OPEN ACCESS

ARTÍCULO ORIGINAL

UNAH UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 35
enero-diciembre 2026
ISSN 1010-2760, eISSN 2071-0054
Cu-ID: https://cu-id.com/2177/v35e20

Correlación de índices RGB de dron y Sentinel-2 en arroz (Oryza sativa L.) en la UBPC Las Nuevas, Sancti Spíritus

Correlation of RGB Drone Indices and Sentinel-2 in Rice (Oryza sativa L.) at UBPC Las Nuevas, Sancti Spíritus

Eldo Yoel Flores del Castillo[1*], Elvis López Bravo[2] and Osvaldo Delgado González[3]

[1]*Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez", Sancti Spíritus, Cuba.*
[2]*Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba. E-mail: elvislb@uclv.edu.cu*
[3]*Metropolitan University of Technology, Santiado de Chile, Chile.*

[*]Autor para correspondencia: Eldo Yoel Flores del Castillo, e-mail: yoelf1414@gmail.com

RESUMEN: La producción de arroz en Cuba enfrenta una brecha significativa entre la demanda nacional y la oferta interna, agravada por limitaciones tecnológicas y de insumos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la correlación entre índices espectrales derivados de ortofotografía RGB capturada con dron Phantom 4 y los índices multiespectrales obtenidos de imágenes Sentinel-2 L2A, en arroz (Oryza sativa L.) en estado de plántula, en el lote 6 de la UBPC Las Nuevas, durante la época seca de 2020. La metodología incluyó el uso de QGIS 3.40 para el procesamiento de imágenes, cálculo de índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDRE, VARI, ExG, CIVE), y análisis estadístico mediante el coeficiente de correlación de Pearson en Statgraphics. Los resultados evidenciaron correlaciones significativas entre los índices RGB y los índices satelitales: VARI-NDVI ($r \approx 0.74$), ExG-GNDVI ($r \approx 0.67$) y CIVE-NDRE ($r \approx -0.63$). La validación en campo confirmó la homogeneidad del estado de plántula y la ausencia de estrés hídrico, en concordancia con los valores espectrales obtenidos. Se concluye que los índices RGB pueden ser utilizados como proxies confiables para el monitoreo agrícola multiescalar en condiciones de recursos limitados. Se recomienda ampliar el análisis a series temporales, incorporar nuevos índices como SAVI y BSI, y fortalecer la capacitación técnica en herramientas como QGIS y Statgraphics para mejorar la gestión agrícola en Cuba.
Palabras clave: agricultura de precisión, dron, monitoreo multiescalar, QGIS, teledetección.

ABSTRACT: Rice production in Cuba faces a significant gap between national demand and domestic supply, aggravated by technological and input limitations. In this context, the present study aimed to evaluate the correlation between spectral indices derived from RGB orthophotography captured with a Phantom 4 drone and multispectral indices obtained from Sentinel-2 L2A images, in rice (Oryza sativa L.) at the seedling stage, in plot 6 of UBPC Las Nuevas, during the dry season of 2020. The methodology included the use of QGIS 3.40 for image processing, calculation of spectral indices (NDVI, GNDVI, NDRE, VARI, ExG, CIVE), and statistical analysis using Pearson's correlation coefficient in Statgraphics. The results showed significant correlations between RGB indices and satellite indices: VARI-NDVI ($r \approx 0.74$), ExG-GNDVI ($r \approx 0.67$), and CIVE-NDRE ($r \approx -0.63$). Field validation confirmed the homogeneity of the seedling stage and the absence of water stress, in agreement with the spectral values obtained. It is concluded that RGB indices can be used as reliable proxies for multiscale agricultural monitoring under resource-limited conditions. It is recommended to extend the analysis to time series, incorporate new indices such as SAVI and BSI, and strengthen technical training in tools such as QGIS and Statgraphics to improve agricultural management in Cuba.
Keywords: precision agriculture, drone, multiscale monitoring, QGIS, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) constituye uno de los pilares de la seguridad alimentaria en Cuba y en gran parte del mundo. En la dieta cubana, este cereal es insustituible: se estima que cada persona consume alrededor de 60 kg anuales, una de las cifras más altas de la región (Monreal, 2025). Para cubrir la demanda nacional, el país requiere unas 600,000 toneladas al año, pero en 2024 apenas logró producir 80,000 toneladas, lo que representa apenas un 13% de la demanda y obliga a recurrir a importaciones costosas (Infobae, 2025). Esta situación refleja la vulnerabilidad del sistema agroalimentario cubano y la necesidad de optimizar la producción mediante tecnologías avanzadas.

Recibido: 02/12/2025
Aceptado: 27/04/2026
Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.
Contribución de los autores: Conceptualización, Curación de datos, Investigación, Metodología, Redacción-borrador inicial, Redacción-revisión y edición, Supervisión: Eldo Yoel Flores del Castillo. **Conceptualización, Curación de datos, Metodología:** Elvis López Bravo. **Conceptualización, Curación de datos, Supervisión, Investigación:** Osvaldo Delgado González.
La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para 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/

La crisis productiva del arroz en Cuba ha sido señalada por diversos especialistas como resultado de un modelo agropecuario ineficiente y dependiente de insumos externos (Periódico Girón, 2025). En este contexto, la búsqueda de alternativas tecnológicas para mejorar la gestión de los cultivos se convierte en un imperativo estratégico.

La teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para la agricultura moderna. El uso de satélites, drones y sensores remotos permite monitorear el estado fisiológico de los cultivos, detectar estrés hídrico, estimar biomasa y evaluar la salud vegetal de manera rápida y no destructiva. En Cuba, la introducción de estas tecnologías ha sido progresiva, con proyectos impulsados por universidades y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente (Ruiz *et al.*, 2024).

Los drones ofrecen imágenes de alta resolución espacial, útiles para caracterizar parcelas específicas y detectar variaciones locales en el cultivo. Por su parte, los satélites Sentinel-2 proporcionan datos multiespectrales con cobertura amplia y frecuencia temporal adecuada para el monitoreo regional. La combinación de ambas fuentes de información abre la posibilidad de establecer modelos multiescalares que integren detalle local y visión global (Ponvert y Lau, 2018).

Los índices espectrales derivados de imágenes satelitales, como el NDVI, GNDVI y NDRE, han demostrado ser indicadores robustos del vigor vegetal y del contenido de clorofila. Sin embargo, su resolución espacial (10-20 m) puede limitar la precisión en parcelas pequeñas. En contraste, los índices calculados a partir de ortofotografía RGB de dron, como VARI, ExG y CIVE, ofrecen un nivel de detalle superior, aunque carecen de la amplitud espectral de los sensores satelitales. La correlación entre ambos conjuntos de índices permite validar la utilidad de las imágenes RGB como sustituto o complemento de los datos satelitales. Estudios recientes han mostrado que índices como VARI presentan correlaciones significativas con NDVI, lo que confirma la posibilidad de utilizar drones para monitoreo agrícola en condiciones de recursos limitados (Famartínez, 2023). Esta integración resulta especialmente relevante en Cuba, donde el acceso a imágenes satelitales de alta resolución puede ser restringido, pero el uso de drones se ha expandido en proyectos académicos y productivos.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo, evaluar la correlación entre índices espectrales derivados de ortofotografía RGB de dron Phantom 4 y Sentinel-2 L2A en arroz (*Oryza sativa* L.) en estado de plántula.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el lote 6 de la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) Las Nuevas, perteneciente a la Empresa Arrocera Sur del Jíbaro, ubicada en el municipio La Sierpe, provincia Sancti Spíritus. Este lote forma parte de una de las principales zonas arroceras del país, caracterizada por suelos fértiles, topografía llana y disponibilidad de infraestructura para el riego. La época de estudio corresponde a la temporada seca del año 2020, Figura 1.

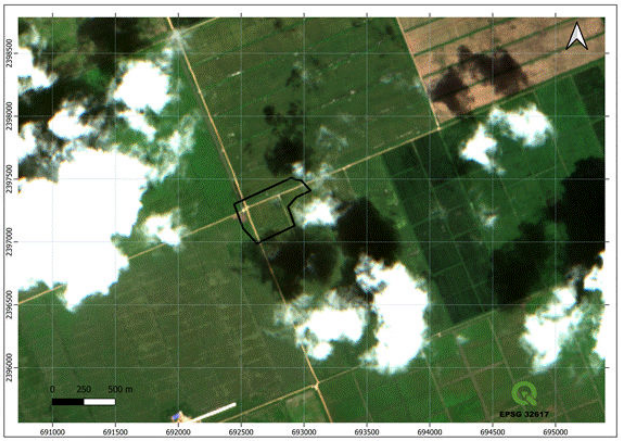


Figura 1. Lote 6 de la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) Las Nuevas, perteneciente a la Empresa Arrocera Sur del Jíbaro.

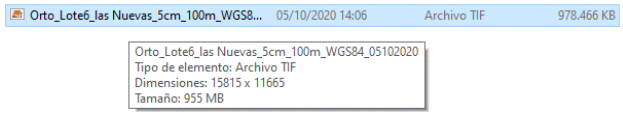
Metodología

Para el desarrollo del estudio se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

- Software QGIS v3.40 Bratislava (OSGeo, 2024).
- Imagen satelital Sentinel-2 L2A (resolución de 10 a 20 metros, adquiridas el 4 de octubre de 2020) (Copernicus, 2024).



- Ortofotografía RGB capturada con dron Phantom 4 (resolución de 5 cm/píxel, adquirida el 5 de octubre de 2020), Figura 2.



- Complementos de QGIS: Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), Calculadora Raster, Field Calculator.
- Hardware: estación de trabajo con capacidad de procesamiento para imágenes multiespectrales.

Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes Sentinel-2 fueron sometidas a corrección atmosférica (nivel L2A), recorte del área de estudio y reproyección al sistema de coordenadas UTM. La ortofoto RGB fue ortorrectificada y mosaiqueada para generar un raster único en QGIS.

