

Ciencia e Ingeniería

Revista Interdisciplinaria de Estudios en Ciencias

Básicas e Ingenierías

ISSN 2389-9484

Año 2025, julio-diciembre, Vol. 12, N.º 2, e15708776

Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.

Universidad de La Guajira

La Guajira, Riohacha, Colombia

<http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>

Este documento fue depositado en Zenodo. DOI:

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.15708775>

Para cita prefiera el ARK:

<https://n2t.net/ark:/60540/15708776>

TECNOLOGÍAS EMERGENTES BASADAS EN ÓPTICA VEGETAL PARA DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL AGRÍCOLA

Emerging Technologies Based on Plant Optics for Nutritional Diagnosis in Agriculture

Karen S. Ospino Villalba<https://orcid.org/0000-0002-8728-141X>ingenierakov@gmail.comUniversidad Popular del Cesar, Valledupar,
Colombia**RESUMEN**

En la nota se muestra la experiencia de desarrollo de un dispositivo portátil de bajo costo, denominado *Clorofilo*, para la estimación relativa de clorofila en hojas de plantas mediante sensores de luz ambiental de teléfonos inteligentes. Este instrumento, basado en tecnologías abiertas y fabricación aditiva, demostró capacidad para diferenciar niveles relativos de clorofila, con potencial aplicación en agricultura de precisión. Aunque su funcionalidad inicial es prometedora, se identificaron desafíos asociados con la calibración, variabilidad de sensores, durabilidad y validación en campo. El dispositivo promueve la democratización tecnológica en contextos rurales y de bajos recursos, abriendo posibilidades para el monitoreo no destructivo del estado nutricional vegetal.

Palabras clave: estimación de clorofila, agricultura de precisión, tecnología de bajo costo.

ABSTRACT

This note presents the development experience of a low-cost portable device called *Clorofilo*, designed to estimate relative chlorophyll content in plant leaves using ambient light sensors from smartphones. The instrument, built with open-source technologies and additive manufacturing, showed the ability to distinguish relative chlorophyll levels, suggesting potential use in precision agriculture. While its initial functionality is promising, challenges were identified related to calibration, sensor variability, durability, and field validation. The device supports technological democratization in rural and low-resource settings, offering new possibilities for non-destructive monitoring of plant nutritional status.

Keywords: chlorophyll estimation, precision agriculture, low-cost technology.

Recibido: 02-03-2025

Aceptado: 27-05-2025

Publicado: 01-07-2025



INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas de bajo costo para la estimación de clorofila es hoy en día una necesidad debido al cada vez más pronunciado interés por el monitoreo fisiológico no destructivo en plantas. El contexto de esta tendencia es el auge de la agricultura de precisión, conservación y el seguimiento ecológico. La concentración de clorofila en las hojas se asocia con el estado nutricional de la planta, principalmente con el contenido de nitrógeno, el cual a su vez está relacionado con el crecimiento y el rendimiento fotosintético (Carmona Rojas et al., 2022). Esto ha permitido que los sistemas portátiles con los cuales se pueden obtener estimaciones rápidas de clorofila se convirtieran en una herramienta fundamental para investigadores, técnicos y productores.

Sin embargo, el alto costo de los instrumentos comerciales (Amigo y Grassi, 2020), como el SPAD 502 (Konica Minolta), el Dualox (Force-A) o el CCM-200 (Opti-Sciences), limita su uso generalizado, en particular, para las aplicaciones en países en vía de desarrollo y entre productores agrícolas de pequeña escala. Es aquí, donde, el desarrollo de dispositivos alternativos, accesibles y basados en tecnologías abiertas ha cobrado importancia como estrategia para democratizar el acceso a la tecnología y fomentar la agricultura sostenible. Para mejorar el acceso a estas tecnologías agrícolas avanzadas se deben producir y ajustar localmente estos sistemas, tomando como base la experiencia acumulada regionalmente o en lugares con economías más desarrolladas (Khanal et al., 2017), pero adoptando modelos de código abierto y desarrollo instrumentación local, que aceleren el acceso libre a herramientas tecnológicas por los sectores más vulnerables.

