clima: variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, evaporación).

Riego: características según método de riego, eficiencia, lámina o tiempo de riego.

Desde el archivo Excel del usuario se realiza un llamado a la aplicación en línea, se envían los datos en un formato de intercambio, luego son procesados y se calculan los diferentes indicadores del balance hídrico para posteriormente ser devueltos en forma de resultados estructurados. Este enfoque garantiza flexibilidad, escalabilidad y permite la integración con otras plataformas digitales.

Dashboard: gráfico del balance hídrico, déficit acumulado y tabla de resultados consolidados para todas las unidades espaciales.

Se considera una aplicación distribuida, ya que se ejecuta en múltiples sistemas informáticos, y también híbrida, al permitir su uso desde diferentes herramientas de *software* (Microsoft Excel, Google Spreadsheets y QGIS). El procesamiento y los cálculos avanzados se realizan en la nube, lo que permite una ejecución eficiente sin requerir grandes recursos computacionales en el dispositivo del usuario.

Implementación

La herramienta facilita el análisis del balance hídrico por unidad espacial. Su interfaz incluye filtros que permiten seleccionar una o varias unidades, además de gráficos y tablas dinámicas para visualizar los datos de manera clara. También cuenta con botones de navegación rápida que facilitan el desplazamiento entre los distintos elementos del tablero de control.

Al estar basada en Excel, una herramienta ampliamente conocida y utilizada para el manejo de datos, se facilita el diligenciamiento de las tablas base y la copia de los resultados.

- El gráfico del balance hídrico permite visualizar la lámina de agua disponible en el suelo, los excesos y déficit de humedad. También incluye los aportes por precipitación y riego.
- Tabla de resultados consolidados de todas las unidades espaciales, que incluye indicadores como la precipitación efectiva, escorrentía, evapotranspiración, número de días con déficit y con exceso, y lámina de riego requerido, agrupados para cada unidad espacial (Figura 3).



Figura 2. Proceso de datos desde Excel a la nube y de vuelta hasta el Dashboard.

Ventajas de la aplicación

Precisión: cálculos ajustados a la etapa fenológica del cultivo, características del suelo, métodos de riego y variables meteorológicas locales.

Toma de decisiones basadas en datos: indicadores claros para programación de riegos y mantenimiento de drenajes.

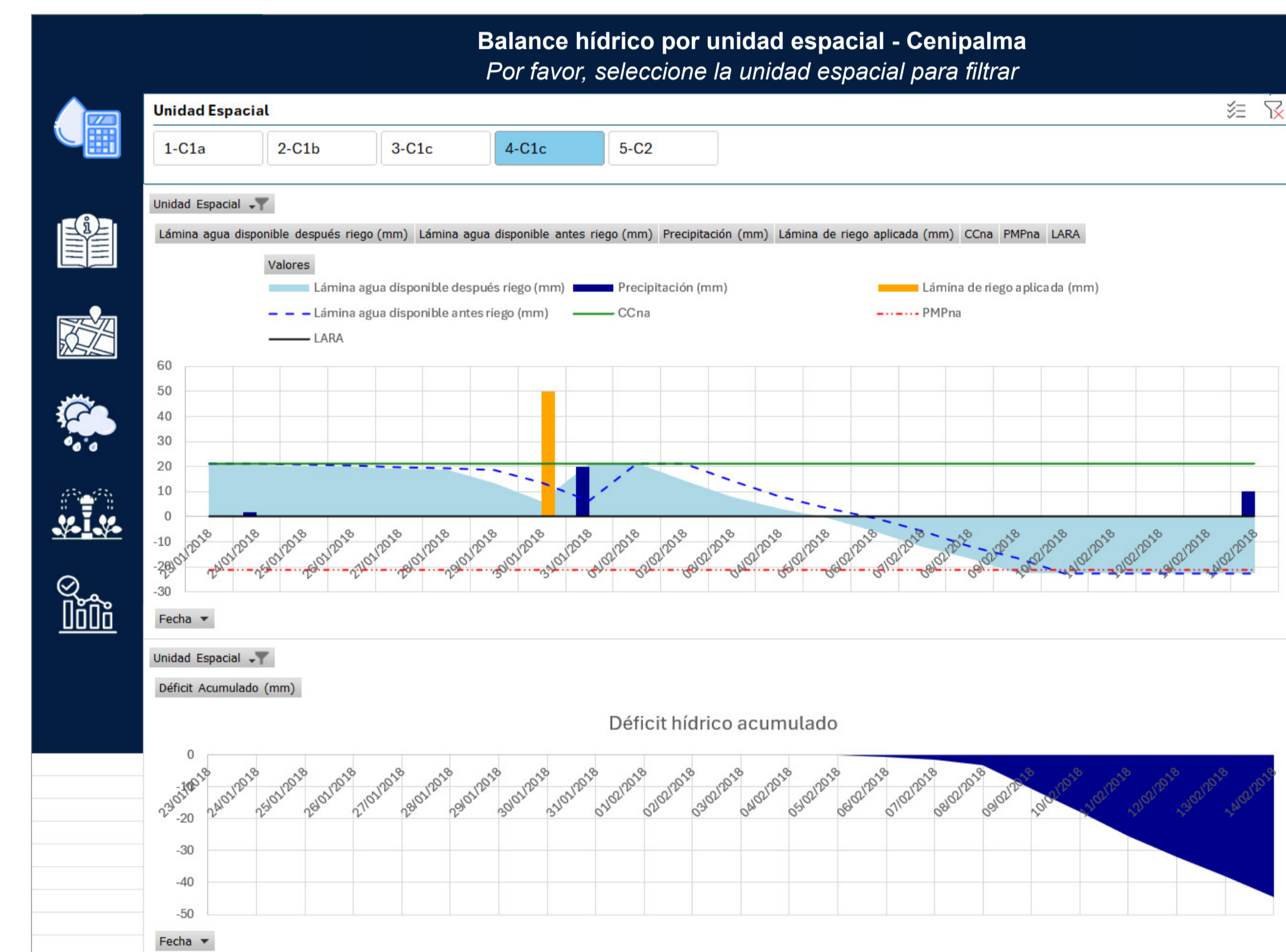


Figura 3. Tablero Dashboard con el gráfico de balance hídrico resultado del ejercicio.

Conclusiones

La arquitectura cliente-servidor implementada en esta herramienta permite mantener un modelo centralizado del balance hídrico para palma de aceite, garantizando que todos los usuarios accedan a las mismas actualizaciones sin redistribuir el *software*, lo que mejora la consistencia en los cálculos y la precisión en las recomendaciones de riego.

Este enfoque, que integra Excel-VBA con procesamiento en la nube, establece un modelo replicable para otras aplicaciones agrícolas, donde la sincronización de información y la actualización en tiempo real son fundamentales para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la toma de decisiones en campo.

Referencias bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0).
- Delgado, T., Zapata, A., Ladino, G., Monroy, J., Barrera, O., Arias, N. (Septiembre 2025). Desarrollo de un modelo de balance hídrico para el cultivo de la palma de aceite en Colombia. XXI Conferencia internacional sobre palma de aceite. Cartagena, Colombia.
- Fedepalma, Cenipalma, Instituto Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fondo para el Medio Ambiente Mundial de Naciones Unidas, Banco Interamericano de Desarrollo-BID. (2003). Síntesis del Proyecto GEF – Conservación de la Biodiversidad en las Zonas de Cultivos de Palma. Bogotá: Fedepalma.
- IDEAM. (2023). Estudio nacional del agua 2022. 464 pp. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, por financiar esta investigación.