



## CONDICIONES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DE ARROZ CON IMÁGENES DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Conforme Ponce Andreina Monserrate  
Universidad Técnica de Manabí - UTM. Lodana, Ecuador  
Facultad de Ingeniería agrícola  
Aconforme8332 @utm.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-6019-9969>

Anthony Steven Rodríguez Mala  
Universidad Técnica de Manabí - UTM. Lodana, Ecuador  
Facultad de Ingeniería agrícola  
Arodriguez1782@utm.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0006-7594-3080>

Henry Antonio Pacheco Gil  
Universidad Técnica de Manabí - UTM. Lodana, Ecuador  
Facultad de Ingeniería agrícola  
henry.pacheco@utm.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-9997-9591>

**Autor para correspondencia:** Aconforme8332 @utm.edu.ec

**Recibido:** 07/05/2024

**Aceptado:** 27/06/2024

**Publicado:** 20/07/2024

### RESUMEN

La teledetección es una herramienta cada vez más utilizada para mejorar la producción de cultivos en respuesta a la creciente demanda global de alimentos y al impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria. El uso de esa herramienta ha permitido monitorear las condiciones de los cultivos mediante el cálculo de índices de vegetación con imágenes multiespectrales. Como objetivo de este trabajo se propuso analizar las condiciones agronómicas del cultivo

de arroz bajo diferentes condiciones de fertilización, en un área productiva de la provincia de Manabí. Se capturaron imágenes RGB mediante vuelos fotogramétricos utilizando el dron Phantom 4, las imágenes fueron procesadas y analizadas a través del software PIX4D y se calcularon índices de vegetación RGB (Vlgreen, SIVE, GLI, CIVE, ExG). Se compararon los resultados obtenidos para las tres variedades de arroz (Impacto, Elite, SFL11) presentes en el cultivo y los dos tipos



de fertilizantes (sintético y orgánico). Los resultados obtenidos muestran que de los 5 índices estudiados el Vlgreen (índice normalizado verde rojo) resultó con el mayor potencial para diferenciar tratamientos orgánicos de los sintéticos. Las mayores magnitudes del índice, para las primeras 10 parcelas, se reflejan en los tratamientos sintéticos en el 80 % de los casos, con valores que oscilan

entre 0,174137 y 0,1105. El resto de los índices muestran bajo potencial para discriminar los tratamientos sintéticos de los orgánicos. Respecto a las variedades no se encontraron diferencias significativas entre los índices.

**Palabras clave:** RGB, índices de vegetación, Vlgreen, PIX4D.

## **TRIPULADOS. AGRONOMIC CONDITIONS OF RICE CULTIVATION WITH IMAGES FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES**

### **ABSTRACT**

Remote sensing is an increasingly used tool to improve crop production in response to growing global demand for food and the impact of climate change on food security. *The use of this tool has made it possible to monitor crop conditions by calculating vegetation indices with multispectral images. The objective of this work was to analyze the agronomic conditions of rice cultivation under different fertilization conditions in a productive area of the province of Manabí. RGB images were captured by photogrammetric flights using the Phantom 4 drone, the images were processed and analyzed through PIX4D software and RGB vegetation*

*indices (Vlgreen, SIVE, GLI, CIVE, ExG) were calculated. The results obtained for the three rice varieties (Impacto, Elite, SFL11) present in the crop and the two types of fertilizers (synthetic and organic) were compared. The results obtained show that of the 5 indices studied, the Vlgreen (normalized index green, red) was found to have the greatest potential to differentiate organic treatments from synthetic ones. The highest magnitudes of the index, for the first 10 plots, are reflected in synthetic treatments in 80% of cases, with values ranging from 0.174137 to 0.1105. The rest of the indices show low potential to discriminate between synthetic and organic treatments. Regarding the varieties,*



no significant differences were found between the indices.

**Keywords:** RGB, vegetation indices, Vlgreen, PIX4D.

## 1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cereales más importantes a escala mundial, se originó hace casi 10.000 años en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical (Zurita, 2021), y hoy ocupa el segundo lugar de superficie cosechada a nivel global después del trigo (Delgado & Zorrilla, 2019), produciéndose en más de 113 países y sirviendo como alimento básico a más de la mitad de la población humana.

El arroz es uno de los principales alimentos básicos de los hogares ecuatorianos y se ha convertido en el principal cultivo en la región costera del país, con unas 260.000 hectáreas cosechadas, por lo que la mayor parte de la producción se concentra en las provincias de Guayas y Los Ríos. (Martin et al., 2021)

Ante la creciente demanda de alimentos a nivel mundial y los efectos del calentamiento global en la seguridad alimentaria, mejorar la eficiencia del cultivo de arroz puede reducir las pérdidas y el impacto ambiental, aumentar el rendimiento por unidad de tierra y hacer un uso más eficiente de los recursos, de forma tal que pueda tener una mejor adaptación al cambio climático y un

incremento de la rentabilidad para los agricultores (de la Torre et al., 2021). Es por esto que, desde años recientes se ha implementado la agricultura de precisión, la cual hace uso de la teledetección a partir de sensores remotos ubicados en satélites, vehículos aéreos no tripulados (drones), aviones y otras plataformas para la adquisición de datos e imágenes espectrales de alta resolución espacial y temporal (Inoue, 2020), que ayudan a conocer las condiciones del suelo, la humedad, la salud de las plantas y otros factores clave para mejorar la optimización de los recursos y en consecuencia la producción agrícola. (Bautista et al., 2022)

