

RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DEL MAÍZ APLICANDO DOSIS DIFERENCIADAS DE FERTILIZACIÓN

60

Roger Adrián Delgado Alcívar¹
roger.delgado@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5152-9973>

Henry Antonio Pacheco Gil²
henry.pacheco@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9997-9591>

Ezequiel Zamora-Ledezma³
ezequiel.zamora@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5315-2708>

¹Estudiante de la Maestría en Ingeniería Agrícola con mención en Agroecología y Cambio Climático. Facultad de Posgrado Universidad Técnica de Manabí. Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, provincia Manabí, Ecuador.

²Grupo de Investigación, Uso Eficiente del Agua y Suelo en la Agricultura. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Técnica de Manabí. Avenida José María Urbina, Portoviejo, Ecuador. Código Postal 130105.

³ Grupo de Investigación, Funcionamiento de Agroecosistemas y cambio Climático. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Técnica de Manabí. Avenida José María Urbina, Portoviejo, Ecuador. Código Postal 130105.

Recibido: 23/01/2024

Aceptado: 28/03/2024

Publicado: 15/04/2024

RESUMEN

La investigación llevada a cabo en Santa Ana, Ecuador, busca correlacionar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con el Índice de Clorofila Verde (GCI) en diferentes estados fenológicos del maíz, aprovechando la teledetección a través de vuelos fotogramétricos utilizando el dron eBee. Los resultados exhiben una relación positiva entre el GCI y el NDVI en todas las fases evaluadas del crecimiento del cultivo, con coeficientes de determinación (R^2) destacados: 0,9138 en estado V5, 0,8912 en estado V11, y 0,8461 en estado VT (floración). Estos valores respaldan la eficacia del GCI como indicador confiable de la salud y el

contenido de clorofila en el maíz, a pesar de ligeras variaciones según la etapa de desarrollo. Estos hallazgos enriquecen el conocimiento científico y proporcionan perspectivas valiosas para implementar la teledetección en la gestión agrícola sostenible y en la toma de decisiones informadas en la producción agrícola.

Palabras clave: teledetección, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Índice de Clorofila Verde.

SPECTRAL RESPONSE OF THE MAIZE CROP APPLYING DIFFERENTIATED DOSES OF FERTILIZATION

ABSTRACT

The research carried out in Santa Ana, Ecuador, seeks to correlate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the Green Chlorophyll Index (GCI) in different phenological stages of corn, taking

advantage of remote sensing through photogrammetric flights using the eBee drone. The results show a positive relationship between GCI and NDVI in all evaluated phases of crop growth, with outstanding coefficients of determination (R^2): 0,9138 in the V5 state, 0,8912 in the V11 state, and

0,8461 in the VT stage (flowering). These values support the efficacy of the GCI as a reliable indicator of health and chlorophyll content in maize, despite slight variations by stage of development. These findings enrich scientific knowledge and provide valuable insights for implementing remote sensing in sustainable agricultural management and informed decision-making in agricultural production.

Keywords: remote sensing, remote sensing, Normalized Difference Vegetation Index, Green Chlorophyll Index.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, el cultivo de maíz duro juega un papel crucial en la seguridad alimentaria, la alimentación animal y las actividades agroindustriales, siendo de gran relevancia económica. (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP, 2016)

La estimación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO (2021) señaló que en Ecuador se cultivaron aproximadamente 366 138 hectáreas de maíz, con un rendimiento medio de 4.64 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y una producción total de alrededor de 1.699.369,61 toneladas (t).

El cultivo de maíz en Ecuador, enfrenta desafíos como la variabilidad climática y la presión de plagas y enfermedades (Montoya, 2019). Las investigaciones para solucionar esos problemas se centran en el mejoramiento genético, la nutrición

vegetal, la fitopatología y la entomología, con avances genéticos que han mejorado la productividad en las regiones clave, como en la Costa y Sierra (Caviedes, Carvajal y Zambrano, 2022), haciendo notable la falta de atención en el uso de la teledetección en estas investigaciones.

La percepción remota o teledetección, desempeña un papel esencial en la agricultura y la agronomía, al proporcionar información clave sobre tierras agrícolas en términos espaciales y temporales, siendo crucial para la gestión eficaz y sostenible de cultivos.

