

Diferenciación de cinco cultivares comerciales de *Saccharum* spp. mediante métodos computacionales de análisis espectral VIS-NIR

Differentiation of five commercial cultivars of Saccharum spp. using computational methods of VIS-NIR spectral analysis

✉Katia Ojito-Ramos^{1*}, ✉Hilda Kirenia Barrientos-Brito¹, ✉Osmany de la C. Aday-Díaz²,
✉Rubén Orozco-Morales³ and ✉Luis Hernández-Santana⁴

¹Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Biología, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. E-mail: hbbrito@uclv.cu

²Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar Villa Clara (INICA Villa Clara), Cuba. E-mail: osmany.adad@inicavc.azcuba.cu

³Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Centro de Investigaciones de Métodos Computacionales y Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), Santa Clara, Villa Clara, Cuba. E-mail: rorozco@uclv.edu.cu

⁴Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), Santa Clara, Villa Clara, Cuba. E-mail: luishs@uclv.edu.cu

*Autora para correspondencia: Katia Ojito-Ramos, e-mail: kojito@uclv.edu.cu

RESUMEN: La agricultura de precisión se aplica para gestionar la variabilidad espacial en campos agrícolas y optimizar la producción. El objetivo del trabajo fue diferenciar cinco cultivares comerciales de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) mediante métodos computacionales de análisis espectral. Las colectas del material vegetal se realizaron en áreas experimentales del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, ubicado en el municipio de Ranchuelo, Villa Clara, Cuba. Los cultivares comerciales se seleccionaron de acuerdo a sus características e importancia en Cuba; se evaluaron 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', 'C86-12'. El trabajo se centró en el estudio de las propiedades de reflectancia espectral de los cultivares y como métodos de análisis se utilizó el método de la primera derivada y diez medidas de correspondencia espectral. Se identificó que, a 526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm existen diferencias en los gradientes de las características espectrales entre los cultivares en estudio.

Palabras clave: agricultura de precisión, caña de azúcar, firma espectral.

ABSTRACT: Precision agriculture is applied to manage spatial variability in agricultural fields and optimize production. The objective of this study was to differentiate five commercial cultivars of *Saccharum* spp. (sugarcane) through computational spectral analysis methods. The vegetal material samples were collected in experimental areas of the Sugarcane Research Institute, located in the municipality of Ranchuelo, Villa Clara, Cuba. The commercial cultivars of *Saccharum* spp. were selected based on their characteristics and importance in Cuba; 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', and 'C86-12' were evaluated. The study focused on the spectral reflectance properties of the cultivars, using the first derivative method and ten spectral matching measures for analysis. It was identified that at 526.2 nm, 723.8 nm, and 1,399 nm, there are differences in the spectral characteristics gradients among the cultivars studied.

Keywords: Precision Agriculture, Sugarcane, Spectral Signature.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) constituye uno de los principales cultivos a nivel mundial (FAOSTAT, 2023). En Cuba, el sector azucarero es un renglón importante en la producción agroindustrial; y una de las principales fuentes de ingreso a la economía del país (Reyes *et al.*, 2021). De la caña de azúcar se obtienen varios productos como biocombustibles, etanol, fibras y azúcar,

en función de estos, existen cultivares de caña de azúcar con características específicas. Por ejemplo, cultivares con alto contenido de fibra y paredes celulares que se rompen fácilmente, favoreciendo la producción de etanol a partir de bagazo; cultivares con un diámetro de tallo pequeño y alto contenido de fibra, que aumentan la fuerza de la caña de azúcar para su uso en áreas ventosas, entre otros (Phuphaphud *et al.*, 2019).

Recibido: 28/06/2025

Aceptado: 28/10/2025

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Katia Ojito-Ramos, Osmany de la C. Aday Díaz y Rubén Orozco Morales. **Análisis formal:** Rubén Orozco Morales. **Investigación:** Katia Ojito-Ramos, Hilda Kirenia Barrientos Brito, Osmany de la C. Aday Díaz, Rubén Orozco Morales. **Metodología:** Katia Ojito-Ramos, Osmany de la C. Aday Díaz, Rubén Orozco Morales. **Redacción - borrador inicial:** Katia Ojito-Ramos, Hilda Kirenia Barrientos Brito. **Redacción - revisión y edición:** Katia Ojito-Ramos, Hilda Kirenia Barrientos Brito, Osmany de la C. Aday Díaz, Rubén Orozco Morales. **Adquisición de financiación, Administración de proyecto y Supervisión:** Luis Hernández Santana.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por el autor ni por el editor



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Conocer la distribución en tiempo real de los cultivares de caña de azúcar es fundamental para mejorar la productividad y la calidad del cultivo (Ramírez-González et al., 2019). El método convencional para el estudio de la distribución de dichos cultivares está basado en el uso de mapas tradicionales de suelo y topografía, o en la inspección visual del campo, lo cual resulta laborioso, requiere el traslado del personal y, en ocasiones, los mapas pueden estar desactualizados, lo cual limita la precisión (Espinoza y Luis, 2020). La agricultura de precisión (AP) es una tecnología utilizada para responder y reconocer la variación espacial sobre un campo; y así mejorar la gestión de los procesos de producción agrícola (Udompetaikul et al., 2021). Las técnicas de teledetección mediante imágenes satelitales se han aplicado ampliamente en diversos campos de las ciencias agrarias. Esto se debe a que permiten obtener información en tiempo real de una región determinada sin necesidad de desplazamiento, evitan costos y también permiten la creación de métodos más eficientes para el manejo y monitoreo de los cultivos (Kai et al., 2020).

La espectroscopía visible y del infrarrojo cercano (VIS-NIR) aparece como una alternativa prometedora, debido a su capacidad de detectar señales de la mayoría de las principales estructuras y grupos funcionales de compuestos orgánicos (Camargo-Hernández et al., 2023). Esta tecnología permite analizar la variabilidad espacial de un cultivo de manera fácil, rápida, precisa, no destructiva y económica; sin la preparación previa de la muestra. Además, tiene potencial para desarrollar instrumentos de mediciones en línea (Udompetaikul et al., 2021).

Este trabajo tiene como objetivo diferenciar los cultivares comerciales de *Saccharum* spp. 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', 'C86-12' mediante métodos computacionales de análisis espectral.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de las firmas espectrales de cinco cultivares comerciales de *Saccharum* spp.

La colecta de las muestras foliares se realizó en horario de la mañana de 8:00 a 10:00; en áreas experimentales del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Villa Clara (INICA VC), ubicado en el municipio de Ranchuelo, Villa Clara, Cuba. Las condiciones ambientales predominantes en el momento de la colecta fueron de día soleado, sin lluvia y con algunas nubes. La clasificación del tipo de suelo es Pardo Salítico, de tipo genético pardo, subtipo pardo mullido y de género pardo mullido carbonatado.