Varios estudios han reportado el diseño de sistemas de bajo costo basados en microcontroladores, sensores ópticos y carcasas impresas en 3D, que permiten estimar el contenido de clorofila mediante el análisis del color de las hojas o mediante la reflexión y transmisión de luz en bandas específicas del espectro visible (Padilla, F. M; et al., 2018, Uddling et al., 2007, Van Den Berg et al; 2004, Ospino-Villalba et al., 2024). Estos sistemas han mostrado correlaciones aceptables con mediciones obtenidas por dispositivos comerciales, especialmente bajo condiciones controladas. No obstante, persisten desafíos importantes relacionados con la calibración, la variabilidad ambiental, la precisión espectral y la validación en condiciones de campo (Brown, L et al; 2022).

Los efectos fisiológicos que ocurren en la relación entre la absorción de luz y la distribución intracelular de los cloroplastos, limitan el análisis de deficiencias nutricionales en las plantas y la toma de decisiones inmediatas basadas en características como la absorción de luz (Davis et al., 2011; Pavlovic et al., 2014) y por tanto el uso efectivo y ágil de los dispositivos de medición portable. Un ejemplo de estas limitaciones es la posible subestimación de la concentración de clorofila debido al efecto tamiz, donde la luz incidente atraviesa el tejido de la hoja sin encontrar un absorbente; o la sobrestimación de la concentración de clorofila debido al efecto desvío, causado por la reflectancia de la hoja en la longitud de onda de referencia del NIR (que suele ser alrededor de 900 nm en medidores de clorofila portátiles), la cual es mayor que la reflectancia de la hoja en la longitud de onda de absorción de la clorofila (650 nm) (Xiong et al., 2015). La distribución intracelular de los cloroplastos puede responder a cambios lumínicos ambientales de dos maneras básicas: la posición frontal o diastrophe, inducida por luz débil, que provoca una baja transmitancia de luz y una alta absorbancia; y la posición de perfil o parastrophe, inducida por luz intensa, donde los cloroplastos se encuentran en las paredes paralelas a la dirección de la luz, lo que ocasiona una alta transmitancia de luz y una baja absorbancia. Se cree que esta última posición protege a los cloroplastos de los efectos dañinos la

luz a intensidades excesivamente altas (Tholen et al., 2008). Así es como todas esas condiciones de los cloroplastos podrían afectar mediciones basadas en paso o reflexión de bandas específicas de luz.

El enfoque de la experiencia que se presenta en esta oportunidad, pasa por la comprensión de herramientas promisorias para análisis de nutrientes de plantas en campo, con base en sus propiedades ópticas, que contribuyen significativamente al desarrollo de plataformas analíticas abiertas que pueden estimular el desarrollo local de instrumentos para análisis científico y técnico en el sector agropecuario en Colombia. Aquí se analiza un desarrollo instrumental emergente de código abierto para el diagnóstico del estado nutricional de cultivos que consiste en un accesorio impreso en 3D compatible con teléfonos inteligentes equipados con sensor de luz ambiental, que puede estimar la concentración relativa de clorofila (Ospino Villalba, K., 2024), de manera análoga al medidor SPAD-502 de Minolta o al método espectrofotométrico tradicional de laboratorio (Barnes et al., 1992).

1. EXPERIENCIA DE DISEÑO PARA ESTIMAR CLOROFILA EN PLANTAS: INICIATIVA DE BAJO COSTO CON PROYECCIÓN

En el grupo de investigación Sistemas Simbióticos de La Universidad nacional de Colombia- Sede Medellín se desarrolló un dispositivo óptico portátil basado en principios de transmisión de luz para la estimación de clorofila, de bajo costo, llamado: “*Clorofilo*”. Se analizó su funcionalidad, la consistencia de sus lecturas y aspectos que se deben perfeccionar. En el desarrollo se han identificado tres factores operativos desafiantes del instrumento, como son su dependencia del sensor de luz de teléfonos inteligentes, la necesidad de calibración de sus lecturas si se desea estimar concentraciones precisas de clorofila y finalmente, las necesidades de refinamiento del diseño.