Su rápida cobertura geográfica brinda panorámicas precisas que fortalecen la toma de decisiones y contribuyen al aumento de la productividad en este sector económico fundamental (Asadi y Shamsoddini, 2024), pues permiten el monitoreo efectivo y el análisis exitoso de diversas etapas de crecimiento de los cultivos, ya sea con el objetivo de estimar rendimientos, clasificar cultivos, mapear cobertura o detectar estrés por sequías e inundaciones. (Karmakaret *al.*, 2024)

El nitrógeno se configura como un nutriente fundamental para el desarrollo de las plantas, desempeñando un función especial en la estructura y funcionalidad de proteínas y cloroplastos (Lazaratou, Triantaphyllidou,

Spyridonos, Pantelidis, Kakogiannis, Vayenas & Papoulis, 2021), haciendo de este elemento uno esencial para varios aspectos vitales en el ciclo de vida de las plantas.

En las últimas décadas, los fertilizantes de nitrogenados (N), especialmente la urea, han logrado incrementar significativamente el rendimiento de los cultivos (Ma *et al.*, 2023) con el fin de responder al rápido aumento de la población (Cui *et al.*, 2020). Sin embargo, nivel global, surge una inquietud en relación con el conflicto entre la creciente demanda de ellos para la producción de alimentos (Luo *et al.*, 2023). Por ello, para lograr una transformación sostenible en la producción de plantas agrícolas, es esencial reducir u optimizar la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la agricultura. (Lewin *et al.*, 2024)

En ese sentido, se sabe que la agricultura participa con cerca del 30% de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Saynes *et al.*, 2016), de los cuales la fuente predominante es el uso de fertilizantes nitrogenados, siendo responsable del 60 % de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso (N₂O) y del 50 % de las emisiones de metano (CH₄) (Fan *et al.*, 2021) debido a su uso inadecuado y a su baja eficiencia (Alfaro y Muñoz, 2012).

El N₂O posee un potencial de calentamiento global superior al del dióxido de carbono (CO₂), su contribución significativa al calentamiento global se debe a su prolongada vida media (116 ± 9 años) y a un alto potencial de calentamiento global (298 veces mayor que el del CO₂ en una escala de tiempo anual para un período de 100 años) (Ning *et al.*, 2024). La aplicación de altas cantidades de fertilizantes está causando la contaminación de nuestros valiosos recursos naturales, especialmente de las fuentes hídricas y de suelos. (Fraceto *et al.*, 2016)

Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO (2019) para el 2050 la población mundial se encuentre en 9700 M de personas. Por consiguiente, para poder alimentar a toda la población, se debe incrementar la producción de alimento para satisfacer la demanda alimenticia, de manera sostenible priorizando prácticas agrícolas que incrementen la productividad sin comprometer el medio ambiente ni recurrir a prácticas contaminantes.

Las tecnologías actuales de producción demuestran un estancamiento en el desarrollo de los cultivos, representada por la baja eficiencia en el uso de los fertilizantes, la degradación de los suelos, el cambio climático, la

disminución de la superficie agrícola. (Dubey y Mailapalli, 2016)

Uno de los retos que afronta la producción agraria se fundamenta en incrementar la absorción de nutrientes durante la fertilización, que por lo general es baja, buscando minimizar las pérdidas al ambiente y asegurar las concentraciones necesarias por la planta de elementos poco biodisponibles como el fósforo y el magnesio (Botero *et al.*, 2019).

Actualmente debemos reconocer la importancia de la convergencia entre las tecnologías que se tienen a disposición, lo cual, implica que se produzcan cambios en la manera que haremos agricultura y el importante impacto en la producción la producción agrícola, de la mano con la agricultura de precisión (Rodríguez *et al.*, 2015). En este contexto evolutivo, nuestro enfoque se orienta hacia la correlación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con el Índice de Clorofila Verde (GCI) en distintos estados fenológicos del maíz. Es decir, este estudio busca comprender la interrelación entre estos indicadores clave mediante el uso de tecnologías avanzadas, con el objetivo de mejorar la eficacia y sostenibilidad en la gestión de cultivos.

METODOLOGÍA

Ubicación del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el cantón Santa Ana (parroquia Lodana), en la provincia de Manabí, específicamente en el campus Lodana donde se encuentra la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA) de la Universidad Técnica de Manabí (UTM) (figura 1), entre las coordenadas proyectadas UTM, zona 17 sur, X:568414 Y: 9870120, Datum WGS 1984.