Para la colecta se seleccionaron cuatro parcelas (réplicas) plantadas con los cultivares comerciales de caña de azúcar, 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', 'C86-12'; con seis meses de edad. En cada parcela se eligió una planta al azar por cultivar. De cada planta se colectaron las láminas foliares de la +1 a la +7 según la enumeración del sistema de Kuijper (1915). Los cultivares comerciales fueron seleccionados según sus

características y su importancia en Cuba. Luego de colectadas las muestras, fueron conservadas a temperatura ambiente e hidratadas. Posteriormente, fueron trasladadas hasta el Laboratorio de Espectroscopía del Centro de Investigaciones Agropecuarias de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, ubicado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Determinación de las características de reflectancia espectral originales

Para la obtención de las características de reflectancia espectral originales se utilizó un espectrómetro Corona Plus Remote, de la firma alemana Carl Zeiss; que utiliza fuente de iluminación artificial producida por una lámpara de alógeno y un sistema óptico que proporciona una iluminación de la muestra a 0° (normal a la muestra), en un haz casi paralelo. Este equipo proporciona medidas de reflectancia espectral en 422 bandas entre 398 y 1 702 nm, con una resolución espectral de 10 nm, por lo que solo cubre las bandas del espectro visible (VIS) y del infrarrojo cercano (NIR). El área de censado fue circular con un radio de 2,5 mm, equivalente a 20 mm². Las muestras de hojas se colocaron de manera organizada linealmente en una placa de Petri de 10 mm de profundidad y 35 mm de diámetro, la cual se dispuso debajo del sensor en el centro del punto de coordinación. Los espectros de reflectancia se tomaron sobre la zona central de la placa de Petri, con una rotación de la muestra aproximadamente de 30° entre las adquisiciones espectrales posteriores. Se tomaron 5 espectros de reflectancia de la base, 5 del centro y 5 del ápice de cada hoja colectada, para un total de 15 espectros por hoja.

Los datos que se obtuvieron con el espectrómetro fueron procesados primeramente por el software Aspect Plus, versión 1,76 (C) sobre Windows sin realizar suavizado. Las características de reflectancia se delimitaron al intervalo de longitudes de onda entre 432,384 y 1 673,385 nm. Además, se eliminaron las características de reflectancia marcadamente atípicas (*outliers*), y para atenuar las perturbaciones de las características de reflectancia espectral que produjeron ruido de reflectancia de alta frecuencia, se utilizó un suavizado de promedio móvil (MA) de respuesta finita al impulso (FIR), con ventana de cinco muestras (Sonobe y Hirono, 2022).

Se realizó la extracción de componentes principales mediante el método de Análisis de Componentes Principales (PCA; del inglés, *principal component analysis*). Se probó la normalidad de los datos usando las pruebas JB-test, KS-test, L-test y AD-test para cada longitud de onda, cuyos resultados fueron calculados a partir de los datos agrupados y filtrados por PCA; con un nivel de significancia del 1% ($\alpha = 1\%$), lo que equivale a un 99% de confianza. Bajo el supuesto de normalidad en los datos se determinaron los promedios de las lecturas de reflectancia suavizadas para cada una de las muestras de los distintos cultivares de caña de azúcar, así como su desviación estándar. Posteriormente, se aplicó el método de la Primera Derivada.

Comparación de cinco cultivares comerciales de *Saccharum spp.* mediante diez Medidas de Correspondencia Espectral

Como métodos de análisis se utilizaron diez Medidas de correspondencia espectral (SMM; del inglés, *Spectral Matching Measures*), entre los cultivares de *Saccharum spp.* Se utilizaron SMM clásicas según [Hong et al. \(2018\)](#); [Drumetz et al. \(2019\)](#); [Borsoi et al. \(2021\)](#); [Pathak et al. \(2023\)](#), siendo ρ_x y ρ_y las reflectancias de los espectros de las muestras x y y respectivamente, obtenidas en M longitudes de onda, se definen:

- la distancia Euclidiana espectral (SED), dada por:

$$SED(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^M |\rho_{xi} - \rho_{yi}|^2}^{1/2} \quad (1)$$

- la medida del ángulo espectral (SAM) definida como:

$$SAM(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{\rho_x \cdot \rho_y^T}{\sqrt{\rho_x^2 \rho_y^2}} \right) \quad (2)$$

Donde $\rho_x \cdot \rho_y^T = \sum_{i=1}^M (\rho_{xi} \rho_{yi})$ representa el producto interno entre ρ_x y ρ_y .

- la medida de la correlación espectral (SCM), definida como:

$$SCM(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^M (\rho_{xi} - \bar{\rho}_x)(\rho_{yi} - \bar{\rho}_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\rho_{xi} - \bar{\rho}_x)^2 \sum_{i=1}^M (\rho_{yi} - \bar{\rho}_y)^2}} \quad (3)$$

donde $\bar{\rho}_x$ es la media de los valores de todos los elementos del vector del espectro de referencia, al igual que lo es $\bar{\rho}_y$ para el espectro incógnito.

- la divergencia de la información espectral (SID), definida como:

$$SID(x, y) = D(x || y) + D(y || x) \quad (4)$$

donde $D(x || y)$ se considera la entropía relativa o distancia de información de Kullback-Leibler de y con respecto a x , la cual se define como:

$$D(x || y) = - \sum_{i=1}^M p_{xi} (\log p_{yi} - \log p_{xi}) \quad (5)$$

Aquí, $p_{xi} = \rho_{xi} / \sum_{i=1}^M \rho_{xi}$ corresponde a una versión normalizada del espectro x en la i -ésima banda espectral.

- el híbrido SID-SAM entre los métodos SID y SAM, denominada SIDSAM, que se reporta como mejor discriminador que sus componentes por separado, obteniéndose mediante:

$$SIDSAM(x, y) = SID(x, y) \tan[SAM(x, y)] \quad (6)$$

- la distancia de Bhattacharyya (BhattD), teniendo en cuenta que sean $p_{xi} = \rho_{xi} / \sum_{i=1}^M \rho_{xi}$ y $p_{yi} = \rho_{yi} / \sum_{i=1}^M \rho_{yi}$ las versiones normalizadas de los espectros ρ_x y ρ_y en la i -ésima banda espectral, está dada por:

$$BhattD(x, y) = - \ln \sum_{i=1}^M \sqrt{p_{xi} p_{yi}} \quad (7)$$

- la distancia de Jeffries-Matusita (JMD), donde el criterio de separabilidad entre dos clases que son miembros de un conjunto de clases $C(x, y = 1, 2, \dots, C, x \neq y)$, basado en la JMD se ha definido como:

$$JMD(x, y) = 2 \left(1 - e^{-BhattD(\rho_x, \rho_y)} \right) \quad (8)$$

siendo $BhattD(x, y)$ la distancia de Bhattacharyya entre las clases ρ_x y ρ_y , dada en (7).

Además, se utilizaron también otras SMM, como el coeficiente Dice de similitud espectral (DSSC), el coeficiente de similitud espectral de Kumar-Johnson (KJSSC), y el DSSC-KJSSC híbrido (KJDSSC) ([Kumar et al., 2021](#)).