A diferencia de la agricultura convencional, donde se aplican fertilizantes u otros insumos de manera uniforme sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los factores asociados al buen desarrollo de los cultivos, las tecnologías geoespaciales tienen el potencial de automatizar y simplificar la recopilación y el análisis de información que permita a los agricultores utilizar los insumos de cultivo de manera más eficiente (Montilla-Pacheco et al., 2021), incluidos fertilizantes, pesticidas,



agua para labranza y riego, y también métodos de acceso más eficaces para aumentar el rendimiento y la calidad de sus cultivos sin contaminar el medio ambiente. (Malam, 2020)

Particularmente, el uso de drones en la agricultura ha permitido operaciones de seguimiento preciso en cuanto al uso de fertilizantes durante la producción de diversos cultivos, entre ellos, el arroz, lo que mejora la eficiencia operativa y reduce la intensidad de la mano de obra de los productores y los costos laborales (Yu et al., 2022).

Además, son utilizados para monitorear en los cultivos la presencia de enfermedades y pestes mediante la variación en la reflectancia espectral de la planta debido a los cambios en los parámetros fisiológicos y bioquímicos que estas sufren, tales como pérdida de pigmentación, contenido de agua y proteínas, y modificaciones en su estructura y morfología. (Zheng *et al.*, 2023)

Actualmente, entre los sensores incluidos en los vehículos aéreos no tripulados están las cámaras digitales, termográficas infrarrojas, sensores multiespectrales/hiperespectrales, sensores de fluorescencia de clorofila y sensores LIDAR (Zheng *et al.*, 2022). Los sensores multiespectrales permiten conocer y monitorear

espacial y temporalmente las propiedades específicas de la vegetación (biomasa, clorofila, contenido de agua, carotenoides e índice de área foliar) a partir de los cambios observados en la reflectancia espectral mediante la captura de imágenes de alta resolución que proporcionan información en las diferentes bandas del espectro electromagnético, incluido el espectro visible. (Ryu *et al.*, 2022)

Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multiespectrales y RGB se pueden utilizar para diagnosticar de forma no destructiva las condiciones de los cultivos siendo una alternativa de bajo costo en comparación con otros métodos geoespaciales (Barbosa et al., 2019; Zheng et al., 2023).

A pesar de esto, para los pequeños y medianos agricultores, incorporar sensores multiespectrales adicionales al sensor RGB en los drones implica un aumento significativo de los costos y limita el acceso a esta tecnología dado al menor acceso a los recursos económicos. (Pacheco y Montilla, 2021)

Algunos de los cálculos de índices de vegetación como los índices NDVI o SAVI tienen un componente que depende de bandas infrarrojas operativas de infrarrojo cercano (NIR), lo que excluye la posibilidad de



calcular los índices sin sensores especiales. (Gis & Back, 2021)

En este contexto, se han propuesto algunos métodos e índices entre ellos están: 1) el Índice de Vegetación de Color (CVI) que se utiliza para estimar la densidad de la vegetación y se calcula utilizando las bandas roja, verde y azul; 2) el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) usado para detectar la presencia de agua y se calcula empleando las bandas verde y azul; y

## 2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 2.1. Productos fotogramétricos

El estudio involucró la ejecución de vuelos fotogramétricos para la captura de 600 fotografías aéreas con el objetivo de generar datos altamente detallados y precisos. Estas imágenes fueron procesadas para crear una ortofoto con una resolución excepcional de 2.5 cm, ofreciendo una representación visual extremadamente nítida del área de cultivo de arroz bajo estudio.

La calidad de los vuelos fotogramétricos con drones ha sido ratificada por de La Llata (2023) y Silva (2024) al indicar que estos equipos al realizar vuelos a baja altitud permiten la obtención de datos detallados y de alta calidad. La integración de puntos de control RTK

alternativos, calculados y validados utilizando la óptica convencional con bandas visibles que han mostrado resultados confiables y precisos,

3) el Índice de Saturación (SI) que puede medir la saturación del color y se calcula a partir de las bandas roja, verde y azul (Sergieieva, 2022). Por lo tanto, este trabajo de titulación propone los objetivos que se describen a continuación.

garantiza una precisión geométrica excepcional, crucial para la generación de ortofotografías y MDE tridimensionales. Este proceso encuentra aplicaciones clave en la planificación territorial, proporcionando información detallada sobre el uso del suelo, topografía y desarrollo urbano.

Además de la generación de la ortofoto, se llevó a cabo la construcción de una nube de puntos densa, la cual contuvo más de 2.000.000 de puntos. Esta nube de puntos capturó con gran precisión la topografía del terreno y la estructura de los cultivos de arroz, proporcionando una base tridimensional completa para el análisis subsiguiente.



En paralelo, se generaron modelos digitales del terreno y de superficie, caracterizados por su alta precisión y detalle.

Estos modelos brindaron información esencial sobre la elevación del terreno y la configuración de la superficie, mediante lo cual se alcanza una comprensión exhaustiva de la distribución y la altura del cultivos. (Simões *et al.*, 2023)

El análisis detallado de la respuesta espectral del cultivo de arroz se realizó utilizando las imágenes aéreas capturadas durante los vuelos.