La parroquia Lodana tiene una precipitación promedio anual de 550 mm y se encuentra a una altitud de 44 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una temperatura media de 24,6 °C, con suelos clasificados como vertic ustropets, una humedad relativa promedio del 82% (Ostaiza *et al.*, 2020), y de acuerdo a la clasificación de Holdridge, el área se identifica como una formación ecológica caracterizada por ser un bosque tropical seco. (García *et al.*, 2020)



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en los predios del campus Lodana de la UTM.

Para llevar a cabo este estudio se establecieron parcelas

experimentales, las cuales, fueron asignadas aleatoriamente a diferentes tratamientos de aplicación de fertilización nitrogenada, asegurando la diversidad de condiciones y factores ambientales.

El cultivo fue de maíz (*Zea mays*), con diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada en 4 bloques completos al azar (BCA), cada uno con 8 unidades experimentales con un total de 32 parcelas. El diseño factorial fue de 4*4*2, es decir, cuatro tratamientos con igual número de repeticiones y dos variedades de siembra. Las dimensiones de cada parcela fue de 8 x 12 m, teniendo como superficie 96 m², posterior al mecanizado del suelo fueron sembradas con aproximadamente 900 plantas cada una.

Los tratamientos fueron los siguientes: T1 con 0g de fertilización nitrogenada por planta (testigo), T2 con 5g, T3 con 7g, y T4 con 9g por unidad experimental por corte.

Las variedades seleccionadas fueron ADVANTA y EMBLEMA, sembradas dos días después de que se produjo una precipitación suficiente para hidratar el suelo en la época lluviosa. Las semillas germinaron después de cuatro (4) días de haber sido sembradas.

Variables monitoreadas

Con vuelos fotogramétricos se capturaron imágenes en RGB o color

natural y algunas bandas multispectrales que permitieron, posteriormente calcular los índices multispectrales. Para ello, se utilizó el dron eBee SQ (figura 2), que es una avanzada herramienta tecnológica con buenas características (tabla 1) diseñada para aplicaciones en agricultura de precisión. Con un peso ligero (0,7 kg) y una estructura compacta, ofrece una gran versatilidad y facilidad de uso. Los datos recolectados por el dron pueden ser procesados y analizados para tomar decisiones informadas sobre la gestión del cultivo, optimizando el uso de recursos y mejorando la productividad agrícola.

Tabla 1. *Propiedades del sensor con el que está equipado el dron eBee SQ.*

Tipo:	Sequoia 1.7.1
Sensor:	Multispectral sensor + RGB camera
Multispectral sensor:	4-band
Resolución RGB:	16 MP, 4,608 x 3,456 px
Resolución monobanda:	1.2 MP, 1,280 x 960 px
Bandas multispectrales:	Green (550nm ± 40nm)
	Red (660nm ± 40nm)
	Red edge (735nm ± 10nm)
	Near infrared (790nm ± 40nm)

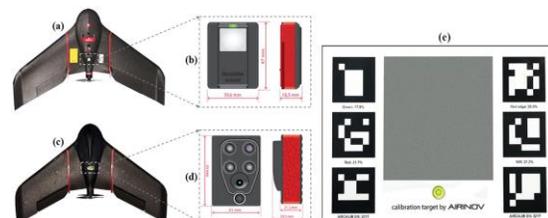


Figura 2. La descripción general del eBee SQ incluye los siguientes elementos en orden: (a) la parte superior del dron; (b) inductor que aprovecha la luz solar; (c) parte inferior del dron; (d) cámara Sequoia; y (e) una placa utilizada para corregir la radiación.

Fuente: Zhang et al. (2023).

Los vuelos se realizaron una vez que las plantas alcanzaron un estado fenológico maduro, lo que supone una altura y densidad de follaje suficiente para ser detectados por la cámara aérea. Por ello, la planificación de los vuelos fotogramétricos se efectuó en las etapas de crecimiento vegetativo V5 y V11 (cuando la planta tiene 5 hojas y 11, respectivamente) y en la de floración (VT).