1.1 Variaciones en las mediciones relativas con “*Clorofilo*”

Clorofilo puede presentar variaciones en las mediciones relativas de clorofila en términos de lecturas de “cLux” (lux de clorofila, nombre asignado a la lectura registrada), atribuidas a diferencias en la intensidad y amplitud de la respuesta espectral de los sensores de luz ambiental de los teléfonos inteligentes. Sin embargo, es posible la comparación de las lecturas de clorofila relativa en hojas de plantas entre dispositivos soportados en diferentes teléfonos. Esto se sustenta en la respuesta lineal de las relaciones matemáticas obtenidas a partir de mediciones del sensor de luz ambiental TMD2772/TMD2772WA (Samsung Note™ phone) ó APDS-9930 (Sony™ Xperia T2 Ultra phone) comparadas con las lecturas de un espectrómetro de laboratorio FLAME™ (Ocean Insight).

Un segundo aspecto operativo, que puede ser restrictivo, es que las lecturas de transmisión de luz roja de *Clorofilo*, previamente denominadas cLux, al igual que las lecturas relativas de clorofila de otros medidores portátiles comerciales como el SPAD 502™ y el CCM-200™, utilizan relaciones matemáticas para estimar la concentración de clorofila a partir de valores obtenidos con métodos analíticos tradicionales (Kamarianakis y Panagiotakis, 2023). Sin embargo, estas medidas cLux tienen potencial para ayudar a monitorear la nutrición de cultivos en pequeñas explotaciones agrícolas de manejo agronómico conocido y en áreas donde se desea optimizar el uso de fertilizantes. Una forma de observar diferencias en el contenido relativo de clorofila para usar *Clorofilo* incluso sin calibración, es empleando hojas de plantas como estándares vivos, tomando hojas jóvenes verdes como referencia y hojas senescentes que presentan clorosis debida a la degradación de la clorofila (Suzuki and Shioi, 1999). Sin embargo, es importante destacar que la síntesis

de clorofila no solo depende de la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo, sino también de factores climáticos como la temperatura y el agua (Li et al., 2018).

1.2 Sobre las pruebas de funcionalidad del dispositivo

La prueba de funcionalidad de *Clorofilo*, puede inspirar a investigadores y agricultores a mejorar y adaptar soluciones tecnológicas personalizadas para la medición de clorofila. Aunque no estén estandarizadas, las mediciones relativas de clorofila son útiles para observar tendencias generales en la distribución de clorofila en las plantas.

Las posibilidades de *Clorofilo* pueden ir más allá de la exploración de clorofila en las hojas de algunas especies de plantas tropicales y puede llegar a usarse para la estimación rápida del contenido de nitrógeno en hojas intactas mediante la comparación de lecturas cLux con concentraciones de nitrógeno foliar determinados por el método Kjeldahl, como de hecho se analizó, por los investigadores en este proceso, usando plantas de maíz. En investigaciones externas también se ha estimado la concentración de nitrógeno empleando sistemas basados en cámaras de teléfonos inteligentes. Por ejemplo, se ha estimado el contenido de nitrógeno en tejidos de plantas de *Euphorbia pulcherrima* mediante el análisis de imágenes capturadas con la cámara de un teléfono inteligente y procesadas con computadoras de escritorio (Adhikari et al., 2020); y se han definido protocolos para la estimación del contenido de nitrógeno en plantas de tomate mediante el análisis de índice de color verde oscuro (DGCI) usando la aplicación para teléfonos inteligentes PocketN (Paleari et al., 2022).

1.3 Respecto al uso de “*Clorofilo*”

El uso prolongado de *Clorofilo* evidenció la necesidad de realizar mejoras futuras de su diseño. Si bien el dispositivo se ha ensayado en ambientes controlados, su desempeño en condiciones de campo puede variar debido a factores como la exposición a condiciones de iluminación variables, como en dispositivos comerciales (Martínez et al., 2004; Xiong et al., 2015) y la corta durabilidad de los materiales utilizados en su fabricación, lo cual incluye la posible fractura del filamento de ácido poliláctico PLA (termoplástico usado en la impresión 3D) y desempeño de las baterías.

