

LA INFLUENCIA DE LA FÍSICA EN EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA

THE INFLUENCE OF PHYSICS ON THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE

William Ausberto Merchán García¹
 Joffre Daniel Pincay Menéndez²
 Bolívar Fabian Mendoza Marcillo³
 Richard Antonio Cornejo Cornejo⁴
 Ruben Eduardo Daza Castaño⁵
 Cinthia Lisseth Nieto Molina⁶

Resumen

La pobreza, el hambre, la inseguridad alimentaria, la contaminación medioambiental por fertilizantes, la deforestación, la pérdida de diversidad biológica, la degradación de los suelos, el cambio climático, la urbanización, la escasez de agua son fenómenos que han obligado a reflexionar sobre nuevas alternativas aplicadas a la agricultura. Conceptos como agricultura sostenible, agricultura inteligente, agricultura de precisión, agricultura biodinámica, y agricultura 4.0. o digital demuestran las soluciones para aumentar la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agraria. La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un análisis para determinar cuáles son los conocimientos de la física que han influido el desarrollo de la agricultura. Para ello se realizó una revisión documental que consideró las bases de datos SpringerLink, Scopus, Scielo y Redalyc. El corpus documental estuvo integrado por 69 artículos en total, mientras que el corpus final está compuesto por 4 artículos. Como resultado se puede plantear que la física gana terreno a la química; ya que apuesta por reacciones físicas que no dejan consecuencias en el producto.

Palabras clave: agricultura, física, tecnología

Abstract

Poverty, hunger, food insecurity, environmental pollution by fertilizers, deforestation, loss of biodiversity, soil degradation, climate change, urbanization, and water scarcity have forced us to reflect on new alternatives applied to agriculture. Concepts such as sustainable agriculture, smart agriculture, precision agriculture, biodynamic agriculture, and 4.0 or digital agriculture demonstrate solutions to increase productivity, quality, profitability, and sustainability of

Recepción: 01 de Septiembre de 2024/ Evaluación: 19 de Septiembre de 2024/ Aprobado: 01 de Octubre de 2024

¹ Magíster en Finanzas y Comercio Internacional. Docente Tiempo Completo Universidad Estatal del Sur de Manabí. Email: william.merchan@unesum.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6910-5885>

² Magíster en Agronomía Mención Producción Agrícola Sostenible. Docente Tiempo Completo Universidad Estatal del Sur de Manabí. Email: joffre.pincay@unesum.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4664-8983>

³ Magíster en Agronomía Mención Producción Agrícola Sostenible. Docente Tiempo Completo Universidad Estatal del Sur de Manabí. Email: bolivar.mendoza@unesum.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0812-2232>

⁴ Magíster en Zootecnia. Docente Tiempo Completo Universidad Estatal del Sur de Manabí. Email: richard.cornejo@unesum.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5450-8609>

⁵ Magíster en Agroecología y Agricultura Sostenible. Docente Tiempo Completo Universidad Técnica de Manabí. Email: ruben.daza@utm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6059-312X>

⁶ Magister en Administración de Empresas MBA. Docente Universidad Técnica de Manabí. Email: cinthia.nieti@utm.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8850-6158?lang=en>

agricultural production. The present research aimed to develop an analysis to determine which physics knowledge has influenced the development of agriculture. To this end, a documentary review was conducted using the SpringerLink, Scopus, Scielo, and Redalyc databases. The documentary corpus consisted of 69 articles, while the final corpus was composed of 4 articles. As a result, it can be stated that physics is gaining ground over chemistry since it bets on physical reactions that do not leave consequences in the product.

Keywords: agriculture, physics, technology

Introducción

Uno de los problemas sociales más acuciante a nivel mundial es el hambre. De hecho, uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el siglo XXI es poner fin al hambre y promover la agricultura sostenible. Las cifras exhibidas por la Organización de Naciones Unidas (ONU, 2023) demuestran que el número de personas que sufre hambre se incrementa por años. En el 2022, se registraron 122 millones de personas más que en 2019. Teniendo en cuenta estos datos, dicha organización puede predecir que, en el año 2030, alrededor de 600 millones de personas padecerán de desnutrición crónica (ONU, 2023).