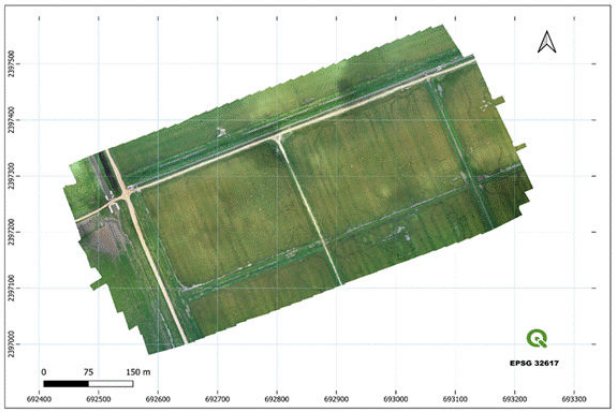


Figura 2. Ortofotografía RGB capturada con dron Phantom 4 (resolución de 5 cm/píxel, 5 de octubre de 2020).

Cálculo de índices espectrales

Se calcularon los siguientes índices espectrales utilizando la Calculadora Raster de QGIS:

- Índices Sentinel-2: NDVI, GNDVI, NDRE.
- Índices RGB: VARI, ExG, CIVE, GLI.

Integración y análisis en QGIS

Las capas raster fueron integradas en el entorno de QGIS mediante superposición espacial. Se generó una malla de puntos de muestreo sistemático ajustada a la resolución de las fuentes de datos. Para las imágenes Sentinel-2 (10-20 m/píxel), se utilizó una separación de 20 metros, garantizando que cada punto representara un píxel independiente y evitando redundancia espacial. En el caso de las ortofotografías RGB de dron (0.05-0.20 m/píxel), se aplicó una separación de 5-10 metros, lo que permitió capturar la variabilidad interna del cultivo. Para este caso se muestrearon 415 puntos, de los cuales se extrajeron los valores de los índices espectrales para el análisis de correlación. Esta definición se realizó siguiendo las recomendaciones metodológicas de la FAO (2023) sobre teledetección agrícola y prácticas comunes en estudios recientes de agricultura de precisión, asegurando la reproducibilidad del análisis.

Validación con observaciones de campo

Los resultados se contrastaron con observaciones directas en campo sobre el estado fisiológico del arroz en etapa de plántula.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Statgraphics Centurion v15.0. Se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r) para evaluar la relación lineal entre los índices espectrales RGB y los índices derivados de Sentinel-2. Los valores de r se interpretaron según Cohen (2013). Los resultados fueron validados con observaciones de campo sobre el estado fisiológico del cultivo de arroz.

Escala de Cohen (2013):

- 0.10-0.29: correlación débil
- 0.30-0.49: moderada
- 0.50-0,.69: fuerte
- ≥ 0.70: muy fuerte

Diagrama de flujo metodológico

El flujo metodológico seguido en el estudio se resume en los siguientes pasos:

- Captura con dron Phantom 4 (RGB): Se realizó un vuelo con dron Phantom 4 el 5 de octubre de 2020 para obtener una ortofoto RGB de alta resolución (5 cm/píxel) del lote 6.
- Imagen Sentinel-2 L2A: Se descargó una imagen Sentinel-2 L2A correspondiente al 4 de octubre de 2020, con bandas espectrales a 10 m y 20 m de resolución.
- Cálculo de índices espectrales: Se calcularon índices RGB (VARI, ExG, CIVE, GLI) y Sentinel-2 (NDVI, GNDVI, NDRE) para caracterizar el estado del cultivo, Figura 3.

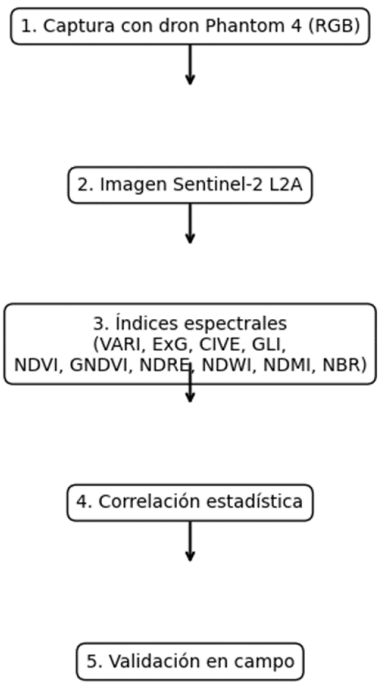


Figura 3. Diagrama representativo del flujo metodológico.

Consideraciones técnicas

QGIS v3.40 Bratislava ofrece herramientas robustas para el procesamiento de imágenes raster, cálculo de índices espectrales y análisis espacial, lo que facilita la reproducibilidad del flujo de trabajo (OSGeo, 2024).

Por su parte, Statgraphics proporciona una interfaz amigable para el análisis estadístico de correlación, permitiendo interpretar de forma precisa la relación entre variables espectrales. La combinación de ambas plataformas permite un análisis multiescalar eficiente y accesible para el monitoreo agrícola.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fotografías de campo

Esta sección presenta evidencias visuales del estado fisiológico del cultivo de arroz en su etapa de plántula Figura 4, así como las condiciones de las parcelas anegadas por riego por gravedad en el lote 6 de la UBPC Las Nuevas, Figura 5. Las imágenes permiten validar visualmente la homogeneidad del cultivo, la densidad de plántulas y la ausencia de estrés hídrico durante la época seca de 2020, Figura 6.