- el coeficiente Dice de similitud espectral (DSSC), se define como:

$$DSSC(x, y) = \frac{2 \sum_{i=1}^M (\rho_{xi} \rho_{yi})}{\sum_{i=1}^M (\rho_{xi})^2 + \sum_{i=1}^M (\rho_{yi})^2} \quad (9)$$

- el coeficiente de similitud espectral de Kumar-Johnson (KJSSC), dado por:

$$KJSSC(x, y) = \sum_{i=1}^M \left[\frac{(\rho_{xi}^2 - \rho_{yi}^2)^2}{2(\rho_{xi} \rho_{yi})^{3/2}} \right] \quad (10)$$

- el híbrido KJDSSC que es la opción híbrida entre KJSSC y DSSC dada por:

$$KJDSSC(x, y) = KJSSC(x, y) \tan[DSSC(x, y)] \quad (11)$$

Finalmente se realizó un análisis de metamerismo a las SMM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las características de reflectancia espectral originales, fue común que todos los cultivares mostraran una banda ruidosa con fluctuaciones de mayor amplitud entre 932 y 985 nm, con amplitud semejante para todos los cultivares. Debido a que el ancho de banda de las bandas espectrales del espectrómetro utilizado es de 10 nm, mucho mayor al de otros espectrómetros comerciales, en los que es de solo 1 nm, la degradación de la relación señal-a-ruido fue baja.

El PCA se empleó para simplificar el manejo de los datos muestreados; esta transformación fue ortogonal, lo que significa que los componentes principales son independientes entre sí y se organizan de tal manera que el primero captura la mayor variabilidad presente en los datos, mientras que cada componente siguiente representa progresivamente menos varianza. Esto permite identificar las características más significativas al enfocarse en los valores propios más altos (Che'Ya et al., 2022). Luego de aplicar el PCA para cada uno de los cultivares, se pudo asumir la normalidad de los datos de cada una de las muestras de cada cultivar. Posteriormente, se obtuvieron los promedios de las lecturas de reflectancia suavizadas. Estos valores medios constituyen las firmas espectrales características de cada cultivar y se diferencian principalmente en la forma de la característica.

En la Figura 1 se observan las firmas espectrales promedio de cada cultivar superpuestas en una sola imagen, lo que permite apreciar mejor las diferencias entre ellas. Para un mismo cultivar el conjunto de características varía de una lectura a otra principalmente en amplitud; mientras que de un cultivar a otro las diferencias se deben a la forma de la característica. Esto involucra la presencia de diferentes gradientes entre algunas bandas espectrales. El gradiente (Primera Derivada), no depende de la amplitud de las características de reflectancia, sino de los cambios abruptos de amplitud entre longitudes de onda adyacentes en estas características. Estos cambios de alto gradiente son los que generalmente están asociados a picos de reflectancia característicos de los elementos constituyentes del cultivar analizado (Che'Ya et al., 2022). En la Figura 2A se muestra el resultado de calcular los gradientes de las características de las muestras de cada cultivar, elevarlos al cuadrado, promediados y suavizados con un filtro de promedio móvil con ventana de cinco muestras y respuesta finita al impulso (FIR) de fase cero.

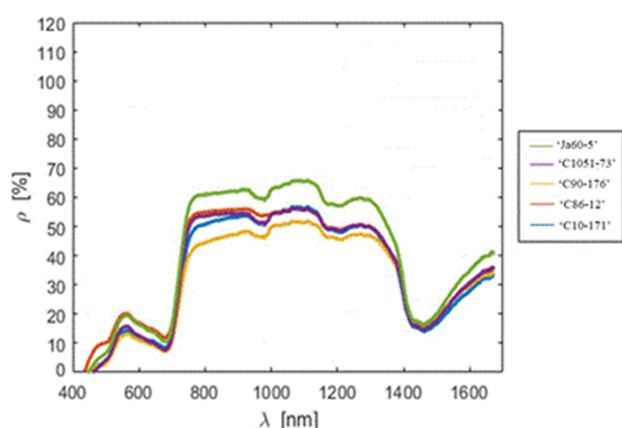


Figura 1. Características de reflectancia medias de los cultivares 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', 'C86-12', siendo ρ las reflectancia de los espectros.

Las características mostradas en la Figura 2 tienen semejante tendencia en cuanto a los picos de gradiente medio elevado al cuadrado asociados a los puntos de

inflexión de las características de reflectancia de cada cultivar. Sin embargo, dichos picos constituyen los puntos claves que denotan diferencias entre los cultivares estudiados. Es importante destacar que estas diferencias no están influenciadas por factores externos; ya que todas las plantas de los distintos cultivares tenían seis meses de edad (lo cual corresponde con la etapa fenológica de  pido crecimiento del cultivo), fueron plantadas en zonas contiguas con iguales condiciones edafoclimáticas y las muestras fueron colectadas el mismo día. Por lo que estos picos de gradiente medio elevado al cuadrado deben estar asociados a las diferencias morfológicas y fisiológicas de los cultivares en estudio. Las características de reflectancia en las plantas se deben a las propiedades de la superficie y la estructura interna de la hoja, así como a la distribución y concentración de los componentes bioquímicos de la misma (Peñuelas y Filella, 1998).

Como se observa en la Figura 2B, a los 526,2 nm todas las características de reflectancia tienen un pico de gradiente, de ellas, el mayor gradiente lo produce el cultivar 'Ja60-5', mientras que el cultivar 'C90-176' produce la transición de menor gradiente. Estos picos de gradiente ocurren en la región VIS del espectro electromagnético, la cual está comprendida en el rango de 400-700 nm. Los picos en esta región se relacionan con el efecto de las clorofilas y carotenoides (Peñuelas y Filella, 1998). Cuando la luz solar incide sobre las hojas, parte de esta se absorbe con el objetivo de captar energía para la fotosíntesis. La energía que no se absorbe, es reflejada (Segarra et al., 2020; Singh et al., 2020; Sari  et al., 2022). Esto se define como reflexión espectral en la planta y se puede describir como el proceso donde las hojas absorben luz en la zona azul y roja visible debido a la presencia de la clorofila, dejando el reflejo dominante en la zona verde del espectro electromagnético (comprendida entre los 494-577 nm) (Aboelghar y Khder, 2017).

Los picos de gradiente medio a 526,2 nm (zona verde) son distintos entre los cultivares, lo que puede deberse a diferencias en la reflectancia de los pigmentos fotosintéticos de cada cultivar. Los mínimos de reflectancia corresponden con los máximos de absorpci n (Peña et al., 2019). Por tanto, se puede deducir que mientras menor sea el valor de reflectancia, mayor será el valor de absorbancia; lo cual es directamente proporcional a la energía lumínica aprovechada por la planta.