Unido a esto, se encuentra la urbanización como parte del fenómeno de la globalización, lo que ha traído consigo el consumo de comida rápida poco saludable, la carencia de productos frescos, la exclusión de los pequeños agricultores y la pérdida de capital natural. Para contrarrestar las consecuencias mencionadas, se lanzó el Reto del Hambre Cero que promueve, entre otras medidas, conseguir que todos los sistemas alimentarios sean sostenibles y aumentar un 100% la productividad y el ingreso de los pequeños agricultores (ONU, 2023). Es así que, la agricultura se ha convertido en un renglón privilegiado tanto en la importación como en la exportación. Por ende, cada vez se realizan más investigaciones científicas y tecnológicas que impulsen su desarrollo.

Bajo esta premisa, hoy cobra fuerza el proceso de la toma de decisiones en la agricultura. Para ello, se han incorporado varios recursos tecnológicos que han acuñado nuevos conceptos con toda una teoría que los sustenta. Este es el caso de la agricultura sostenible, la agricultura inteligente, la agricultura de precisión, agricultura biodinámica, y la agricultura 4.0. o digital. Estos términos demuestran el creciente interés por alcanzar una mayor y mejor producción de alimentos. Las vías son diversas, pero todas evidencian la fusión del universo físico con el virtual.

Desde esta perspectiva, los resultados científicos y tecnológicos han sido efectivos, entre otros elementos, por los procesos de disciplinariedad e interdisciplinariedad que se generan como parte de las investigaciones desarrolladas. Ambos procesos se hallan recíprocamente interconectados y dan lugar a la aparición de nuevos conocimientos. La disciplinariedad está orientada hacia la especialización de las ciencias, o sea, a la profundización de sus particularidades como son sus leyes y principios, sus objetos de estudios, sus métodos de investigación, y su sistema categorial. Por su parte, la interdisciplinariedad está dirigida hacia el establecimiento de nuevas relaciones entre las ciencias, con el objetivo de solucionar problemas sociales que aún no han sido resueltos por las disciplinas autónomas, u optimizar procesos globales actuales.

Son muchas las ciencias que se interconectan para lograr resultados efectivos a nivel social. Un ejemplo de ello es la física y la agricultura. La física es la ciencia encargada del estudio de las propiedades de la naturaleza. Esto implica que existan muchos elementos comunes entre la física y la agricultura. Dígase el agua, los suelos, la atmósfera, la energía, la presión, la temperatura, la densidad, las propiedades físicas de las plantas, la luz, etc.

Siguiendo este orden, se puede significar que, entre las innovaciones más importantes realizadas en la agricultura se encuentran el método de análisis de productos alimentarios y el sistema de dinamización de aguas. El primero establece la calidad y el nivel de frescura de los alimentos, a partir de la luz que reflejan (física cuántica). El segundo posibilita disminuir el empleo de fitosanitarios y abonos. De esta forma sostenible, la física gana terreno a la química; ya que apuesta por reacciones físicas que no dejan consecuencias en el producto.

En el presente artículo se realiza una revisión sistemática que abarca el desarrollo de la agricultura mediante la intervención de la física. Tiene como objetivo desarrollar un análisis para determinar cuáles son los conocimientos de la física que han influido el desarrollo de la agricultura, lo que ha proporcionado una mayor precisión en el rendimiento del cultivo y una mejor calidad de los alimentos.

Materiales y métodos

En este estudio se realizó una revisión documental entre los meses de noviembre y diciembre de 2023. Para la búsqueda se consideraron las bases de datos SpringerLink, Scopus, Scielo y Redalyc. Por cuanto, se emplearon solo fuentes primarias que incluyeran las palabras clave en el título, resumen, palabras clave o texto del manuscrito.

Las palabras clave que se consideraron para la búsqueda fueron las siguientes.

- a) agricultura sostenible
- b) agricultura inteligente
- c) la agricultura de precisión
- d) agricultura biodinámica
- e) agricultura 4.0. o digital

Posteriormente, se determinaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión para contextualizar la selección de los estudios al objetivo general de la investigación.