Este análisis permitió identificar características espectrales específicas asociadas con diferentes estados de salud y desarrollo de los cultivos, ofreciendo información valiosa para la evaluación de estos y la detección temprana de problemas.

Finalmente, todos estos datos fueron integrados en sistemas de información geográfica (SIG) y software de análisis especializado, lo que facilitó la visualización tridimensional detallada del área de cultivo y el análisis espacial que fundamenta la toma de decisiones agrícolas.

De acuerdo con Da Silva *et al.* (2024) este enfoque integral permite una

comprensión completa de los cultivos y en este caso particular el arroz estudiado, y por tanto, constituye una base robusta para la investigación y la toma de decisiones en el campo agrícola.

Por su parte las imágenes RGB desempeñaron un papel fundamental en el estudio, especialmente en el cálculo de índices espectrales para evaluar la salud y el desarrollo del cultivo de arroz.

Estos índices se derivaron de la combinación de diferentes bandas espectrales, específicamente en el rango visible, que permitieron cuantificar características específicas de las plantas, teniendo en los últimos años un crecimiento significativo en las investigaciones que usan estos índices, tal como se reporta en Gozálvez (2024).

Los índices espectrales calculados a partir de las imágenes RGB suministraron información clave sobre la salud y el desarrollo del cultivo en estudio, permitiendo una evaluación precisa y cuantitativa que puede servir de insumo para que los productores adopten medidas estratégicas sobre diferentes aspectos del agroecosistema.

El uso de cámaras RGB en drones para el cálculo de índices espectrales



presenta varias ventajas significativas:

### Costo y Accesibilidad:

Las cámaras RGB son más económicas y ampliamente disponibles en comparación con las cámaras multispectrales o hiperespectrales. Esto hace que los drones equipados con cámaras RGB sean más accesibles para agricultores, investigadores y profesionales que deseen realizar análisis espectrales en sus cultivos.

### Simplicidad en la adquisición de datos:

Las cámaras RGB capturan imágenes en tres bandas espectrales (rojo, verde y azul) que son fácilmente interpretables y procesables. Esto simplifica el proceso de adquisición de datos, ya que no es necesario manejar múltiples bandas espectrales como en el caso de cámaras multispectrales o hiperespectrales.

### Flexibilidad y versatilidad:

Las cámaras RGB permiten capturar tanto información visual como datos espectrales en una sola toma. Esto ofrece flexibilidad para realizar análisis visuales y espectrales en las mismas imágenes, lo que simplifica la integración de datos y la interpretación de resultados.

### Alta resolución espacial:

Las cámaras RGB suelen ofrecer una alta resolución espacial, posibilitando la captura de detalles finos y precisos en las imágenes. Esto es especialmente beneficioso para el análisis de campos agrícolas, donde la detección de características específicas de los cultivos, como enfermedades o estrés hídrico, puede requerir una alta resolución espacial.

### Rápida velocidad de muestreo:

Los drones equipados con cámaras RGB pueden cubrir grandes áreas de manera rápida y eficiente, lo que permite la adquisición frecuente de datos sobre el estado de los cultivos. Esta capacidad de muestreo frecuente es de inigualable ayuda para el seguimiento continuo de la salud de los cultivos y la detección temprana de problemas.

En síntesis, el uso de las mencionadas cámaras en drones para el cálculo de índices espectrales ofrece una solución rentable, simple y versátil para el análisis de cultivos y consecuentemente para un manejo más eficiente del sector agrícola.

### 2.2. Índices espectrales RGB del cultivo de arroz bajo diferentes condiciones de fertilización.

En este estudio sobre el cultivo de arroz y sus respuestas a diferentes



tratamientos de fertilización se observaron notables diferencias en los índices espectrales, especialmente en el VIGREEN, que es un indicador crucial de la salud y densidad del dosel vegetal.

Al analizar los datos se encontró que los tratamientos que utilizaron fertilizantes sintéticos, para el 80% de las 10 parcelas con los índices más elevados, mostraron consistentemente los valores más altos de VIGREEN, con promedios superiores a 0,11 y el SAVI con valores superiores 0,16. Esto sugiere que el uso de fertilizantes sintéticos promueve una mayor densidad y salud del dosel vegetal en comparación con los tratamientos que emplearon fertilizantes orgánicos u otras prácticas de fertilización.

### 1.1. Productos Supremacía del VIGREEN Y SAVI

Además del VIGREEN y SAVI, también se evaluaron otros índices espectrales como el CIVE, GLI y ExG, encontrándose amplia variabilidad en los valores obtenidos, resultando los dos primeros con la mayor potencialidad para estimar el estado nutricional del cultivo, lo cual es consistente con lo reportado por Pacheco y Montilla (2020) quienes encontraron al VIGREEN como el mejor índice RGB para analizar condiciones

del suelo. La superioridad de estos índices puede explicarse por las siguientes razones:

#### Sensibilidad al Color Verde:

El VIGREEN, es un índice espectral que se centra en la reflectancia de la luz en la banda verde del espectro electromagnético, que está estrechamente relacionada con la clorofila, el pigmento responsable de la fotosíntesis.