En ciertos estudios se han definido longitudes de onda que se utilizan para calcular índices de reflectancia, los cuales son usados para determinar la eficiencia del proceso fotosintético (Peña et al., 2019). Se observa que los menores valores de reflectancia en la zona verde de la región VIS se corresponden con una mejor eficiencia fotosintética, por lo que existe correlación negativa entre ellos. Lo anterior expuesto permite inferir que el cultivar 'C90-176', al tener el menor pico a los 526,2 nm, es el cultivar con mejor eficiencia fotosintética. Esto se corresponde con las características de este, que al ser un cultivar de caña energética, requiere de más energía para la producción de biomasa (Abril-González et al., 2019).

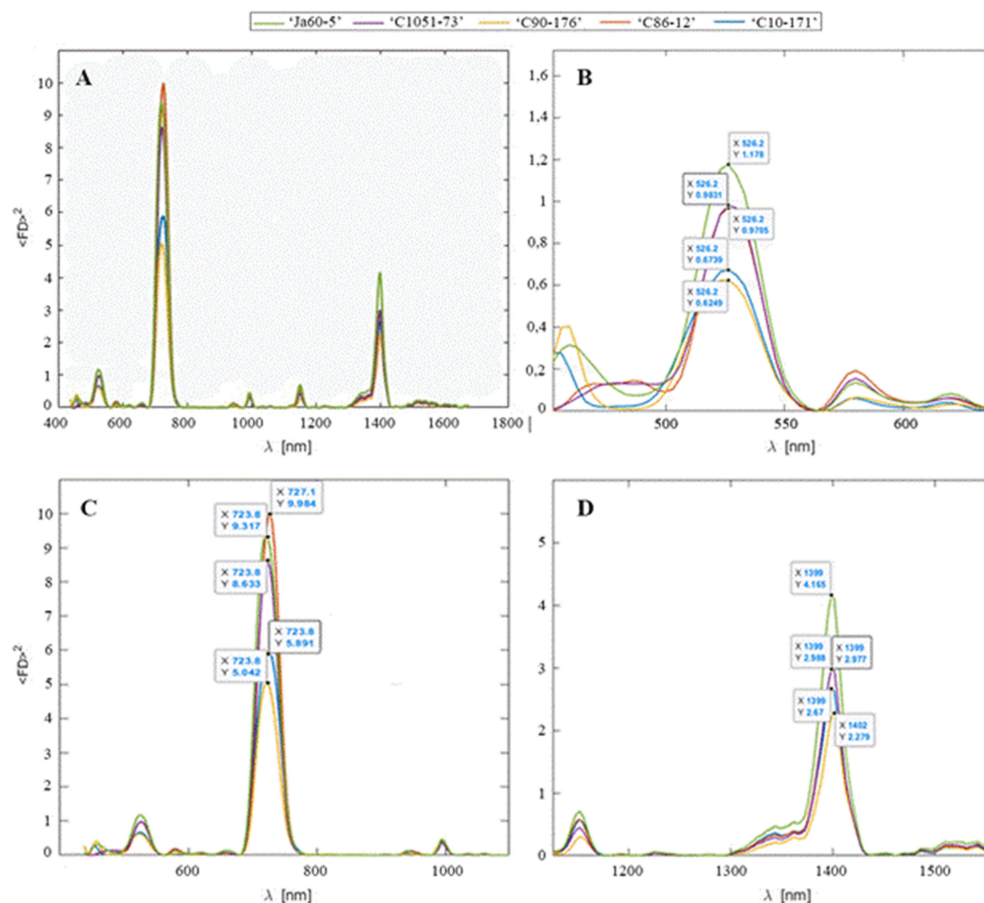


Figura 2. A Gradiente medio de reflectancia de las hojas de los cultivares en estudio elevado al cuadrado y suavizado. B Picos de gradiente medio de reflectancia de las hojas de los cultivares en estudio a 526,2 nm. C Picos de gradiente medio de reflectancia de las hojas de los cultivares en estudio en el borde rojo. D Picos de gradiente medio de reflectancia de las hojas de los cultivares en estudio entorno a los 1 400 nm.

De las tres zonas de picos de gradiente medio elevado al cuadrado (526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm), la menos representativa en función de la diferenciación de los cultivares en estudio es la que ocurre a los 526,2 nm. Esto puede deberse a que la variabilidad de la reflectancia entre los cultivares en la zona verde del espectro es limitada porque las propiedades ópticas de la clorofila dominan la respuesta espectral. Esto hace que los picos en esta región no proporcionen información relevante en la discriminación entre cultivares al ser menos sensibles que las otras dos zonas en la región del infrarrojo cercano.

La Figura 2C representa los picos de gradiente medio de los cultivares en estudio en el borde rojo (700 - 745 nm). La razón de cambio en esta zona es mayor para el cultivar 'C86-12', mientras que el cultivar 'C90-176' transita con el menor gradiente en esta banda. Los altos valores de reflectancia en el borde rojo están asociados al contenido de clorofila en la hoja (Peñuelas y Filella, 1998). Se ha destacado la utilidad que tiene el análisis derivativo de los datos de reflectancia en esta región para la identificación de la vegetación (Thorpe y Tian, 2004).

De las tres zonas de picos de gradiente medio elevado al cuadrado (526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm), la más

importante en función de la diferenciación de los cultivares en estudio es la que ocurre a los 723,8 nm. A pesar de que la clorofila sigue influyendo en esta región (al igual que ocurre en la zona de 526,2 nm); la reflectancia que ocurre en torno a los 700 - 745 nm es más sensible a las diferencias morfológicas y fisiológicas entre los cultivares (Feng, *et al.*, 2013). Esto se debe a que a medida que las longitudes de onda se acercan a los 700 nm, la absorción de la clorofila disminuye drásticamente. Después de este punto las hojas comienzan a aumentar la reflectancia, lo que marca el inicio del borde rojo, una característica clave en la espectroscopía de las plantas (Gausman, 1974). Este cambio brusco es sensible a las condiciones de la hoja, como el contenido de clorofila o la estructura celular (Peñuelas y Filella, 1998); lo que lo hace muy útil para distinguir entre cultivares.

Por esta razón, aunque la clorofila sigue siendo determinante en esta región, las diferencias en el contenido de clorofila entre los cultivares de caña de azúcar pueden generar un contraste más pronunciado en torno a los 723 nm. Esto permite que los espectros varíen de forma más notable entre cultivares, algo que no ocurre tanto en el rango de los 526,2 nm donde la reflectancia está más estabilizada por la fuerte absorción de la clorofila.