- Artículos que aludan el uso de la tecnología en la agricultura.
- Artículos que aludan conocimientos de la física en la agricultura.
- Artículos que estén en los idiomas español o portugués
- Artículos publicados en los últimos cinco años.

Criterios de exclusión

- Artículos que aludan la agricultura desde otros conocimientos que no incluyan la física.
- Artículos o estudios que no evidencian sustentación científica.
- Artículos en otro idioma que no fuera español o portugués.

Una vez extraídos los artículos, se procedió a realizar una lectura de los resúmenes para eliminar las publicaciones duplicadas, y las que no se ajustaban a los criterios de elegibilidad. El corpus documental estuvo integrado por 69 artículos en total, mientras que el corpus final está compuesto por 4 artículos (Tabla 1).

Tabla 1. Corpus inicial y total de documentos en las diferentes bases de datos

Base de datos	Corpus inicial de documentos
SpringerLink	23
Scielo	17
Scopus	17
Redalyc	12
Corpus total de documentos	69

Fuente: elaboración propia

Resultados

Primeramente, se realizará una sistematización teórica de los principales conceptos abordados. Posteriormente, se realizará un análisis de las investigaciones resultantes del proceso de selección. De ellas se sintetizarán los siguientes elementos.

- Título del estudio.
- Objetivos planteados en el estudio.
- Descripción de la tecnología aplicada.
- Resultados que se obtienen.
- Conclusiones finales del estudio.

Principales conceptos abordados

La agronomía sostenible aboga por productos seguros para satisfacer la gran demanda de alimentación, procura disminuir la degradación medioambiental y mejorar otros servicios ecosistémicos como el abastecimiento de recursos medicinales, la regulación del clima, la mitigación de la erosión, la protección de las aguas subterráneas, la modulación de las perturbaciones, el ciclo de los nutrientes, el funcionamiento del hábitat y la información estética (von Cossel et al., 2023).

La agricultura biodinámica constituye una de las formas de la agricultura orgánica. Consiste en un sistema de producción cerrado que pretende reproducir un método agroecológico centrado en la reducción del consumo de energía, y que sea capaz de alcanzar altos niveles de eficiencia ambiental. Este método ha sido institucionalizado por el sello de certificación internacional Demeter®. Las cifras aportadas representan que las explotaciones certificadas Demeter ha aumentado vertiginosamente, hasta junio del año 2019, se contaba con más de 5.900 explotaciones en 63 países (Santoni et al., 2022).

La agronomía de precisión es una estrategia de gestión que colecciona, procesa y analiza datos temporales y espaciales de los agroecosistemas y los combina con otra información para apoyar la toma de decisiones. Para ello, utiliza tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores y satélites. Su objetivo es aumentar la eficacia en la utilización de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agraria (ISPA, 2021, citado en Saavedra-Rincón y Chaparro-Anaya, 2022).

La agronomía de precisión posibilita el empleo de servicios personalizados y en tiempo real sustentados en una variedad de factores como la ubicación, el cultivo, las prácticas de gestión, el nivel de automatización, el tipo de riego, el tamaño de la explotación agrícola y el tipo de suelo. De igual manera, minimiza los costos y el impacto negativo de la agricultura en el medio ambiente, como es el caso del derivado de la aplicación excesiva de pesticidas y fertilizantes, y del riego ineficiente (Linaza, 2021).

La agricultura 4.0. o digital es la modernización de la agricultura de precisión. Es decir, es la agricultura que utiliza las tecnologías de la información y de la comunicación para obtener un desarrollo sostenible y competitivo en los sistemas de producción agrarios (Saavedra-Rincón y Chaparro-Anaya, 2022). Para la implementación de la agricultura 4.0. o digital es imprescindible el desarrollo de redes de comunicación y la adopción de estándares que aseguren la interoperabilidad, la compatibilidad y la comunicación entre dispositivos (Vidosa et al., 2022).