Un ejemplo de recomendaciones que pueden mejorar el desempeño de *Clorofilo*, sería la inserción de reguladores de voltaje que controlen la intensidad lumínica del LED durante el uso del accesorio. Esto puede evitar la disminución de la potencia del LED y, en consecuencia, la aparición de medidas inconsistentes. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el patrón de descarga de las baterías de litio de 3V de los fabricantes suele mostrar una curva de decaimiento del voltaje con un comportamiento aproximadamente constante durante las primeras horas de uso, que disminuye rápidamente al final de su vida útil, de acuerdo a factores como la temperatura y la corriente de descarga, entre otros (Seong et al., 2018). Realizar pruebas de descarga de las baterías durante mediciones prolongadas y repetitivas con *Clorofilo* puede ayudar a predecir horas de uso sin variaciones en las medidas.

Otras etapas de desarrollo faltan aún para que el dispositivo desarrollado pueda usarse en condiciones de campo, por ejemplo: Asegurar el mecanismo de sujeción al teléfono celular para evitar que errores de alineación de la fuente de luz y el sensor de luz ambiental afecten la estabilidad de las lecturas de clorofila relativa; evaluar los materiales utilizados, como pinturas, juntas y gomas, con el objetivo de mitigar cualquier posible interferencia lumínica y entrada de humedad; y seguir avanzando en la implementación de software personalizado que facilite la gestión de datos.

Incluso, puede ser recomendable, en etapas de desarrollo posterior, fabricar dispositivos con el mismo principio óptico, que operen de forma independiente de los teléfonos inteligentes y eviten limitaciones asociadas con las diferencias en los rangos dinámicos de los sensores de luz de los teléfonos móviles y la obsolescencia debida a las actualizaciones de los sistemas operativos de los teléfonos.

Clorofilo, en la etapa actual de la investigación, sigue siendo un prototipo. Debido a esto, es recomendable realizar pruebas adicionales en condiciones de campo para evaluar su resistencia y la consistencia de sus mediciones a largo plazo, así como para refinar el concepto de manera funcional (Camburn et al., 2017). Como lo plantea Melo-Velasco; (2023), la promoción de modelos tecnológicos basados en agricultura digital requiere de la mediación gubernamental para que cumpla su propósito de reducir las brechas tecnológicas.

2. VALIDACIÓN DE LA CAPACIDAD DE MEDICIÓN DE CLOROFILA DEL DISPOSITIVO ÓPTICO PORTÁTIL FRENTE A TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Clorofilo, tiene potencial para estimar y modelar el contenido de clorofila foliar en diversas especies de plantas, incluso, para estimar la concentración de nitrógeno foliar en plantas de maíz, con un costo mínimo (Ospino Villalba, K., 2024).

Un modelo logarítmico construido con lecturas de cLux de *Clorofilo*, comparadas con los índices del medidor SPAD-502™ de Konica Minolta en 50 hojas de café, indicó una coincidencia confiable entre ambos índices (Ospino Villalba, K., 2024). Resultados semejantes se encontraron en estudios que verificaron el desempeño de medidores comerciales que usan principios ópticos similares como CCM-200™, atLEAF y SPAD-502™, que es el dispositivo estándar universal para mediciones relativas de clorofila (Markwell et al., 1995, Uddling et al., 2007).

Esto es posible, porque frente a una banda específica de luz roja (663 nm) con intensidad fija, la proporción de transmisión por una hoja normal depende principalmente de la concentración de clorofila en ella, y esto es explicado por la ley de Beer-Lambert, que describe matemáticamente el decaimiento de luz al atravesar un medio que la absorbe (Swinehart, 1962). Tanto *Clorofilo*, como SPAD funcionan bajo el mismo principio. La no linealidad de la relación entre índices del medidor SPAD-502™ y lecturas de cLux se debe a que la ecuación utilizada por el fabricante para expresar las unidades SPAD es de naturaleza logarítmica (Uddling et al., 2007).