Dado que los fertilizantes sintéticos suelen proporcionar una mayor disponibilidad de nutrientes, incluidos aquellos necesarios para la síntesis de clorofila, los cultivos tratados con estos fertilizantes tienden a mostrar una mayor concentración de clorofila y, por lo tanto, valores más altos en el VIGREEN, en comparación con los tratados con fertilizantes orgánicos.

#### Ajuste del Efecto del Suelo:

El SAVI es un índice que ajusta la reflectancia de la vegetación para tener en cuenta el efecto del suelo, lo que lo hace más sensible a la variabilidad en la composición y el estado del suelo.

#### Exclusión del Color Verde

El EXG es un índice que excluye la reflectancia en la banda verde y se centra en las diferencias entre las longitudes de onda del rojo y el azul, lo que lo hace sensible a los cambios





en la estructura y la distribución de la vegetación.

Tomando en cuenta que los fertilizantes sintéticos pueden promover un crecimiento más denso y uniforme de la vegetación, los cultivos tratados con estos pueden mostrar valores más altos de EXG respecto a los tratamientos orgánicos capaces de tener una vegetación más dispersa o menos densa.

información adicional sobre la salud y la estructura del dosel vegetal que puede ser influenciada por la composición y el estado del suelo, así como por la distribución espacial de la vegetación.

La tabla 4 proporciona 6 índices espectrales RGB calculados para diferentes variedades de arroz y tipos de fertilización, los datos están

Con base en los resultados descritos, el mejor comportamiento del VIGREEN y SAVI en comparación con el CIVE, GLI, y EXG para diferenciar cultivos con fertilización sintética y orgánica se debe a su sensibilidad a la concentración de clorofila, que suele ser más alta en los cultivos tratados con fertilizantes sintéticos debido a su mayor disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, otros índices como el EXG proporcionan

organizados por variedad de arroz y tipo de fertilización, lo que permite comparar los efectos de diferentes condiciones de cultivo en los índices espectrales.

**Tabla 4.** *Valores promedio de los distintos índices espectrales para cada una de las parcelas del diseño experimental.*



Variedad	Tratamiento	GLI	CIVE	ExG	Vigreen	SAVI
SFL11	Orgánico	0,267187	18,651928	0,391745	0,071462	0,106735
Élite	Orgánico	0,281222	18,657654	0,414077	0,071733	0,107208
Impacto	Orgánico	0,204783	18,623881	0,293711	0,071969	0,107508
SFL11	Sintético	0,235889	18,643832	0,34266	0,072551	0,108363
SFL11	Sintético	0,235335	18,642688	0,340317	0,073236	0,109399
SFL11	Orgánico	0,249395	18,648842	0,364289	0,083073	0,124083
Élite	Orgánico	0,2141	18,630695	0,309199	0,083283	0,124509
Élite	Sintético	0,322647	18,667358	0,300476	0,084571	0,126113
Impacto	Orgánico	0,240276	18,644208	0,347318	0,085729	0,128049
Impacto	Orgánico	0,202972	18,618168	0,289294	0,086784	0,129599
SFL11	Orgánico	0,223995	18,638601	0,322938	0,090358	0,134589
Élite	Orgánico	0,221218	18,636583	0,318589	0,091319	0,136273
Impacto	Sintético	0,246143	18,646385	0,359345	0,098765	0,147377
SFL11	Orgánico	0,213398	18,626459	0,305512	0,099052	0,147834
Élite	Orgánico	0,210994	18,624217	0,300476	0,108063	0,161298
Élite	Sintético	0,199273	18,606017	0,282939	0,11051	0,164888
SFL11	Sintético	0,204696	18,618957	0,292544	0,11554	0,172273
Impacto	Sintético	0,218088	18,636031	0,317216	0,116963	0,174044
Élite	Sintético	0,232519	18,639157	0,334005	0,120771	0,179778
Élite	Sintético	0,211829	18,626406	0,302721	0,124228	0,185229
Impacto	Orgánico	0,21649	18,633415	0,31365	0,125896	0,187791
SFL11	Sintético	0,242756	18,645654	0,351915	0,129803	0,193383
Impacto	Sintético	0,190643	18,595559	0,268837	0,143098	0,213614
Impacto	Sintético	0,172263	18,563896	0,24353	0,174137	0,259252

### 2.3. Relaciones entre los índices espectrales y las condiciones agronómicas del cultivo de arroz.

Las variables que pueden explicar el mejor comportamiento del cultivo de arroz con fertilizante sintético en

comparación con el orgánico, reflejado por el VIGREEN, consideran

diversos factores agronómicos y ambientales que podrían estar influyendo en esta diferencia, lo cual, según Martínez y Rodríguez (2024) se resume de la siguiente manera.



### Contenido Nutricional:

Los fertilizantes sintéticos suelen proporcionar una fuente de nutrientes más concentrada y fácilmente disponible para las plantas en relación con los fertilizantes orgánicos.

Esta situación se pone de manifiesto en una mayor absorción de los llamados nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que se reflejaría en una mayor salud y vigor de las plantas, y por ende, en valores más altos de VIGREEN y SAVI.

Resultados similares se reportan en Colovic et al. (2024) al indicar que el índice de área verde mostró una contribución significativa en la predicción del índice de área foliar, conductancia estomática, transpiración foliar y contenido relativo de agua.