La agricultura inteligente también utiliza las tecnologías de la información y de la comunicación, se basa en datos para hacer frente a los desafíos y oportunidades existentes en la

agricultura. Le posibilita al agricultor obtener información actualizada sobre los productos básicos en los que está interesado; o sea, le proporciona información detallada sobre las tendencias del mercado como, por ejemplo, recibir información sobre las acciones que realizan sus competidores en cuanto al mismo producto. Esto le permite mejorar la rentabilidad y brindar, con antelación, productos o servicios innovadores que pudieran interesar a sus clientes (Rosales-Soto y Arechavala-Vargas, 2020).

La similitud entre la agricultura 4.0. o digital y la agricultura inteligente es que ambas utilizan la tecnología para su desarrollo. La diferencia entre ambas radica en que la primera profundiza en la variabilidad en el terreno, y la segunda incorpora la analítica de datos de acciones de negocio.

Luego de explicar las características que distinguen los principales conceptos abordados se puede plantear que las diferentes investigaciones realizadas en la agricultura revelan una preocupación por cuidar el medio ambiente, mejorar la calidad de los productos y aumentar la producción de alimentos. Y es que no se puede olvidar que el 84% de las emisiones de óxido nitroso proviene de la agricultura, además, el uso de fitosanitarios, de fertilizantes nitrogenados y fertilizantes fosfatados han traído consigo consecuencias negativas para la biodiversidad, la salud humana, los ecosistemas acuáticos, el cambio climático, el suelo y el agua (Cajamar, 2018). Lo anterior ha obligado a implementar vías emergentes que incorporan los conocimientos físicos. A continuación, se analizan 4 estudios que demuestran la intervención de la física en el desarrollo de la agricultura (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de los estudios científicos revisados

Cromatografía circular Pfeiffer en suelo tratado con altas diluciones dinamizadas (2022)	
Objetivo/s	Evaluar los cambios que ocurren en suelos tratados con altas diluciones dinamizadas mediante estadísticas de CCP para verificar las alteraciones en los cromatogramas.
Tecnología aplicada con ayuda de la física	Cromatografía circular Pfeiffer Las imágenes cromatográficas CCP fueron capturadas por un escáner HP y digitalizadas a una resolución de 3 500 × 3 500 píxeles. El análisis computarizado consiste en medir la textura del patrón utilizando el software ImageJ. Los colores del cromatograma son sensibles a cambios en la carga de nutrientes, especialmente, nitrógeno y en la salud general del suelo.
Resultados	Permite analizar la calidad de suelos, abonos y productos agrícolas. Les brinda a los agricultores un indicador instantáneo de biomasa que refleja la actividad biológica y la salud del suelo. Otorga mayor confiabilidad a la técnica al permitir la correlación de las propiedades del suelo por su nivel de organización y puede correlacionarse con calidad/salud.
Conclusiones	Ha sido empleada en prácticas de agricultura biodinámica y orgánica en varias partes del mundo y ha guiado a los agricultores en el manejo ecológico de los suelos. Las altas diluciones dinamizadas y la homeopatía están reguladas en la producción orgánica en Brasil y han mostrado excelentes resultados en la agricultura mundial, mayor crecimiento vegetativo, producción y recuperación de daños.
Detección de trazas de glifosato en malezas a partir de espectroscopia RAMAN y aplicaciones agromáticas (2023)	