Al igual que en los dispositivos comerciales mencionados, las mediciones de clorofila relativa con *Clorofilo* se ven afectadas por los fenómenos fisiológicos asociados a la distribución intracelular de los cloroplastos durante la exposición a la luz (Davis et al., 2011; Pavlovic et al., 2014), que pueden dar lugar a la subestimación derivada del *sieve effect* o la sobreestimación de la concentración de clorofila, también relacionada con el *detour effect* (Xiong et al., 2015).

Debido a esto, es importante diseñar experimentos controlados para detectar cambios diurnos en las mediciones de clorofila asociados a las fluctuaciones en la radiación ambiental, así como experimentos de fertilización controlada para estudiar cambios en las mediciones relacionados con la distribución celular de cloroplastos en estados de nitrógeno variados. Aunque este tipo de estudios ya se han abordado con medidores de clorofila comerciales (Martínez et al., 2004; Xiong et al., 2015), es valioso revisar este enfoque con el sistema *Clorofilo*, para ampliar la capacidad de generalización de los modelos matemáticos

de estimación del contenido de clorofila foliar y comprender mejor las condiciones reales en las que, con los ajustes necesarios, se desplegaría en el futuro esta tecnología emergente.

CONCLUSIONES

Se diseñó y probó el dispositivo *Clorofilo*, el cual resultó viable para la estimación relativa de clorofila foliar. Su desempeño preliminar muestra potencial, aunque su efectividad en campo requiere mejoras de diseño, calibración específica por tipo de sensor y construcción con materiales más resistentes. *Clorofilo* posee el potencial de estimar y modelar el contenido de clorofila en las hojas de distintas especies vegetales e, incluso, permite estimar la concentración de nitrógeno foliar en plantas de maíz, todo ello con un costo muy bajo. El desarrollo continúa en la ruta de validación agronómica y robustecimiento instrumental para su futura estandarización y escalabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación Sistemas Simbióticos de La Universidad nacional de Colombia- Sede Medellín.

LITERATURA CITADA

- Carmona Rojas, L. M., Gutiérrez Rodríguez, E. A., Henao Ramirez, A. M., & Urrea Trujillo, A. I. (2022). Nutrition in cacao (*Theobroma cacao* L.) crops: What determining factors should be considered? *Revista de La Facultad de Agronomía*, 121 (Especial 2), 101. <https://doi.org/10.24215/16699513e10>.
- Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>.
- Ospino Villalba, K. (2024). Desarrollo de sistemas instrumentales para el diagnóstico nutricional de plantas y suelos en campo. [online] Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. [Acceso : 25 de mayo 2025]
- Padilla, F. M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M. T., De Souza, R., & Thompson, R. B. (2018). Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 18, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s18072083>.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 91 (1), 37–46. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5>.

- Van Den Berg, A. K., & Perkins, T. D. (2004). Evaluation of a portable chlorophyll meter to estimate chlorophyll and nitrogen contents in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) leaves. *Forest Ecology and Management*, 200(1–3), 113–117. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.06.005>.
- Brown, L. A., Williams, O., & Dash, J. (2022). Calibration and characterisation of four chlorophyll meters and transmittance spectroscopy for non-destructive estimation of forest leaf chlorophyll concentration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109059>.
- Davis, P. A., Caylor, S., Whippo, C. W., & Hangarter, R. P. (2011). Changes in leaf optical properties associated with light-dependent chloroplast movements. *Plant, Cell and Environment*, 34(12), 2047–2059. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02402.x>
- Pavlovic, D., Nikolic, B., Djurovic, S., Waisi, H., Andjelkovic, A., & Marisavljevic, D. (2014). Chlorophyll as a measure of plant health: Agroecological aspects. *Pestic. Phytomed.*, 29(1), 21–34. <https://doi.org/10.2298/pif1401021p>.
- Tholen, D., Boom, C., Noguchi, K., Ueda, S., Katase, T., & Terashima, I. (2008). The chloroplast avoidance response decreases internal conductance to CO₂ diffusion in *Arabidopsis thaliana* leaves. *Plant, Cell and Environment*, 31(11), 1688–1700. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01875.x>.
- Barnes, J. D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A. W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32(2), 85–100. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(92\)90034-Y](https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90034-Y).
- Xiong, D., Chen, J., Yu, T., Gao, W., Ling, X., Li, Y., Peng, S., & Huang, J. (2015). SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific Reports*, 5, 1–12.
- Suzuki, Y., & Shioi, Y. (1999). Detection of chlorophyll breakdown products in the senescent leaves of higher plants. In *Plant Cell Physiol* (Vol. 40, Issue 9). <https://academic.oup.com/pcp/article/40/9/909/1940130>.
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X., & Wu, X. (2018). Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6(6). <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>.
- Kamarianakis, Z., & Panagiotakis, S. (2023). Design and Implementation of a Low-Cost Chlorophyll Content Meter. *Sensors*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/s23052699>.
- Adhikari, R., Li, C., Kalbaugh, K., & Nemali, K. (2020). A low-cost smartphone controlled sensor based on image analysis for estimating whole-plant tissue nitrogen (N) content in floriculture crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105173>.
- Paleari, L., Movedi, E., Vesely, F. M., Invernizzi, M., Piva, D., Zibordi, G., & Confalonieri, R. (2022). Estimating plant nitrogen content in tomato using a smartphone. *Field Crops Research*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108564>.
- Martínez, D., & Guiamet, J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Italian Journal of Agronomy*, 24(3), 41–46. <https://doi.org/10.1051/agro>.