### Disponibilidad de Nutrientes:

Los productos sintéticos pueden liberar nutrientes de manera más rápida y predecible en comparación con los fertilizantes orgánicos, que requieren descomposición microbiana para liberar nutrientes en formas disponibles para las plantas.

Esto podría garantizar una disponibilidad constante de nutrientes durante períodos críticos de crecimiento, lo que favorecería un

mejor desarrollo del cultivo de arroz, lo cual se puede verificarse con los índices SAVI y VIGREEN.

### Absorción de Agua

Los fertilizantes sintéticos probablemente están asociados con un mejor manejo del agua en el suelo debido a su capacidad para mejorar la estructura del suelo y aumentar la retención de humedad, que en definitiva, da la posibilidad de una mejor absorción hídrica por parte de las plantas, lo que contribuiría a un crecimiento más vigoroso y, por ende, a valores más altos de SAVI y VIGREEN.

### Control de Malezas y Enfermedades:

Los fertilizantes sintéticos ayudan a reducir la competencia de malezas y la incidencia de enfermedades en comparación con los fertilizantes orgánicos, lo que permitiría un crecimiento más saludable de las plantas, y sin interferencias de factores estresantes externos.

### Frecuencia y Método de Aplicación:

La frecuencia y el método de aplicación de los fertilizantes también pueden influir en el comportamiento del cultivo de arroz.

Los fertilizantes sintéticos suelen aplicarse de manera más precisa y controlada, con lo cual se garantizaría una nutrición más uniforme de las plantas a lo largo del ciclo de crecimiento.



Sintetizando, se resalta que el mejor comportamiento del cultivo de arroz con fertilizante sintético en comparación con el orgánico, reflejado por el VIGREEN y SAVI podría explicarse por una combinación de factores que incluyen una mejor disponibilidad y absorción de nutrientes, un manejo más eficiente del agua, un menor impacto de malezas y enfermedades, y una aplicación más precisa y controlada de los fertilizantes.

La fertilización sintética ha sido durante mucho tiempo una práctica común en la agricultura moderna debido a su capacidad para proporcionar nutrientes de manera rápida y controlada. Sin embargo, también conlleva ciertas desventajas en comparación con la fertilización orgánica, que utiliza materiales naturales para enriquecer el suelo y nutrir las plantas. A continuación, se analizan algunas de las desventajas de la fertilización sintética:

### Impacto Ambiental Negativo:

La fertilización sintética puede contribuir a la contaminación del suelo y del agua debido a la escorrentía de nutrientes sintéticos, como nitratos y fosfatos, que pueden llegar a cuerpos de agua cercanos y causar la eutrofización. Además, la producción de fertilizantes sintéticos implica la extracción de recursos

naturales y la emisión de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al cambio climático.

### Pérdida de Fertilidad del suelo:

El uso prolongado de fertilizantes sintéticos conlleva a la degradación de la estructura del suelo y a la pérdida de su fertilidad a largo plazo. Esto se debe a la dependencia de los cultivos de los nutrientes inmediatamente disponibles en los fertilizantes, así, es de esperar un agotamiento de los nutrientes naturales del suelo y reducir su capacidad para retener agua y nutrientes.

### Dependencia Económica:

La fertilización sintética a menudo implica costos más altos para los agricultores en comparación con la fertilización orgánica. La compra regular de fertilizantes sintéticos puede crear una dependencia económica a largo plazo, especialmente en áreas donde los precios de los fertilizantes son volátiles o inaccesibles para los agricultores de bajos recursos.

### Riesgos para la Salud Humana:

El uso excesivo de fertilizantes sintéticos puede resultar en la acumulación de residuos químicos en los alimentos cultivados, lo que plantea riesgos para la salud humana. Además, los trabajadores agrícolas que manejan y aplican estos fertilizantes pueden estar expuestos a



productos químicos tóxicos que pueden causar problemas de salud a corto y largo plazo.

### Desbalance Nutricional

Aunque los fertilizantes sintéticos pueden proporcionar una rápida disponibilidad de nutrientes, también dan paso al desequilibrio en la relación entre los diferentes elementos necesarios para el crecimiento de las plantas. Ello se traduce en deficiencias o excesos de ciertos nutrientes, lo que afecta negativamente la salud y el rendimiento de los cultivos a largo plazo.

Si bien, la fertilización sintética ofrece beneficios inmediatos en términos de suministro de nutrientes, también conlleva importantes desventajas ambientales, económicas y de salud en comparación con la fertilización orgánica, de allí que sea de enorme importancia considerar estos aspectos al tomar decisiones sobre la gestión de nutrientes en la agricultura para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas.

En lo que se refiere a mejoras en la efectividad de la fertilización orgánica es necesario tomar en cuenta varias recomendaciones que promuevan un suministro equilibrado de nutrientes y fomenten un

ambiente favorable para el crecimiento vegetal.

Entre estas recomendaciones estaría la selección de fertilizantes orgánicos adecuados, pues se sabe que estos aportan una gama completa de nutrientes idóneos para el crecimiento saludable de las plantas (Gonzalo *et al.*, 20209). Ejemplos comunes incluyen compost, estiércol, humus de lombriz, harina de huesos, harina de pescado y algas marinas.