Finalmente, alrededor de 1 400 nm (NIR) todas las características producen otra zona con picos de gradiente, presentando el mayor gradiente el cultivar 'Ja60-5', mientras que el menor gradiente lo produce el cultivar 'C90-176' (Figura 2D). Estos picos de gradiente medio a 1 400 nm se deben a las discontinuidades entre las paredes celulares y los espacios con aire intercelulares en la estructura interna de la hoja (Yuan et al., 2014; Katsoulas et al., 2016). Aunque esta longitud de onda no está directamente vinculada a los procesos bioquímicos de la fotosíntesis, tiene una relación indirecta con estos, especialmente en plantas C4 como la caña de azúcar. Estas plantas han desarrollado un mecanismo especializado para realizar la fotosíntesis de manera más eficiente en condiciones de luz y temperatura elevadas. Parte de esta eficiencia proviene de su estructura foliar, que optimiza la captura de CO₂ y la reducción de la fotorrespiración (Moore y Botha, 2014). La estructura celular, incluidas las paredes celulares y los espacios intercelulares, tienen un papel crucial en facilitar el transporte de gases, lo que es vital para el funcionamiento del ciclo C4. La reflectancia en el NIR, puede capturar variaciones en estas propiedades estructurales Katsoulas et al. (2016), reflejando diferencias en la organización celular que podrían influir en la eficiencia fotosintética.

Los picos en 1 400 nm también están altamente influenciados por el contenido de agua de las hojas, ya que esta longitud de onda es sensible a la reflectancia del agua en las estructuras celulares (Peñuelas y Filella, 1998). El contenido de agua es crucial para el mantenimiento de la turgencia celular, lo que impacta en la apertura de las estomas y, por tanto, en el intercambio de gases (CO₂ y O₂), un proceso fundamental en la fotosíntesis C4. Una planta C4 como la caña de azúcar, tiene una estructura celular optimizada para retener agua, reducir la transpiración y mantener un intercambio de gases eficiente Moore y Botha (2014), lo que podría reflejarse en la absorción o reflectancia en esta región del espectro.

Los espacios con aire entre las células permiten un transporte más eficiente de CO₂ hacia las células especializadas en la fotosíntesis de las plantas C4. Esta característica es una ventaja que se aprovecha en el proceso fotosintético, pues es crucial en la fase de síntesis de carbohidratos. Si la reflectancia en 1 400 nm está asociada con la proporción de estos espacios intercelulares, podría estar reflejando características estructurales que favorecen la fotosíntesis eficiente en plantas C4. Aunque la absorción de los fotones que permiten la síntesis química en la fotosíntesis en sí ocurre en las longitudes de onda visibles, la arquitectura celular que facilita ese proceso se manifiesta en las longitudes de onda del NIR.

Otros autores han descrito que la región NIR que comprende las longitudes de onda de 1 300-1 400 nm está relacionada con la interacción de la energía incidente con la estructura mesófila de la hoja (de Souza et al., 2020).

La caña de azúcar es una planta monocotiledónea; y las hojas de este tipo de plantas tienen más espacios aéreos dentro del mesófilo que las especies dicotiledóneas. De esta manera, este efecto tiene una influencia directa sobre la dispersión de la radiación de los cultivares de *Saccharum* spp. Además, se han descrito otros picos de gradiente medio útiles para la discriminación de cultivares y especies. Por ejemplo, al realizar la diferenciación entre cuatro cultivares brasileños de caña de azúcar mediante espectroscopía VIS-NIR, se encontró que todas las longitudes de onda contribuyeron a discriminar los cultivares de caña de azúcar, pero el rango de 600-750 nm fue el más relevante (Neto et al., 2018). También, al diferenciar las plantas de caña de azúcar de las malezas por el comportamiento espectral de las hojas, se logró simplificar el espectro en sólo cuatro bandas de interés (500-550 nm; 650-750 nm; 1 300-1 450 nm; y 1 800-1 900 nm) (de Souza et al., 2020). Esto indica que las bandas usadas en la diferenciación pueden variar; pues las propiedades espectrales de las plantas dependen de su estado fisiológico, como la concentración de clorofila y otros pigmentos fotosintéticos, el contenido y estructura interna de las hojas y la influencia del estrés biótico y abiótico.

Las tres bandas de elevado gradiente, se muestran claramente como picos con valores máximos que forman combinaciones diferentes para cada cultivar posibilitando crear un espacio de rasgos. Con ello se logra una caracterización de las variaciones espectrales, que permite identificar las longitudes de onda significativas a partir de las cuales pueden implementarse estrategias de discriminación y clasificación (Agarla et al., 2021).

Los resultados permiten afirmar, que a partir de los espectros VIS-NIR los cultivares muestran rasgos característicos que permiten diferenciarlos unos de otros. De esta manera, es posible diferenciar la presencia de los cinco cultivares en el área a partir de la estructura interna de la hoja, la variabilidad en los elementos constituyentes de cada tejido vegetal y sus concentraciones entre los cultivares analizados.

Comparación de cinco cultivares comerciales de *Saccharum* spp. mediante diez medidas de correspondencia espectral

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las diez SMM analizadas, representando el valor medio y la desviación estándar entre todas las muestras de cada cultivar, utilizando características de reflectancia con amplitud entre 0 y 1. En las medidas que determinan correlación (DSSC, SCM), los valores máximos están representados en color verde, mientras que los valores mínimos en color rojo. En las medidas que determinan distancia (SED, BhattD, JMD), similitud (KJSSC, KJDSSC), medida (SAM) o divergencia (SID, SIDSAM), los valores mínimos están representados en color verde, mientras que los valores máximos en color rojo.

Tabla 1. Resultados de las diez SMM analizadas, representando el valor medio y la desviación estándar entre todas las muestras de cada cultivar, utilizando características de reluctancia con amplitud entre 0 y 1.