Este índice presenta los mapas temáticos generados a partir de datos espectrales obtenidos en el lote 6 de la UBPC Las Nuevas, Empresa Arrocera Sur del Jíbaro, durante la época seca de 2020. Los mapas permiten visualizar espacialmente la distribución de diferentes índices espectrales que caracterizan el estado del cultivo de arroz en su fase de plántula, Figura 7.

CIVE es un índice empírico que combina las bandas RGB con coeficientes específicos: CIVE=0.441R−0.811G+0.385B+18.78745

- Debido a esta fórmula, los valores de CIVE dependen directamente de la escala de los valores RGB (por ejemplo, 0-255 si la imagen está en 8 bits).
- Por eso, los valores de CIVE pueden variar ampliamente, desde negativos (cuando predomina el verde) hasta positivos (cuando predomina el rojo o azul), y no están acotados entre −1 y 1.

Informe de Correlación RGB vs Sentinel-2

Este informe presenta el análisis de correlación de Pearson entre índices espectrales derivados de imágenes RGB capturadas con dron (VARI, ExG, CIVE) y los índices multiespectrales obtenidos de imágenes Sentinel-2 (NDVI, GNDVI, NDRE). El objetivo es evaluar la relación lineal entre estos pares de índices para validar el uso de índices RGB como proxies confiables en el monitoreo agrícola multiescalar del cultivo de arroz.

Resultados del Análisis de Correlación

Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos indican que existe una correlación significativa entre los índices RGB y los índices satelitales, Tabla 1. En particular, la correlación entre VARI y NDVI es alta, lo que sugiere que el índice VARI puede ser un buen proxy del vigor vegetal. Las correlaciones entre ExG-GNDVI y CIVE-NDRE son moderadas, lo que también respalda su utilidad en el monitoreo agrícola, Figuras 9; 10; 11. Los valores muestreados para cada índice en la malla de pixeles fueron extraídos con la herramienta de la caja de procesos de QGIS *Simple Raster Values*.



Figura 4. Vista general del lote 6 mostrando alta densidad de plántulas distribuidas de forma homogénea. Se observa un desarrollo inicial uniforme del cultivo.



Figura 5. Detalle de una parcela anegada por riego por gravedad. Se evidencia la presencia de agua superficial sin signos de estrés hídrico para las plantas.



Figura 6. Perspectiva aérea del lote 6 capturada con dron, donde se aprecia la distribución regular de las plántulas y la cobertura parcial del suelo característica de la etapa de plántula.

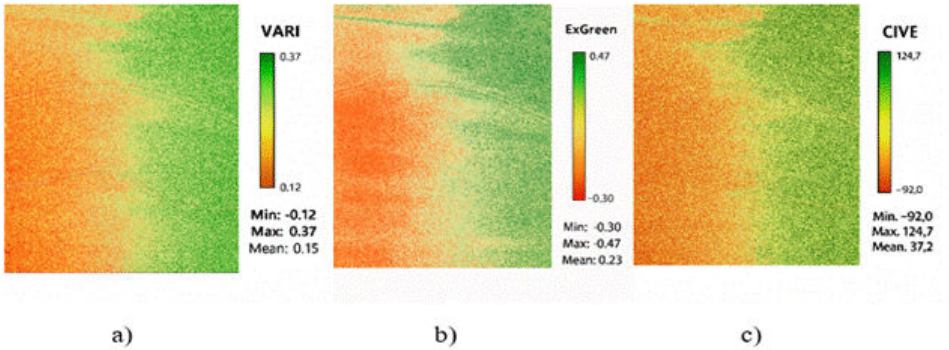


Figura 7. Mapas temáticos RGB (dron Phantom 4): VARI, ExG, CIVE. a) Mapa temático del índice VARI en formato PNG, con su leyenda numérica (mínimo = -0.12, máximo = 0.37, promedio = 0.15) y escala de colores que va del rojo al amarillo y al verde b) Mapa temático del índice ExGreen, Escala de colores: rojo (bajo) → amarillo (medio) → verde (alto). c) Mapa temático del índice CIVE, Escala de colores: rojo (−92.0) → amarillo (≈0) → verde (124.7).