- Seong, W. M., Park, K. Y., Lee, M. H., Moon, S., Oh, K., Park, H., Lee, S., & Kang, K. (2018). Abnormal self-discharge in lithium-ion batteries. *Energy and Environmental Science*, 11(4), 970–978. <https://doi.org/10.1039/c8ee00186c>.
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., & Wood, K. (2017). Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>.
- Dong, T., Shang, J., Chen, J. M., Liu, J., Qian, B., Ma, B., Morrison, M. J., Zhang, C., Liu, Y., Shi, Y., Pan, H., & Zhou, G. (2019). Assessment of portable chlorophyll meters for measuring crop leaf chlorophyll concentration. *Remote Sensing*, 11(22). <https://doi.org/10.3390/rs11222706>.
- Donnelly, A., Yu, R., Rehberg, C., Meyer, G., & Young, E. B. (2020). Leaf chlorophyll estimates of temperate deciduous shrubs during autumn senescence using a SPAD-502 meter and calibration with extracted chlorophyll. *Annals of Forest Science*, 77(2). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00940-6>.
- Richardson, A. D., Duigan, S. P., & Berlyn, G. P. (2002). An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 153(1), 185–194. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>.
- Markwell, J., Osterman, J. C., & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46(3), 467–472. <https://doi.org/10.1007/BF00032301>.
- Amigo, J. M., 2020. Hyperspectral and multispectral imaging: setting the scene. In *Data Handling in Science and Technology* (Vol. 32, pp. 3–16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63977-6.00001-8>.

BIODATA

Karen S. Ospino Villalba: Doctora en Ciencias Agrarias, docente en la Universidad Popular del Cesar. Colombia. Publicaciones recientes:

- Arias, L., Ospino-Villalba, K. S., & Zapata, José E. (2018). Elaboración de leche saborizada fortificada con hierro hémico proveniente de hidrolizados de hemoglobina bovina. *Información tecnológica*, 29(4), 65-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400065>
- Pineda, D., Pérez, J. Gaviria, D., Ospino-Villalba, K. & Camargo, O. (2022). MEDUSA: An open-source and webcam based multispectral imaging system. *Hardware X*, 11, e00282. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00282>
- Crespo González, J. J., Ruiz Villadiego, O. S., & Ospino-Villalba, K. S. (2020). Determinación de nitrógeno foliar en palma de aceite con espectroscopía en el infrarrojo medio (MIR) y cercano (NIR) por el método de regresión de mínimos cuadrados parciales de componentes principales (PLS). *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 11(2), 43-57. <https://doi.org/10.22490/21456453.3206>
- Ospino-Villalba, K., Gaviria, D., Pineda, D. & Pérez, J. (2024). A 3D-Printable smartphone accessory for plant leaf chlorophyll measurement. *Hardware X*, 20, e00597. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00597>