Así mismo se sugieren enmiendas del suelo tras análisis regulares de este para determinar su pH y contenido de nutrientes, y ajustar en consecuencia, mediante la adición de enmiendas orgánicas con compost, cal, yeso y materia orgánica descompuesta. Así mismo, una aplicación equilibrada de estos fertilizantes en cantidades adecuadas para evitar la sobre o sub-fertilización resulta siempre beneficiosa. (Acevedo *et al.*, 2023)

Además de las anteriores, la rotación de cultivos se recomienda por cuanto evita la acumulación excesiva de patógenos y promueve un equilibrio nutricional en el suelo (Vargas *et al.*, 2022), sin dejar de un lado el uso de necromasa vegetal, entre ellas, paja, hojas u otros materiales orgánicos para proteger el suelo, reducir la erosión, conservar la humedad y mejorar la estructura edáfica.



Adicionalmente, sería deseable el fomento de la biodiversidad mediante la incorporación de técnicas como la siembra de cultivos de cobertura, la siembra de plantas compañeras y la integración de sistemas agroforestales (Maridueña *et al.*, 2022), así como el manejo integrado de plagas y enfermedades con miras de minimizar el uso de pesticidas y promover el equilibrio biológico en el agroecosistema. Esto incluye la introducción de enemigos naturales de las plagas, la selección de

variedades resistentes y el monitoreo regular de las poblaciones de plagas. Finalmente, se recomienda el cuidado del agua por medio de la implementación de prácticas de conservación, como el riego por goteo o la recolección y almacenamiento de agua de lluvia, todo lo cual asegura a las plantas un suministro adecuado y sin desperdicios de agua. Al seguir estas recomendaciones, no hay duda que se mejorará sustancialmente la salud de las plantas y se tendrá un agroecosistema sostenible y sustentable.

### 3. CONCLUSIONES

La ejecución de vuelos fotogramétricos para generar imágenes y la posterior captura y procesamiento de la respuesta espectral del cultivo de arroz constituyen un enfoque integral para el monitoreo y la gestión eficiente de los campos agrícolas.

Esta investigación ratifica que este tipo de operación ayuda a obtener datos detallados y actualizados sobre el estado de los cultivos, siendo de inestimable valor para que los productores agrícolas adopten decisiones en función de su realidad.

Así mismo, combinar la tecnología de vuelos fotogramétricos con el análisis de la respuesta espectral facilita la identificación de tendencias que

favorecen la optimización de los recursos, mejorar los rendimientos y contribuir a la seguridad alimentaria y al desarrollo sostenible.

Se realizaron dos vuelos fotogramétricos con cámara RGB, para generar las bandas espectrales, Ortofoto y Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Superficie (MDS) a 2,5 cm de resolución.

Se calcularon 6 índices espectrales, resultando las mejores respuestas para el cultivo con fertilizante orgánico, con promedios superiores a 0,11 y 0,16 para los índices VIGREEN y SAVI respectivamente.

El mejor comportamiento del VIGREEN y SAVI en comparación con el CIVE, GLI, y EXG para diferenciar cultivos con fertilización sintética y orgánica se debe a la mayor



concentración de clorofila en los cultivos tratados con fertilizantes sintéticos debido a su mayor disponibilidad de nutrientes.

Se evidenció la necesidad de implementar mejores prácticas agronómicas para mejorar la efectividad de los fertilizantes orgánicos, promoviendo un suministro equilibrado de nutrientes y fomentando un ambiente favorable para la agricultura sostenible.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda a los organismos competentes, la implementación de mecanismos de agricultura de precisión que usen la respuesta espectral de los cultivos para determinar necesidades específicas de la planta y el suelo, relacionadas con las condiciones hídricas, nutricionales y fitosanitarias

## REFERENCIAS

Acevedo, L. A., Ávila, C. G., Elvira, I., & Giraldo, O. (2023). Evaluación de la biofertilización a través de un consorcio microbiológico. *Memorias del 2do. Congreso de desarrollo sostenible, comunidades sostenibles, clima y ecosistemas, esfuerzos ODS. 1(1)*, 393. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/4814>

Barbosa, B. D. S., Ferraz, G. A. S., Gonçalves, L. M., Marín, D. B., Maciel,

D. T., Ferraz, P. F. P., & Rossi, G. (2019). RGB vegetation indices applied to grass monitoring: A qualitative analysis. *Agronomy Research*, 17(2), 349-357. <https://doi.org/10.15159/AR.19.119>

Bautista, A. S., Fita, D., Franch, B., Castiñeira-Ibáñez, S., Arizo, P., Sánchez-Torres, M. J., Becker-Reshef, I., Uris, A., & Rubio, C. (2022). Crop Monitoring Strategy Based on Remote Sensing Data (Sentinel-2 and Planet), Study Case in a Rice Field after Applying Glycinebetaine. *Agronomy*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy12030708>

Colovic, M., Stellacci, A. M., Mzid, N., Di Venosa, M., Todorovic, M., Cantore, V., & Albrizio, R. (2024). Comparative Performance of Aerial RGB vs. Ground Hyperspectral Indices for Evaluating Water and Nitrogen Status in Sweet Maize. *Agronomy*, 14(3), 562. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/562>

Cordova, J., Correa, J., Espinoza, T., & Reyes, L. (2022). *Informe de Plan de Vuelo*. <https://es.scribd.com/document/600420520/informe-de-plan-de-vuelo->

Da Silva, V. F., de Moraes, D. P., de Oliveira, F. M., Moraes, A. S., Silva, E. A., Silva, J. C. E., & Piscoya, V. C.