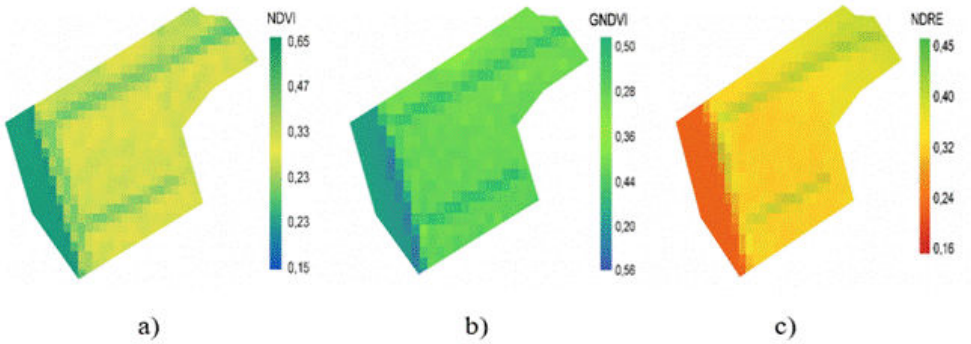


Figura 8. Mapas temáticos de los índices de Sentinel-2: a) NDVI. Marrón/gris → valores negativos o cercanos a 0 (suelo desnudo, agua), Amarillo → 0.1 - 0.3 (vegetación escasa), Verde claro → 0.3 - 0.6 (vegetación moderada), Verde oscuro → 0.6 - 0.9 (vegetación vigorosa). b) GNDVI. Azul claro → 0.20 (baja clorofila, menor vigor), Verde claro → 0.35 (vegetación moderada), Verde intenso → 0.56 (alta clorofila, vigor óptimo). c) NDRE. Rojo intenso → valores bajos (~0.16): zonas con bajo vigor o estrés, Naranja → valores medios (~0.30): vegetación moderada, Amarillo verdoso → transición hacia vigor, Verde claro a verde intenso → valores altos (~0.45): vegetación vigorosa y saludable.

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Pearson obtenidos indican que existe una correlación significativa entre los índices RGB y los índices satelitales

Par de Índices	Coeficiente de Pearson (r)	Interpretación
VARI vs NDVI	0.741	Correlación muy fuerte
ExG vs GNDVI	0.672	Correlación moderada
CIVE vs NDRE	-0.635	Correlación moderada

Gráficos de Dispersión

Descripción del patrón: El diagrama de dispersión muestra una relación positiva y consistente entre VARI (RGB) y NDVI (Sentinel 2), con puntos concentrados a lo largo de una tendencia ascendente. El coeficiente de Pearson obtenido (r≈0.74) indica una correlación muy fuerte, coherente con la sensibilidad de ambos índices al vigor vegetal y al verdor del dosel. Este comportamiento respalda el uso de ortofotos RGB como proxy del vigor cuando no se dispone de NIR.

Descripción del patrón: El gráfico ExG (RGB) vs GNDVI (Sentinel 2) presenta una relación positiva con dispersión moderada y una tendencia lineal clara. El coeficiente de Pearson (r≈0.67) indica correlación moderada, consistente con la sensibilidad de GNDVI al contenido de clorofila (banda verde) y la capacidad de ExG para enfatizar la componente verde en imágenes RGB.

Descripción del patrón: El diagrama CIVE (RGB) vs NDRE (Sentinel-2) muestra una relación inversa con tendencia descendente; el coeficiente de Pearson (r≈−0.64) indica correlación moderada negativa. Esto refleja que CIVE-al combinar canales RGB para extraer vegetación-no captura directamente la sensibilidad del *Red Edge* a clorofila y nitrógeno, pero sí se relaciona de forma inversa con variaciones fisiológicas detectadas por NDRE.

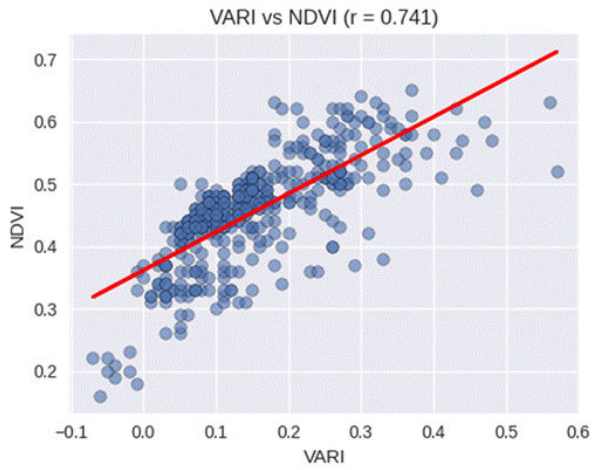


Figura 9. Correlación VARI vs NDVI.

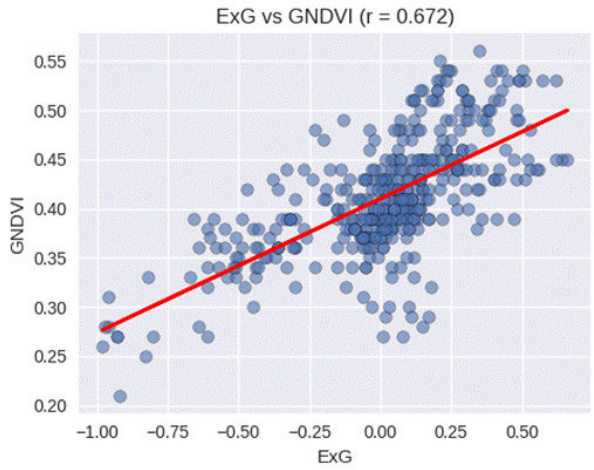


Figura 10. Correlación ExG vs GNDVI.

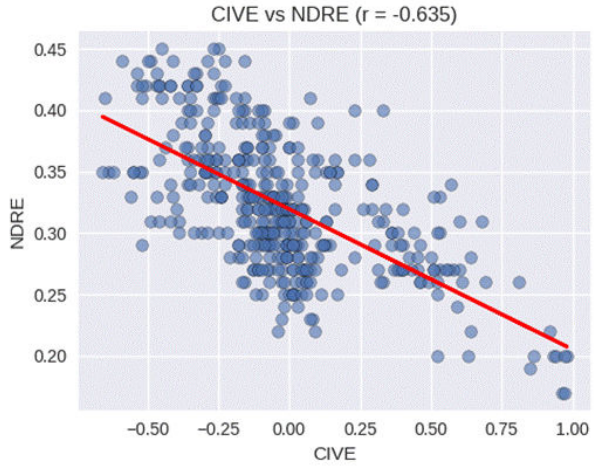


Figura 11. Correlación CIVE vs NDRE.