Cálculos de índices espectrales:

Los índices espectrales representan medidas cuantitativas derivadas de operaciones algebraicas aplicadas a los datos numéricos de los píxeles. (Muñoz, 2013)

Estas medidas suelen resultar de combinaciones algebraicas de las bandas espectrales, ya sea mediante sumas, divisiones o multiplicaciones (Díaz, 2015). En el presente estudio, se implementaron dos índices espectrales:

Primero el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI), desarrollado por Rouse, Hass, Schell & Deering (1973), se calculó mediante la fórmula:

$$NDVI = \left(\frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}} \right) \quad (1)$$

Donde:

B_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano

B_{RED} : Reflectancia de la banda roja

Segundo el Índice de Clorofila Verde (GCI) (Sergieieva, 2022), a través de la siguiente ecuación:

$$GCI = \left(\frac{B_{NIR}}{B_{GREEN}} - 1 \right) \quad (2)$$

RESULTADOS

La relación entre el Índice de Clorofila Verde (GCI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el estado V5 de la planta de maíz (figura 3), con 5 hojas desarrolladas, está representada por la ecuación de regresión lineal $y = 0,2322x + 0,0755$. Este modelo exhibe una fuerte correlación, ya que el coeficiente de determinación (R^2) es 0,9138. En este estado temprano de crecimiento, la relación positiva entre el GCI y el NDVI sugiere que el GCI puede ser un indicador valioso de la salud y el contenido de clorofila en las plantas de maíz.

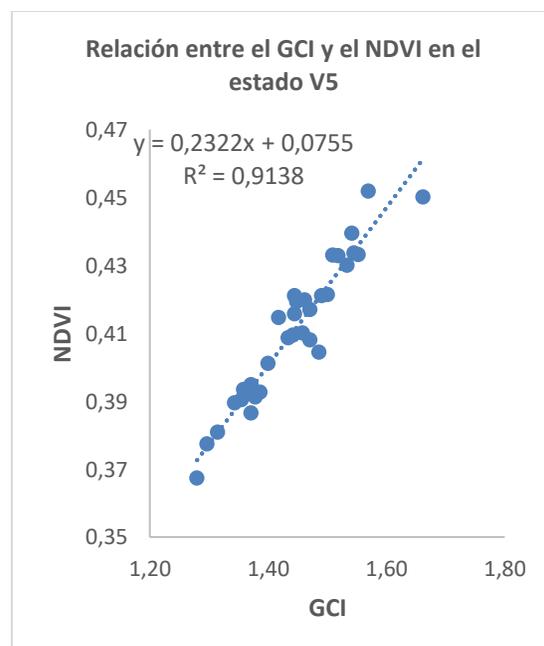


Figura 3. Correlación robusta GCI-NDVI en maíz (V5 - 5 hojas). $R^2 = 0,9138$, indicando fuerte relación positiva en etapa temprana.

En el estado V11 de la planta de maíz, con 11 hojas desarrolladas (figura 4), la relación entre el GCI y el NDVI está representada por la ecuación de regresión $y = 0,0801x + 0,4192$. Aunque el coeficiente de determinación (R^2) sigue siendo alto, con un valor de 0,8912, la relación entre el GCI y el NDVI es ligeramente menos pronunciada en comparación con el resultado anterior. Esto sugiere que, aunque el GCI sigue siendo un indicador útil, la relación puede variar según la etapa específica de crecimiento de las plantas.

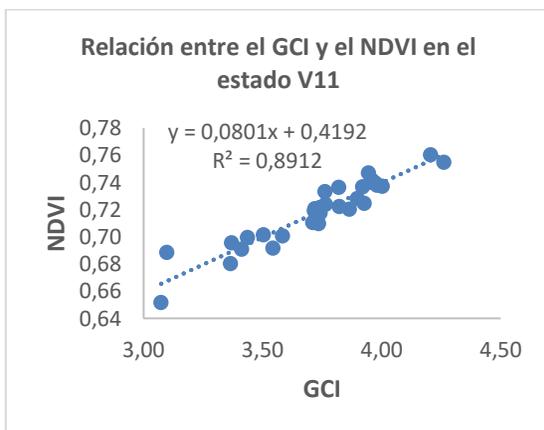


Figura 4. Correlación GCI-NDVI en maíz (V11 - 11 hojas). $R^2 = 0,8912$, relación positiva con pendiente menos pronunciada.

En el estado VT, en la etapa de floración de maíz (figura 5), la relación entre el GCI y el NDVI está expresada por la ecuación de regresión $y = 0,0309x + 0,6319$, y el coeficiente de determinación (R^2) es 0,8461.

Este resultado indica una relación positiva, pero menos marcada, entre ambos índices en esta etapa particular

de desarrollo. Puede sugerir que, en este punto específico del crecimiento, otros factores podrían influir en la relación entre el GCI y el NDVI.