(2024). Mapeamento do uso e ocupação do solo, em ambiente SIG, do município de Petrolina, Pernambuco, Brasil. *Contribuciones a las ciencias sociales*, 17(4), e6451-e6451.

<https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/6451>

De la Llata Quiroga, E. (2023). Fotogrametría de alta resolución espacial utilizando el método de estructura de movimiento (SfM) y vehículos aéreos no tripulados. *Entorno Geográfico*, (25): 1 - 16. <https://entornogeografico.univalle.edu.co/index.php/entornogeografico/article/view/12228>

De la Torre, D. M. G., Gao, J., & Macinnis-Ng, C. (2021). Remote sensing-based estimation of rice yields using various models: A critical review. En *Geo-Spatial Information Science* (Vol. 24, Número 4, pp. 580-603). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1936656>

Delgado, D., & Zorrilla, C. (2019). *Evaluación del simbiote azolla caroliniana-anabaena azollae sobre la agroproductividad del cultivo de arroz y las propiedades químicas del suelo* [Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de

Manabí Manuel Félix López]. <https://repositorio.esпам.edu.ec/bitstream/42000/534/1/TA62.pdf>

DJI. (2018). *Guía de inicio rápido: Phantom 4*. <http://www.dji.com/product/phantom-4>

Elizalde, M. D. (2020). El viraje de Filipinas hacia Asia en el filo de los siglos XVIII y XIX. *Vegueta: Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*. <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/70264>

García, G. (2022). *Determinar el efecto del las deficiencias de nitrógeno en el ndvi del cultivo de maíz (Zea mays)* [Tesis de grado. Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jal. México]. Repositorio Institucional de del ITT. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4456/1/Tesis%20NDVI%20FINAL%20FINAL%203.1%20RAFAEL.pdf>

García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Khalil-Gardez, A., Ascencio-Hernández, R., Tijerina-Chávez, L., Vázquez-Peña, M. A., & Mancilla-Villa, O. R. (2020). Estimación de la fracción de cobertura de la vegetación en maíz (zea mays) mediante imágenes digitales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Rev. Fitotec. Mex*, 43(4), 399-409. <https://www.scielo.org.mx/scielo.p>





[hp?pid=S0187-73802020000400399&script=sci\\_arttext](https://doi.org/10.3390/rs13091620)

Ge, H., Xiang, H., Ma, F., Li, Z., Qiu, Z., Tan, Z., & Du, C. (2021). Estimating plant nitrogen concentration of rice through fusing vegetation indices and color moments derived from UAV-RGB images. *Remote Sensing*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/rs13091620>

Gis, A., & Back, K. (2021). Índices de vegetación para drones sin dependencia de infrarrojo. *Agredico*, 5(2), 13-28. <https://www.agredico.com/l/indices-drones-rgb/>

González-Luna, C., Filonov, A., Mireles, O., & Tereshchenko, I. (2018). Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite. *Revista Cartográfica*, 98(2), 2663-3981. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98>.

Gonzalo, M. P. S., Orellana, Y. G., Simbaña, A. G., Tello, E. G., Borges, J. B., & Rodríguez, D. T. (2020). Propuesta de un protocolo para la obtención de fertilizante orgánico a partir de microalgas. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(14), 92-109. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/2834>

Gozalvez, M. I. (2024). *Determinación de la cubierta vegetal y seguimiento de un cultivo de soja con una cámara RGB de bajo coste* [Tesis de grado. Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Institucional de la UC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/403565>

Hernández-Aragón, L., Tavitafuentes, L., & Álvarez-Hernandez, J. C. (2023). Origen y características de la diversidad genética del arroz en México. *Revista fitotecnica mexicana*, 46(4), 461-469. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802023000400461&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802023000400461&script=sci_arttext)

Inoue, Y. (2020). Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming-a review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(6), 798-810. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>

Izhnin, I. I., Lozovoy, K. A., Kokhanenko, A. P., Khomyakova, K. I., Douhan, R. M., Dirko, V. V., ... & Akimenko, N. Y. (2022). Single-photon avalanche diode detectors based on group IV materials. *Applied Nanoscience*, 1-11. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13204-021-01667-0>

Kazemi, F., & Parmehr, E. G. (2023).



Evaluation of rgb vegetation indices derived from uav images for rice crop growth monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10(4/W1-2022), 385-390. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-385-2023>

López, W. (2021). *Evaluación de la utilidad del sensor Sentinel-2 para la cartografía de cinco parámetros físicos-químicos de calidad de agua en la Laguna de Moyúa, Ciudad Darío, Matagalpa, febrero y julio 2020* [Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional de la UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/4300/1/tnp10l864e.pdf>

Lu, N., Zhou, J., Han, Z., Li, D., Cao, Q., Yao, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cheng, T. (2019). Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Plant Methods*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0402-3>

Malam, K. (2020). Precision Agriculture -A New Smart Way of Farming. *Agriculture and Environment*, 1(2), 87-92. [https://www.researchgate.net/publication/345807647\\_Precision\\_Agriculture\\_-\\_A\\_New\\_Smart\\_Way\\_of\\_Farming](https://www.researchgate.net/publication/345807647_Precision_Agriculture_-_A_New_Smart_Way_of_Farming)