	‘Ja60-5’	‘C10-171’	‘C90-176’	‘C1051-73’	‘C86-12’
SED					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	0,8775±0,3750	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	1,1121±0,2320	0,5751±0,3462	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	0,8114±0,3700	0,4800±0,4132	0,6553±0,4357	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	0,9122±0,3076	0,6997±0,3372	0,6097±0,3444	0,5064±0,2046	0,0000±0,0000
SAM					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	3,7128±1,8715	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	5,1013±1,6607	4,8122±1,3868	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	3,4983±1,5855	3,3288±1,5049	5,1397±1,7213	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	5,5087±2,5736	4,7847±2,9583	6,0161±2,5451	6,0556±3,4557	0,0000±0,0000
SCM					
‘Ja60-5’	1,0000±0,0000				
‘C10-171’	0,9909±0,0087	1,0000±0,0000			
‘C90-176’	0,9873±0,0088	0,9876±0,0108	1,0000±0,0000		
‘C1051-73’	0,9909±0,0079	0,9911±0,0082	0,9844±0,0148	1,0000±0,0000	
‘C86-12’	0,9781±0,0336	0,9801±0,0399	0,9769±0,0317	0,9691±0,0463	1,0000±0,0000
SID					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	0,1310±0,1169	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	0,2177±0,1730	0,1738±0,0881	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	0,1444±0,1184	0,1254±0,1082	0,2569±0,1395	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	0,3295±0,3064	0,2760±0,4364	0,3560±0,2952	0,4884±0,4919	0,0000±0,0000
SIDSAM					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	0,0119±0,0175	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	0,0240±0,0278	0,0160±0,0123	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	0,0115±0,0139	0,0099±0,0121	0,0265±0,0214	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	0,0451±0,0762	0,0454±0,1175	0,0499±0,0613	0,0810±0,1347	0,0000±0,0000
DSSC					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	0,7316±0,0133	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	0,7240±0,0107	0,7402±0,0103	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	0,7338±0,0116	0,7417±0,0114	0,7367±0,0139	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	0,7318±0,0121	0,7367±0,0104	0,7388±0,0109	0,7426±0,0064	0,0000±0,0000
KJSSC					
‘Ja60-5’	0,0000±0,0000				
‘C10-171’	3,6963±2,2523	0,0000±0,0000			
‘C90-176’	5,4460±3,8620	2,0686±1,5693	0,0000±0,0000		
‘C1051-73’	3,1767±1,9155	1,7244±1,9981	2,8639±2,3213	0,0000±0,0000	
‘C86-12’	4,8575±3,0803	3,0374±3,0098	2,7792±2,3586	3,2666±3,2931	0,0000±0,0000
KJDSSC					
‘Ja60-5’	1,0000±0,0000				
‘C10-171’	3,2709±1,9369	1,0000±0,0000			
‘C90-176’	4,7620±3,2647	1,8627±1,3667	1,0000±0,0000		
‘C1051-73’	2,8283±1,6631	1,5407±1,7439	2,5450±1,9921	1,0000±0,0000	
‘C86-12’	4,3072±2,5909	2,7148±2,6437	2,4937±2,0725	2,9617±2,9057	1,0000±0,0000

BhattD					
'Ja60-5'	0,0000±0,0000				
'C10-171'	0,0158±0,0143	0,0000±0,0000			
'C90-176'	0,0266±0,0209	0,0211±0,0106	0,0000±0,0000		
'C1051-73'	0,0174±0,0142	0,0152±0,0131	0,0313±0,0168	0,0000±0,0000	
'C86-12'	0,0401±0,0374	0,0334±0,0520	0,0433±0,0358	0,0589±0,0591	0,0000±0,0000
JMD					
'Ja60-5'	0,0000±0,0000				
'C10-171'	0,0313±0,0279	0,0000±0,0000			
'C90-176'	0,0520±0,0401	0,0417±0,0207	0,0000±0,0000		
'C1051-73'	0,0343±0,0277	0,0301±0,0257	0,0614±0,0324	0,0000±0,0000	
'C86-12'	0,0774±0,0690	0,0632±0,0933	0,0836±0,0673	0,1113±0,1061	0,0000±0,0000

Nota: En las medidas que determinan correlación (DSSC, SCM), los valores máximos están representados en color verde, mientras que los valores mínimos en color rojo. En las medidas que determinan distancia (SED, BhattD, JMD), similitud (KJSSC, KJDSSC), medida (SAM) o divergencia (SID, SIDSAM), los valores mínimos est n representados en color verde, mientras que los valores máximos en color rojo.

La SED, dada por (1) se escal  por 0,5 ya que depende de las amplitudes. Cuando esta aumenta indica mayor distancia Euclidiana entre los espectros, lo que ocurre entre el cultivar 'Ja60-5' y el resto de los cultivares; presentando el valor más alto cuando se compara con el cultivar 'C90-176'. Los valores más bajos para la SED fueron dados al comparar los cultivares 'C1051-73' y 'C10-171'. El SAM, dado en (2) y llevado a grados ( ), cuando aumenta indica mayor separación angular entre las características espectrales, lo que se obtiene entre los cultivares 'C86-12' y 'C1051-73', o 'C90-176'; en ese orden. No siendo así para el SAM entre los cultivares 'C1051-73' y 'C10-171' o 'Ja60-5'; en ese orden. La SCM, dada en (3), cuando disminuye indica menor correlación espectral, lo que se obtiene entre los cultivares 'C86-12' y el resto de los cultivares; presentando el valor más bajo con el cultivar 'C1051-73'; no siendo así entre los cultivares 'C1051-73' y 'C10-171', 'C1051-73' y 'Ja60-5', y 'C10-171' y 'Ja60-5', donde el primer caso posee la mayor correlación espectral. Tanto para la SED, el SAM y la SCM los valores de desviación estándar no superaron los valores de las medidas.

Por otra parte, la SID, dada por (4) y (5) escalada por 10, cuando aumenta indica mayor divergencia de información entre los espectros de reflectancia, obteniéndose las máximas divergencias entre el cultivar 'C86-12' y el resto de los cultivares. No sucede lo mismo entre los cultivares 'C10-171' y 'C1051-73'; ya que se obtiene la más baja divergencia entre ellas. El SIDSAM, dado por (6), también indica mayor discrepancia espectral cuando aumenta su valor, lo cual se obtiene entre el cultivar 'C86-12' y el resto de los cultivares. Al igual que para el SID, la menor diferencia se obtiene entre los cultivares 'C10-171' y 'C1051-73'; no obstante, la desviación estándar en este caso supera el valor medio de la medida para la mayoría de los valores. La BhattD, dada en (7) y escalada por 10, cuando aumenta su valor denota más distancia entre las características espectrales, obteniéndose la mayor distancia entre los cultivares 'C86-12' y 'C1051-73'. El menor valor de distancia se presentó entre los cultivares 'C1051-73' y 'C10-171'.

La JMD, dada por (8), al igual que la BhattD cuando aumenta su valor denota espectros más distantes y guarda

una relación no lineal con la BhattD, mostrando que los mayores valores de distancia se producen entre el cultivar 'C86-12' y el resto de los cultivares, siendo con 'C1051-73' el mayor de todos. El menor valor de distancia se produce entre los cultivares 'C10-171' y 'C1051-73'.

El DSSC, dado por (9) y escalado por 0,75, disminuye cuando las características de reflectancia son menos similares, lo que ocurre entre el cultivar 'Ja60-5' y el resto de los cultivares, siendo el valor más bajo cuando se compara con el cultivar 'C90-176'. El valor de DSSC más alto se obtiene entre los cultivares 'C86-12' y 'C1051-73'. El KJSSC, dado por (10) y escalado por 0,1, aumenta su valor cuando las características espectrales son menos similares, siendo los coeficientes entre el cultivar 'Ja60-5' y el resto de los cultivares los de mayor valor. Por el contrario, el cultivar 'C10-171' comparado con 'C1051-73' obtiene el valor más bajo de KJSSC. Finalmente, el KJDSSC, dado por (11), también aumenta su valor cuando las características espectrales son menos similares, coincidiendo sus resultados con las del KJSSC.

Los resultados de las diez SMM muestran como patrón general que los cultivares 'Ja60-5' y 'C86-12' son los cultivares más diferentes del resto. En este sentido, el cultivar 'C86-12' alcanzó los valores más significativos cuando se compar  con 'C1051-73'; y el cultivar 'Ja60-5' obtuvo sus valores más representativos al compararse con 'C90-176'. Por otra parte, los cultivares 'C10-171' y 'C1051-73' son los más similares entre sí.