Interpretación de mapas

- El mapa de NDVI mostró valores predominantemente altos en el lote 6, indicando un vigor vegetal elevado y homogéneo, característico del estado de plántula sin estrés hídrico. Estos resultados coinciden con estudios en Perú, donde el NDVI derivado de Sentinel-2 se ha utilizado para predecir rendimiento de arroz y monitorear vigor en diferentes fases fenológicas (Quille *et al.*, 2024).
- El mapa de VARI, derivado de la ortofoto RGB del dron, reflejó patrones similares al NDVI, con zonas de mayor verdor en el centro del lote, lo que sugiere una buena correlación entre ambos índices. Investigaciones previas han demostrado que VARI puede ser un proxy confiable del NDVI en cultivos de arroz y trigo, especialmente cuando se emplean UAVs de bajo costo (García *et al.*, 2018; MDPI., 2019).
- El mapa de NDRE evidenció variaciones sutiles en el contenido de clorofila y vigor inicial, con valores más altos en las zonas centrales y orientales del lote, lo que puede asociarse a una mayor densidad foliar. Estos hallazgos son consistentes con estudios en Irán e Indonesia, donde el NDRE derivado de Sentinel-2 se ha correlacionado con el contenido de clorofila y nitrógeno en arroz, mostrando sensibilidad en etapas tempranas del cultivo (Wijayanto *et al.*, 2024; Ehsanpour *et al.*, 2025).

Interpretación de índices

- NDVI mostró valores elevados y homogéneos en el lote 6, indicando vigor vegetal. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios de arroz y otros cultivos, donde el NDVI se utiliza como indicador robusto de biomasa y vigor (Tucker, 1979; Quille *et al.*, 2024a).
- NDRE evidenció variaciones sutiles en clorofila en zonas centrales y orientales. Investigaciones en Irán e Indonesia han demostrado que el NDRE es sensible al contenido de clorofila y nitrógeno en arroz, especialmente en etapas tempranas (Wijayanto *et al.*, 2024; Ehsanpour *et al.*, 2025).
- La correlación más fuerte se da entre VARI y NDVI, lo que valida el uso de ortofotos RGB para monitoreo temprano. Estudios en Colombia y México han confirmado que VARI puede ser un proxy confiable del NDVI en arroz y maíz, incluso con cámaras RGB de bajo costo (García *et al.*, 2018; MDPI., 2019).
- VARI se confirma como el índice RGB más robusto para estimar vigor vegetal, consistente con hallazgos internacionales en cultivos de trigo y arroz (Ruiz *et al.*, 2024).

- La correlación moderada de CIVE con NDRE sugiere que RGB puede captar variaciones de clorofila, aunque con menor precisión que el satélite. Este resultado coincide con estudios que señalan la utilidad de índices RGB para discriminar vegetación en ausencia de bandas NIR (Famartínez, 2023).
- El NDRE, aunque menos correlacionado, aporta sensibilidad adicional a clorofila y vigor, lo que refuerza su valor como complemento de NDVI y VARI en monitoreo agrícola (Huete, 1988).
- Los índices RGB presentan correlaciones significativas con los índices satelitales, confirmando su utilidad como proxies en estado de plántula, tal como se ha reportado en proyectos de agricultura de precisión en América Latina (FEDEARROZ, 2018; EcoTV Panamá., 2025).
- Los gráficos confirman que los índices RGB pueden ser usados como proxy de los índices satelitales en estado de plántula, validando la integración dron-satélite para monitoreo multiescalar (AgroLatam, 2025).

Interpretación de las correlaciones

VARI-NDVI

- Interpretación agronómica: La asociación VARI-NDVI sugiere que el verdor captado en el visible (VARI) reproduce adecuadamente la variabilidad del vigor que NDVI detecta con el NIR, especialmente en estado de plántula donde la cobertura es homogénea y el suelo expuesto es limitado. Estudios con UAV han demostrado que NDVI de alta resolución se correlaciona con manejo de fertilización y rendimiento en arroz y trigo, reforzando la validez de proxies RGB en esquemas de monitoreo de bajo costo.
- Interpretación técnica: VARI, calculado a partir de imágenes RGB, reproduce de manera consistente el vigor vegetal captado por NDVI, que incluye la banda NIR. Esto valida el uso de drones RGB como proxy en condiciones de recursos limitados.
- Guan *et al.* (2019) demostraron que NDVI derivado de UAVs se correlaciona con rendimiento y fertilización en arroz y trigo. Goigochea *et al.* (2024) confirmaron que índices multitemporales como NDVI predicen rendimiento de arroz con alta precisión.