Maridueña, D. M. C., Maridueña, B. J. C., David, W. O. P., & Torres, M. S. F. (2022). Beneficios del establecimiento de Inga spp en sistemas agroforestales de la zona agrícola del cantón El Triunfo. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 6(43), 1-11. <https://journalprosciences.com/index.php/ps/article/download/514/564>

Martin, D., Uriosti, L., Celi, A., & Castro, J. (2021). *Caracterización del sector arrocerero en el Ecuador 2014-21029. ¿Esta cambiando el manejo del cultivo?* <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/113781/Marin%20et%20al%202021%20BIOCIAT%20--%20Caracterizacion%20arroz%20Ecuador%202014%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Martínez Gavilánez, D. L., & Rodríguez Meza, Y. E. (2024). *Determinar la composición de los tejidos del pasto llanero (Andropogon gayanus) con fertilización química y orgánica en diferentes estados de madurez en la época lluviosa* [Tesis de grado. Universidad Técnica de Cotopaxi, la Maná, Ecuador]. Repositorio Institucional de la UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11691>

Montilla-Pacheco, A. D. J., Pacheco-Gil, H. A., Pastrán-Calles, F. R., & Rodríguez-Pincay, I. R. (2021).



Polinización con drones: ¿ Una respuesta acertada ante la disminución de polinizadores entomófilos?. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 509-516. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2077-99172021000400509](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000400509)

Pacheco Gil, H. A., & Montilla Pacheco, A. de J. (2021). RGB Spectral Indices for the Analysis of Soil Protection by Vegetation Cover against Erosive Processes. En *Soil Erosion - Current Challenges and Future Perspectives in a Changing World*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95055>

Piron, F., Morrison, D., Yuce, M. R., & Redouté, J. M. (2020). A review of single-photon avalanche diode time-of-flight imaging sensor arrays. *IEEE Sensors Journal*, 21(11), 12654-12666. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9264255/>

Robles, J. (2022). *Análisis de la respuesta espectral del cultivo de cebada (Hordeum vulgare L.) a la aplicación de fertilizante nitrogenado evaluado con el índice de vegetación NDVI* [Tesis de Grado. Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la UC. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/40409/1/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>

[eam/123456789/40409/1/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000400509)

Ryu, J. H., Oh, D., Ko, J., Kim, H. Y., Yeom, J. M., & Cho, J. (2022). Remote Sensing-Based Evaluation of Heat Stress Damage on Paddy Rice Using NDVI and PRI Measured at Leaf and Canopy Scales. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081972>

Serrano, A. S. (2020). India y el sistema multilateral de comercio. *Boletín Económico de ICE*, (3128). <https://www.revistasice.com/index.php/BICE/article/view/7090>

Silva Velarde, E. O. (2024). *Generación de ortofotografía y modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución con puntos de control RTK (Real-Time Kinematic Positioning)*. [Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador]. Repositorio Institucional de la UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27070>

Simões, G. Z., Kux, H. J. H., Breunig, F. M., & Pereira, L. H. (2023). Canopy Height Estimation of Three Sugarcane Varieties Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Geografia Ensino & Pesquisa*, 27, e65070-e65070. <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/65070>



Vargas, R. E., Wilches Ortiz, W. A., & Espitia Malagón, E. M. (2022). Efecto del establecimiento de sistemas de rotación para el cultivo de la papa sobre las características químicas y físicas del suelo. *Siembra*, 9(2). [https://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-88502022000200013&script=sci\\_artte](https://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-88502022000200013&script=sci_artte)

Vera, N. (2021). *Análisis de uso de suelo a partir de imágenes satelitales sentinel 2 en el cantón buena fe, provincia de Los Ríos* [Tesis de grado. Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional de la UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6186/1/T-UTEQ-128.pdf>

Yu, F., Bai, J., Jin, Z., Zhang, H., Guo, Z., & Chen, C. (2022). Research on Precise Fertilization Method of Rice Tillering Stage Based on UAV Hyperspectral Remote Sensing Prescription Map. *Agronomy*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy12112893>

Zha, H., Miao, Y., Wang, T., Li, Y., Zhang, J., Sun, W., Feng, Z., & Kusnierek, K. (2020). Improving unmanned aerial vehicle remote sensing-based rice nitrogen nutrition index prediction with machine learning. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020215>

Zhao, K., Ye, Y., Ma, J., Huang, L., & Zhuang, H. (2021). Detection and dynamic variation characteristics of rice nitrogen status after anthesis based on the rgb color index. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091739>

Zheng, J., Song, X., Yang, G., Du, X., Mei, X., & Yang, X. (2022). Remote Sensing Monitoring of Rice and Wheat Canopy Nitrogen: A Review. En *Remote Sensing* (Vol. 14, Número 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs14225712>

Zheng, Q., Huang, W., Xia, Q., Dong, Y., Ye, H., Jiang, H., Chen, S., & Huang, S. (2023). Remote Sensing Monitoring of Rice Diseases and Pests from Different Data Sources: A Review. *Agronomy*, 13(7), 1851. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071851>

Zurita, A. (2021). *Adaptación de cuatro variedades de arroz (Oryza sativa L.) a las condiciones agroclimáticas de Mocache, 2021* [Tesis de grado. Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional de la UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6555/1/T-UTEQ-306.pdf>