Solo cuando se compara un cultivar consigo mismo los valores de distancia, similitud, medida o divergencia toman valor cero, o las correlaciones toman valor uno, de no ser así ocurrirá metamerismo. El metamerismo es el efecto que se produce cuando dos espectros diferentes producen igual percepción de las fuentes que reflejan tales espectros (Agarla *et al.*, 2021). En este caso ocurrirá metamerismo entre dos lecturas de reflectancia espectral de cultivares diferentes si las SMM que determinan distancia (SED, BhattD, JMD), similitud (KJSSC, KJDSSC), medida (SAM) o divergencia (SID, SIDSAM) entre ellas dan como resultado valor cero, así como cuando las SMM que determinan correlación (DSSC, SCM) dan como resultado valor uno.

En el análisis de las SMM ninguno de los valores mínimos se hace cero, siendo el SIDSAM el que produce los valores más cercanos a cero, principalmente comparando el cultivar 'C1051-73' con 'C10-171' (0,0099); no obstante, también los valores de SIDSAM para estos pareos de cultivares son bajos. Por otro lado, las medidas de correlación (SCM y DSSC), que toman valor uno cuando ocurre metamerismo, o cuando se compara una especie consigo misma, obtienen su valor más alto para la SCM cuando se compara el cultivar 'C1051-73' con 'C10-171' (0,9911).

Finalmente, se puede referir que a partir de los resultados mostrados y después de probar la normalidad de los valores de reflectancia para las diversas lecturas de una misma muestra, se determinaron las características medias y de desviación estándar de cada una. El *bundle* de estas características medias de los cultivares estudiados representó la variabilidad de los mismos. Se identificó que, a 526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm existen diferencias en los gradientes de las características espectrales de los cinco cultivares estudiados. Diversas SMM corroboraron que existe posibilidad de discriminar entre los cultivares sin que ocurra metamerismo. De ellas, la SED, el SAM y la SCM son las que brindan los mejores resultados. Además, fueron las tres medidas de correspondencia espectral en las que ninguno de los valores de desviación estándar superó los valores medios.

Los métodos computacionales de análisis espectral se han utilizado para distinguir especies y cultivares basándose en el supuesto de que cada uno tiene ciertas características que pueden usarse para diferenciarlos de otros, que generalmente son la forma, el tamaño y la reflectancia de las hojas (Cisternas *et al.*, 2020). En un estudio similar, se identificaron otras longitudes de onda para discriminación de cultivares comerciales de *Saccharum spp.* que oscilaban entre 560 y 720 nm (Johnson *et al.*, 2008). Los resultados indican que las bandas para discriminar cultivares pueden variar y deben ser investigados más de cerca para permitir un mapeo adecuado de cultivares de caña de azúcar, atendiendo al área y las características de los cultivares en estudio.

La firma espectral de cada cultivar tiene una curva gráfica diferente según sus características específicas. Por tanto, se puede utilizar una biblioteca espectral para comparar la reflectancia de cultivares de caña de azúcar en un campo y estimar la frecuencia de los mismos; además esta biblioteca se puede utilizar para discriminar e identificar la ubicación de la planta (Kai *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

- Es posible determinar las firmas espectrales de los cultivares comerciales de *Saccharum spp.*, 'Ja60-5', 'C10-171', 'C90-176', 'C1051-73', 'C86-12', a 526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm donde a una longitud de onda de reflectancia de 526,2 nm, 723,8 nm y a 1 399 nm, existen diferencias en los gradientes de las características espectrales de estos.

- Las diez medidas de correspondencia espectral permiten diferenciar los cultivares comerciales de *Saccharum spp.*, sin ocurrencia de metamerismo.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido posible gracias al proyecto de investigación "Soluciones para la agricultura y el medio ambiente basados en vehículos no tripulados, articulados a una infraestructura de datos espaciales", del Programa Nacional "Automática, Robótica e Inteligencia Artificial". ARIA, PN223LH004

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOELGHAR, M.A.; KHDERY, G.A.: "Spectroscopic and morphological characteristics of genus *Jatropha* (Euphorbiaceae) and genus *Josoba* (Simmondsiaceae)", *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 5(04), 2017, ISSN: 2307-8553.
- ABRIL-GONZÁLEZ, A.; RAMIL-MESA, M.; MILÁN, D.A.; CAMPO-ZABALA, R.: "Caña energética como combustible de calderas de biomasa. Propuesta de precio como alternativa al petróleo y al carbón", *Icidca*, 53: 9, 2019.
- AGARLA, M.; BIANCO, S.; CELONA, L.; SCHETTINI, R.; TCHOBANOU, M.: "An analysis of spectral similarity measures", En: *Color and Imaging Conference*, Ed. Society for Imaging Science and Technology, vol. 29, pp. 300-305, 2021, ISBN: 2166-9635.
- BORSOI, R.A.; IMBIRIBA, T.; BERMUDEZ, J.C.M.; RICHARD, C.; CHANUSSOT, J.; DRUMETZ, L.; TOURNERET, J.-Y.; ZARE, A.; JUTTEN, C.: "Spectral variability in hyperspectral data unmixing: A comprehensive review", *IEEE geoscience and remote sensing magazine*, 9(4): 223-270, 2021, ISSN: 2168-6831.
- CAMARGO-HERNÁNDEZ, D.B.; PARRA-FORERO, D.M.; VARON-RAMÍREZ, V.M.; LESMES-SUÁREZ, J.C.; BARONA-RODRÍGUEZ, A.F.; ARIZA-NIETO, C.: "Espectroscopía visible y del infrarrojo cercano para el análisis de nutrientes en tejido vegetal de caña de azúcar para producción de panela", *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 26(1), 2023, ISSN: 0123-4226.
- CHE'YA, N.N.; MOHIDEM, N.A.; ROSLIN, N.A.; SABERIOON, M.; TARMIDI, M.Z.; ARIF SHAH, J.; FAZLIL ILAHI, W.F.; MAN, N.: "Mobile computing for pest and disease management using spectral signature analysis: A review", *Agronomy*, 12(4): 967, 2022, ISSN: 2073-4395.
- CISTERNAS, I.; VELÁSQUEZ, I.; CARO, A.; RODRÍGUEZ, A.: "Systematic literature review of implementations of precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 176: 105626, 2020, ISSN: 0168-1699.
- DE SOUZA, M.F.; DO AMARAL, L.R.; DE MEDEIROS OLIVEIRA, S.R.; COUTINHO, M.A.N.; NETTO,