ExG y GNDVI

- Interpretación agronómica: La correspondencia entre ExG y GNDVI es esperable en etapas tempranas del arroz, donde el contraste vegetación suelo y la variabilidad de clorofila se reflejan con fuerza en el canal verde. Investigaciones con UAV multispectral en arroz han reportado relaciones útiles entre índices basados en el verde y métricas de rendimiento, apoyando el uso de ExG como indicador operativo cuando se prioriza resolución espacial y costo.
- Interpretación técnica: ExG enfatiza la componente verde en imágenes RGB, mientras que GNDVI es sensible al contenido de clorofila. La correlación confirma que ambos índices captan variaciones nutricionales en etapas tempranas del arroz.
- García *et al.* (2018) reportaron correlaciones significativas entre GNDVI y vigor en arroz usando UAVs. Goigochea *et al.* (2024) validaron que índices basados en el verde predicen rendimiento en la Amazonía peruana.

CIVE vs NDRE

- Interpretación agronómica: NDRE es más sensible a cambios sutiles en clorofila y estado nutricional que los índices RGB, especialmente en etapas tempranas y bajo variaciones leves de densidad foliar. La relación negativa sugiere que aumentos en NDRE (mayor clorofila) se asocian con menores valores de CIVE en ciertas condiciones de iluminación y contraste, lo que es consistente con estudios que recomiendan NDRE para seguimiento fisiológico y manejo hídrico en arroz.
- Interpretación técnica: NDRE, derivado de la red edge, es altamente sensible a clorofila y nitrógeno, mientras que CIVE combina canales RGB para extraer vegetación. La relación inversa refleja que aumentos en clorofila (NDRE alto) se asocian con menores valores de CIVE, debido a diferencias en sensibilidad espectral.
- Nageswara *et al.* (2023) confirmaron la utilidad de NDRE para detectar variaciones fisiológicas en arroz. Pedroso de Lima et al. (2021) señalaron que NDRE es clave para evaluar prácticas de riego y nutrición en arroz.

Validación en campo

- Las observaciones directas en el lote 6 confirmaron la ausencia de estrés hídrico, lo cual coincide con los valores elevados de NDVI y VARI, que reflejaron vigor vegetal homogéneo en toda la parcela.
- La homogeneidad del estado de plántula observada en campo se correspondió con los patrones espectrales de los mapas temáticos, donde NDVI y VARI mostraron valores altos y consistentes en el centro y bordes del lote.
- Las variaciones sutiles de NDRE en zonas centrales y orientales se relacionaron con diferencias leves en densidad foliar observadas en campo, confirmando su sensibilidad al contenido de clorofila.

- Esta correspondencia entre observaciones de campo y resultados espectrales valida el uso de índices RGB como proxies confiables de índices satelitales, en concordancia con estudios internacionales que han reportado correlaciones similares en arroz y otros cultivos (García *et al.*, 2018; Quille *et al.*, 2024; Wijayanto *et al.*, 2024).

CONCLUSIONES

- Los índices RGB derivados de imágenes de dron mostraron correlaciones significativas con los índices multiespectrales de Sentinel-2, validando su uso como proxies confiables en condiciones de recursos limitados.
- La correlación entre VARI y NDVI alcanzó un valor de $r \approx 0.74$, lo que corresponde a una correlación muy fuerte según la escala de Cohen (1988).
- La integración de imágenes de dron y satélite constituye una estrategia eficaz para el monitoreo agrícola multiescalar, permitiendo caracterizar el estado fisiológico del arroz en etapas tempranas.
- Se identifican limitaciones en el uso de cámaras RGB, relacionadas con la sensibilidad reducida a variaciones espectrales específicas, lo que sugiere complementar con sensores multiespectrales en estudios futuros.

RECOMENDACIONES

- Implementar el uso combinado de imágenes RGB de dron y Sentinel-2 para el monitoreo agrícola multiescalar en condiciones de recursos limitados.
- Extender la validación de correlaciones a diferentes etapas fenológicas del arroz y a otros cultivos estratégicos de la región.
- Complementar las cámaras RGB con sensores multiespectrales o hiperespectrales en estudios futuros, para mejorar la sensibilidad a variaciones espectrales específicas.
- Integrar los resultados en programas de agricultura de precisión locales, fortaleciendo la toma de decisiones sobre riego y fertilización.
- Promover la capacitación de técnicos y productores en el uso de herramientas de teledetección (QGIS, drones, Sentinel-2) para garantizar sostenibilidad y replicabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROLATAM: Agricultura de precisión en América Latina: avances en drones y digitalización, [en línea], 2025, Disponible en: https://www.agrolatam.com.

COHEN, J.: Statistical power analysis for the behavioral sciences, Ed. routledge, DOI: https://doi.org/10.4324/9780203771587 p., 2013, ISBN: 0-203-77158-3.

COPERNICUS: Sentinel-2 mission overview, [en línea], Copernicus Programme, 2024, Disponible en: https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/sentinel-2.

ECOTV PANAMÁ.: Panamá revoluciona el cultivo de arroz con blockchain y agricultura de precisión, [en línea], Ecotvpanama, 2025, Disponible en: https://www.ecotvpanama.com.

EHSANPOUR, A.; GHANBARI, P.E.; AMINI, S.: "Monitoring chlorophyll in rice fields using Sentinel 2 and UAV images and applying machine learning", Sepehr Journal, 2025, ISSN: 2588-3860, DOI: https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2045093.3102.