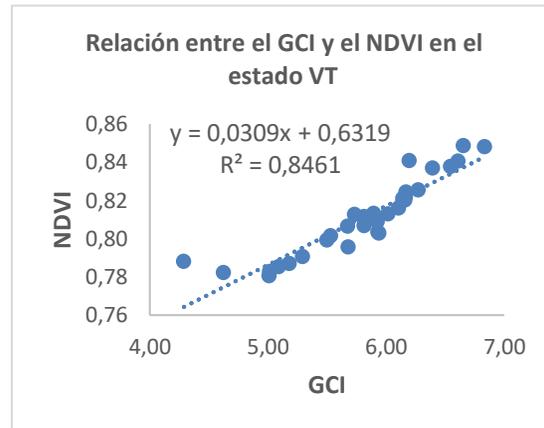


Figura 5. Correlación GCI-NDVI en maíz (V11 - 11 hojas). $R^2 = 0,8461$, relación positiva con pendiente suave en esta etapa específica.

En general, los tres resultados indican que hay una relación positiva entre el GCI y el NDVI en todos los estados evaluados de las plantas de maíz. Sin embargo, la fuerza de esta relación puede variar ligeramente según la cantidad específica de hojas en el momento de la medición.

La consistencia en la correlación sugiere que el GCI puede ser un indicador confiable de la salud y el contenido de clorofila en las plantas de maíz en diferentes etapas de su desarrollo, aunque la precisión puede variar.

Es importante tener en cuenta estos resultados al utilizar el GCI como herramienta de evaluación en estudios agrícolas y de monitoreo del crecimiento vegetal.

CONCLUSIONES

En este estudio, se ha logrado establecer una sólida correlación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Clorofila Verde (GCI) en diferentes estados fenológicos del cultivo de maíz en Santa Ana, Ecuador.

Los resultados obtenidos revelan una relación positiva consistente entre ambos índices, demostrando la eficacia del GCI como indicador confiable de la salud y el contenido de clorofila en las plantas de maíz.

La aplicación de la teledetección con drones, especialmente el dron eBee SQ, ha demostrado ser una herramienta valiosa para la captura de datos precisos y la generación de índices espectrales. Este enfoque tecnológico no solo proporciona información detallada sobre el estado de los cultivos, sino que también facilita la toma de decisiones informadas en la gestión agrícola.

En el contexto de la agricultura de precisión, la exitosa correlación entre el NDVI y el GCI resalta la importancia de estas tecnologías avanzadas para optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad agrícola y avanzar hacia prácticas más sostenibles.

Este estudio no solo contribuye al conocimiento científico, sino que también subraya el papel crucial de la teledetección en la mitigación del

cambio climático al proporcionar herramientas efectivas para monitorear y gestionar los recursos agrícolas de manera más eficiente y sostenible, especialmente en la optimización de la fertilización nitrogenada.

Estas prácticas no solo pueden aumentar la productividad, sino que también abordan los desafíos ambientales actuales, promoviendo una agricultura más sustentable y resistente al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a FONTAGRO por el financiamiento otorgado a esta investigación en el marco de la cooperación técnica No. ATN/RF-18959-RG: Proyecto "Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso", ejecutado en colaboración entre la Universidad Técnica de Manabí (U.T.M.), Ecuador y la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, M., y Muñoz, C. (2012). Ganadería y gases de efecto invernadero. *Informativo Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, 90, 4. <https://www.consorciolechero.cl/chile/documentos/fichas-tecnicas/24junio/ganaderia-y-gases-de-efecto-invernadero.pdf>
- Asadi, B., y Shamsoddini, A. (2024). Crop mapping through a hybrid machine learning and deep learning method. *Remote Sensing*