- C.F.: "Spectral differentiation of sugarcane from weeds", *Biosystems Engineering*, 190: 41-46, 2020, ISSN: 1537-5110.
- DRUMETZ, L.; MEYER, T.R.; CHANUSSOT, J.; BERTOZZI, A.L.; JUTTEN, C.: "Hyperspectral image unmixing with endmember bundles and group sparsity inducing mixed norms", *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(7): 3435-3450, 2019, ISSN: 1057-7149.
- ESPINOZA, F.; LUIS, F.: *Caña de Azúcar-Manual Técnico*, Ed. Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Asunción, Paraguay, publisher: Caña de azúcar: Manual Técnico/Fernando Espinoza., 2020, ISBN: 99967-951-0-1.
- FAOSTAT: *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, [en línea]*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2023, Disponible en: <http://www.faostat.fao.org> , [Consulta: 21 de abril de 2023].
- FENG, M.C.; WANG, J.J.; WANG, C.; YANG, W.D.; WANG, H.Q.; XIAO, L.J.; SONG, Y.H.; GAO, L.M.; ZHANG, M.J.; DING, G.W.: "Response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) spectral reflectance characteristics to chlorophyll content in planting densities application rate", *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19: 1190-1197, 2013.
- GAUSMAN, H.W.: "Leaf reflectance of near-infrared", *Photogrammetric Engineering*, 40(2): 183-191, 1974.
- HONG, D.; YOKOYA, N.; CHANUSSOT, J.; ZHU, X.X.: "An augmented linear mixing model to address spectral variability for hyperspectral unmixing", *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(4): 1923-1938, 2018, ISSN: 1057-7149.
- JOHNSON, R.M.; VIATOR, R.P.; VEREMIS, J.C.; RICHARD, E.P.; ZIMBA, P.V.: "Discriminación de variedades de caña de azúcar con perfiles de pigmentos y datos de reflectancia foliar hiperespectral de alta resolución", *Journal Association Sugar Cane Technologists*, 28: 63-75, 2008.
- KAI, P.M.; DA COSTA, R.M.; DE OLIVEIRA, B.M.; FERNANDES, D.S.; FELIX, J.; SOARES, F.: "Discrimination of sugarcane varieties by remote sensing: A review of literature", En: *2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Ed. IEEE, pp. 1212-1217, 2020, ISBN: 1-7281-7303-5.
- KATSOULOS, N.; ELVANIDI, A.; FERENTINOS, K.P.; KACIRA, M.; BARTZANAS, T.; KITTAS, C.: "Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review", *Biosystems Engineering*, 151: 374-398, 2016, ISSN: 1537-5110.
- KUIJPER, J.: "DeGroei van Bladschijf, Bladscheede em Stengel van het suikerriet", *Arch Suikerind Ned Indië*, 23(1): 528-556, 1915.
- KUMAR, C.; CHATTERJEE, S.; OOMMEN, T.; GUHA, A.: "New effective spectral matching measures for hyperspectral data analysis", *International Journal of Remote Sensing*, 42(11): 4126-4156, 2021, ISSN: 0143-1161.
- MOORE, P.H.; BOTHA, F.C.: *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*, Inst. Wiley Blackwell Online Library, Nueva Delhi, India, publisher: Wiley Online Library, 2014.
- NETO, A.S.; LOPES, D.; TOLEDO, J.; ZOLNIER, S.; SILVA, T. da: "Classification of sugarcane varieties using visible/near infrared spectral reflectance of stalks and multivariate methods", *The Journal of Agricultural Science*, 156(4): 537-546, 2018, ISSN: 0021-8596.
- PATHAK, P.; CHALOPIN, C.; ZICK, L.; KÖHLER, H.; PFAHL, A.; RAYES, N.; GOCKEL, I.; NEUMUTH, T.; MELZER, A.; JANSEN-WINKELN, B.: "Spectral similarity measures for in vivo human tissue discrimination based on hyperspectral imaging", *Diagnostics*, 13(2): 195, 2023, ISSN: 2075-4418.
- PEÑA, L.; RENTERÍA, V.; VELÁSQUEZ, C.; OJEDA, M.L.; BARRERA, E.: "Absorbancia y reflectancia de hojas de Ficus contaminadas con nanopartículas de plata", *Revista mexicana de física*, 65(1): 95-105, 2019, ISSN: 0035-001X.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.: "Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status", *Trends in plant science*, 3(4): 151-156, 1998, ISSN: 1360-1385.
- PHUPHAPHUD, A.; SAENGPRACHATANARUG, K.; POSOM, J.; MARAPHUM, K.; TAIRA, E.: "Prediction of the fibre content of sugarcane stalk by direct scanning using visible-shortwave near infrared spectroscopy", *Vibrational spectroscopy*, 101: 71-80, 2019, ISSN: 0924-2031.
- RAMÍREZ-GONZÁLES, M.; RODRÍGUEZ-MOREIRA, D.; RAMÍREZ-GONZÁLES, F.; BARCIA-SARDIÑAS, S.: "Variables meteorológicas y desarrollo fenológico de la caña de azúcar en Aguada de Pasajeros", *Revista Cubana de Meteorología*, 25: 354-366, 2019, ISSN: 2664-0880.
- REYES, R.A.G.; GÓMEZ, J.A.V.; RUBIO, A.W.R.: "Sensoramiento remoto del rendimiento agrícola en caña de azúcar en Cacocum, Cuba", *Temas agrarios*, 26(2): 152-159, 2021, ISSN: 0122-7610.
- SARIĆ, R.; NGUYEN, V.D.; BURGE, T.; BERKOWITZ, O.; TRTÍLEK, M.; WHELAN, J.; LEWSEY, M.G.; ČUSTOVIĆ, E.: "Applications of hyperspectral imaging in plant phenotyping", *Trends in plant science*, 27(3): 301-315, 2022, ISSN: 1360-1385.
- SEGARRA, J.; BUCHAILLOT, M.L.; ARAUS, J.L.; KEFAUVER, S.C.: "Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications", *Agronomy*, 10(5): 641, 2020, ISSN: 2073-4395.
- SINGH, V.; SHARMA, N.; SINGH, S.: "A review of imaging techniques for plant disease detection",

- Artificial Intelligence in Agriculture*, 4: 229-242, 2020, ISSN: 2589-7217.
- SONOBE, R.; HIRONO, Y.: “Applying variable selection methods and preprocessing techniques to hyperspectral reflectance data to estimate tea cultivar chlorophyll content”, *Remote Sensing*, 15(1): 19, 2022, ISSN: 2072-4292.
- THORP, K.; TIAN, L.: “A review on remote sensing of weeds in agriculture”, *Precision Agriculture*, 5(5): 477-508, 2004, ISSN: 1385-2256.
- UDOMPETAIKUL, V.; PHETPAN, K.; SIRISOMBOON, P.: “Development of the partial least-squares model to determine the soluble solids content of sugarcane billets on an elevator conveyor”, *Measurement*, 167: 107898, 2021, ISSN: 0263-2241.
- YUAN, L.; HUANG, Y.; LORAAMM, R.W.; NIE, C.; WANG, J.; ZHANG, J.: “Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects”, *Field Crops Research*, 156: 199-207, 2014, ISSN: 0378-4290.