FAMARTÍNEZ, A.: Sentinel-2 en R: cálculo de índices y correlación, [en línea], GitHub, 2023, Disponible en: https://github.com.

FAO: "Digital agriculture transformation and remote sensing applications", En: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia, 2023, DOI: . https://doi.org/10.4060/cc5170en.

FEDEARROZ: Hacia una agricultura de precisión en el cultivo del arroz. Federación Nacional de Arroceros de Colombia, [en línea], 2018, Disponible en: https://fedearroz-website-aws.s3.amazonaws.com/media/documents/cartilla_precision_2025.pdf.

GARCÍA, C.D.A.; RAMÓN, V.J.A.; ALZATE, V.D.F.; PALACIOS, G.J.R.: "Dynamics of the indices NDVI and GNDVI in a rice growing in its reproduction phase from multi-spectral aerial images taken by drones", En: International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change, Ed. Springer, pp. 106-119, 2018, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3_7.

GOIGOCHEA, D.; JUSTINO, P.M.; VEGA, H.S.S.; SANCHEZ, O.M.; LOBATO, G.R.H.; SANTILLAN, G.M.D.; GANOZA, R.J.J.; ORE, A.Z.L.; AGURTO, P.A.I.: "Yield prediction models for rice varieties using UAV multispectral imagery in the Amazon lowlands of Peru", AgriEngineering, 6(3): 2955-2969, 2024, ISSN: 2624-7402, DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering6030170.

GUAN, S.; FUKAMI, K.; MATSUNAKA, H.; OKAMI, M.; TANAKA, R.; NAKANO, H.; SAKAI, T.; NAKANO, K.; OHDAN, H.; TAKAHASHI, K.: "Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs", Remote Sensing, 11(2): 112, 2019, ISSN: 2072-4292, DOI: https://doi.org/10.3390/rs11020112.

HUETE, A.R.: "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", Remote sensing of environment, 25(3): 295-309, 1988, ISSN: 0034-4257, DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X.

INFOBAE: Cuba agudiza su crisis alimentaria: la producción de arroz cayó a mínimos históricos, [en línea], Infobae, 2025, Disponible en: https://www.infobae.com/america/amer-

ica-latina/2025/04/02/cuba-agudiza-su-crisis-alimentaria-la-produccion-de-arroz-cayo-a-minimos-historicos/.

MDPI.: "Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application and rice yield", Remote Sensing, 11(2): 112, 2019, ISSN: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/2/112.

MONREAL, P.: Economista desmiente relato del consumo excesivo de arroz en Cuba, [en línea], Cibercuba, 2025, Disponible en: https://www.cibercuba.com.

NAGESWARA, R.D.; BADRI, J.; SUNDARAM, R.: "Sentinel-2 Derived Indices to Understand Rice Vegetation Dynamics at Pixel Level", En: National Conference on CONTROL INSTRUMENTATION SYSTEM CONFERENCE, Ed. Springer, pp. 153-165, 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5157-0_13.

OSGEO: QGIS v3.40 Bratislava: User Guide, 2024.

PEDROSO DE LIMA, I.; JORGE, R.G.; DE LIMA, J.L.P.: "Remote sensing monitoring of rice fields: Towards assessing water saving irrigation management practices", Frontiers in Remote Sensing, 2: 762093, 2021, ISSN: 2673-6187, DOI: https://doi.org/10.3389/frsen.2021.762093.

PERIÓDICO GIRÓN: ¿Qué perspectivas tiene la producción de arroz en Cuba?, [en línea], Girón, 2025, Disponible en: https://giron.cu/2025/03/05/produccion-de-arroz-en-cuba/.

PONVERT, D.D.R.; LAU, A.: "Uso de la teledetección en la gestión de desastres "naturales" en la agricultura. Apuntes y reflexiones.", 2018.

QUILLE, M.J.A.; RUIZ, L.A.; RAMOS, F.L.: "Multiseasonal analysis of rice crop yield prediction with Sentinel-2 time series and UAV imagery in Lambayeque (Peru)", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 421-426, 2024a, ISSN: 1682-1750, DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-421-2024.

QUILLE, M.J.A.; RUIZ, L.A.; RAMOS-FERNÁNDEZ, L.: "Multiseasonal analysis of rice crop yield prediction with Sentinel-2 time series and UAV imagery in Lambayeque (Peru)", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 421-426, 2024b, ISSN: 1682-1750, DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-421-2024.

RUIZ, P.M.E.; GARCÍA, R.R.; MACHADO, G.N.: "Aplicación de drones en la agricultura internacional y cubana. Revisión", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 33(1), 2024, ISSN: 2071-0054.

TUCKER, C.J.: "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", Remote sensing of Environment, 8(2): 127-150, 1979, ISSN: 0034-4257, DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

WIJAYANTO, Y.; SAFITRI, M.; PURNAMASARI, I.; BUDIMAN, S.A.; SAPUTRA, T.W.; REGAR, A.F.; RISTIYANA, S.: "Estimating the contents of Chlorophyll, Nitrogen, and Yields on Rice Through Sentinel-2 Vegetation Indices in Heterogeneous Land Management", The Indonesian Journal of Geography, 56(3): 357-367, 2024, ISSN: 0024-9521, DOI: https://doi.org/10.22146/ijg.87159.