- Applications: Society and Environment*, 33, 101090.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101090>
- Botero, J., Gómez, A., y Botero, M. (2019). Rendimiento, parámetros agronómicos y calidad nutricional de la *Tithonia diversifolia* con base en diferentes niveles de fertilización. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(3), 789-800.
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i3.4667>
- Caviedes, M., Carvajal, F. E., y Zambrano, J. L. (2022). Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador Generation of technologies for the cultivation of corn (*Zea mays* . L) in Ecuador. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 14(1), 1-21.
<https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/download/2588/3111?inline=1>
- Cui, N., Cai, M., Zhang, X., Abdelhafez, A. A., Zhou, L., Sun, H., Chen, G., Zou, G., y Zhou, S. (2020). Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01011.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01011>
- Díaz, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. In *Universidad Complutense De Madrid*.
http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dubey, A., & Mailapalli, D. R. (2016). *Nanofertilisers, Nanopesticides, Nanosensors of Pest and Nanotoxicity in Agriculture*. 307-330.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_7
- Fan, Y., Hao, X., Carswell, A., Misselbrook, T., Ding, R., Li, S., y Kang, S. (2021). Inorganic nitrogen fertilizer and high N application rate promote N₂O emission and suppress CH₄ uptake in a rotational vegetable system. *Soil and Tillage Research*, 206, 104848.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104848>
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4(MAR), 1-5.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- García, L., Vera, L., Zambrano, F., Zamora, A., & Cedeño, J. (2020). Pollen production in *Theobroma cacao* L. genotypes national type and ccn-51 and its relationship with climatic factors on the ecuadorian coast. *Acta Agrobotanica*, 73(2), 1-9.
<https://doi.org/10.5586/AA.7323>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP. (2016). *Estimación de la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz en las provincias de Los Ríos, Guayas y Manabí*.
https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5388/1/iniapee_ppdf58.pdf
- Karmakar, P., Teng, S. W., Murshed,



- M., Pang, S., Li, Y., & Lin, H. (2024). Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101093. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101093>
- Lazaratou, C. V, Triantaphyllidou, I. E., Spyridonos, I., Pantelidis, I., Kakogiannis, G., Vayenas, D. V, & Papoulis, D. (2021). NO₃--N removal from water using raw and modified fibrous clay minerals and their potential application as nitrogen fertilizers in hydroponic lettuce cultivations. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102021>
- Lewin, S., Wende, S., Wehrhan, M., Verch, G., Ganugi, P., Sommer, M. & Kolb, S. (2024). Cereals rhizosphere microbiome undergoes host selection of nitrogen cycle guilds correlated to crop productivity. *Science of The Total Environment*, 911, 168794. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168794>
- Luo, H., Zilio, M., Sigurnjak, I., Robles-Aguilar, A. A., Michels, E., Adani, F., De Neve, S., & Meers, E. (2023). Dynamics of soil nitrogen and N-cycling-related genes following the application of biobased fertilizers. *Applied Soil Ecology*, 191, 105033. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105033>
- Ma, Q., Qian, Y., Yu, Q., Cao, Y., Tao, R., Zhu, M., Ding, J., Li, C., Guo, W., & Zhu, X. (2023). Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108445>
- Montoya, A. (2019). *Estudio del impacto de la variabilidad climática sobre el rendimiento del cultivo de maíz en Ecuador* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20731/1/CD10249.pdf>
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. In *Centro de información de recursos Naturales*. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Indices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indice%20de%20vegetacion%20Pedro%20Muoz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ning, Z., Hou, Y., & Xu, X. (2024). Optimized strategies for nitrogen fertilizer application in Populus plantations in the context of climate change mitigation. *Forest Policy and Economics*, 159, 103139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103139>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO. (2019). *Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU*. https://population.un.org/wpp/publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf
- Organización de las Naciones Unidas

- para la Alimentación y la Agricultura-FAO. (2021). *Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Ostaiza, K., Jarre, E., Pacheco, H., & Zamora, E. (2020). Propuesta híbrida para la captación y medición de CO₂ edáfico empleando cámaras de incubación estáticas y secuestro de gases. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, ve2020(2), 33-40. <https://doi.org/10.22209/rt.ve2020n2a05>
- Rodríguez, A., Lopez, T., Meza, L., y Loboguerrero, A. (2015). *Innovaciones institucionales y en políticas sobre agricultura y cambio climático. Evidencia en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1*, 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>
- Saynes, V., Etchevers, J., Paz, F., y Alvarado, L. (2016). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en sistemas agrícolas de México. *Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Systems in Mexico. Terra Latinoamericana*, 34, 83-96.
- Sergieieva, K. (2022). *Índices De Vegetación En La Agricultura Digital*. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
- Zhang, J., Pan, Y., Tao, X., Wang, B., Cao, Q., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Liu, X. (2023). In-season mapping of rice yield potential at jointing stage using Sentinel-2 images integrated with high-precision UAS data. *European Journal of Agronomy*, 146(December 2022), 1-14. <https://doi.org/>