Objetivo/s	Revelar los cambios bioquímicos estructurales de las malezas que contienen trazas de glifosato.
Tecnología aplicada con ayuda de la física	Espectroscopia RAMAN (ER) La potencia del láser del Xplora Plus utilizada fue de 532 nm, con un tiempo de adquisición de 3 segundos en 5 acumulaciones y al 1 % de la potencia del láser (mW). Los sensores activos han mostrado ser más exactos para detectar trazas de plaguicidas basadas en características térmicas e infrarrojas, de fluorescencia de clorofila y reflectancia de las plantas.
Resultados	Proporcionan un espectro característico de las vibraciones específicas de una molécula y son valiosas para identificar una sustancia, ya que la ER, contienen bandas vibratorias que pueden asignarse a carbohidratos, carotenoides, proteínas y fenilpropanoides afectados por el glifosato.
Conclusiones	Se detectaron trazas de glifosato en malezas, y se pudo cartografiar su distribución en predios agrícolas en tiempo real. La estandarización de esto puede traer cambios revolucionarios en enfoques de detección y manejo de la resistencia a herbicidas.
Estudio de sistemas IoT aplicados a la agricultura inteligente (2021)	
Objetivo/s	Describir la optimización de la agricultura por medio del Internet de las Cosas (IoT).
Tecnología aplicada con ayuda de la física	Framework IoT La implementación de los sistemas IoT en la agricultura está conformada, entre otros elementos, por una placa base raspberry pi 3 con sensores para la recolección de datos, a su vez, tienen una antena inalámbrica con soporte de LoRa WAN.
Resultados	La información recolectada es guardada en una base de datos para luego analizar y aplicar algoritmos de inteligencia artificial.
Conclusiones	Permite predecir la producción o posibles enfermedades en los cultivos.
Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning (2022)	
Objetivo/s	Analizar el estudio de caso sobre la adopción de IoT (sensores) y análisis de datos en granjas tradicionales de Cachemira para la predicción de costra de manzana.
Tecnología aplicada con ayuda de la física	Nodos de sensores inalámbricos/IoT como entrada para el modelo de regresión lineal. Cada sensor consta de un IRIS equipado con una placa de sensor MTS 420. El sensor DHT22 que está integrado en MTS420 proporciona temperatura y humedad.
Resultados	Los resultados del estudio de caso sobre la adopción de la predicción de la enfermedad de la sarna del manzano en los huertos de Cachemira han mostrado una mejora en términos de difusión de información sobre los factores responsables de la enfermedad antes mencionada.
Conclusiones	La investigación demostró el poder y la capacidad de las técnicas informáticas análisis de datos (DA), internet de las cosas, redes de sensores inalámbricos, análisis de datos y aprendizaje automático en la agricultura.

Fuente: elaboración propia

Discusión

La luz es uno de los elementos que ha sido ampliamente investigado por la física. Sus increíbles descubrimientos han sido merecedores de varios Premios Nobel. Las investigaciones desarrolladas han ido evolucionando desde la ciencia de la luz, hacia la óptica y la fotónica. El láser y su carácter interdisciplinario, que incluyen invenciones como métodos para enfriar y atrapar átomos, son utilizados como parte de la tecnología aplicada a varias ciencias, como la agricultura (Guzmán, 2022).

A partir de los nuevos avances de la agricultura, específicamente, con la incorporación de la tecnología, la física aplicada ocupa un lugar privilegiado. En este sentido, las redes de sensores inalámbricos (WSN) y la identificación por radiofrecuencia (RFID) se consideran dos de los componentes principales de la tecnología IoT (Fortino et al., 2020, citado en Akhter & Ahmad, 2022).

La agricultura de precisión implica el uso de sensores y cámaras en tractores y drones lo que posibilita el análisis de suelos y cultivos. La fotónica permite pronosticar el tiempo ideal para cosechar cultivos. Con la incorporación de equipos de visión artificial, los circuitos integrados de fotones se emplean para clasificar frutas. La iluminación LED se utilizan para cultivar verduras y frutas frescas y limpias. Por otro lado, la seguridad alimentaria puede asegurarse con tecnologías fotónicas. La espectroscopia se usa para identificar contaminantes en vegetales y otros productos agrícolas antes de que sean consumidos (Lee, 2016, citado en Varón y Cárdenas, 2022).

Son diversos los usos de la fotónica en la agricultura, por ejemplo, al facilitar el empleo de sensores remotos satelitales para detectar efectos en los cultivos a gran escala, tecnología de escaneo e imágenes infrarrojas para monitorear la producción y calidad de los alimentos, y sistemas de sensores para la siembra y el riego (Innoget, 2017, citado en Varón y Cárdenas, 2022).

Las redes de sensores inalámbricos se utilizan en diversas aplicaciones agronómicas, por ejemplo, en la observación remota de las condiciones ambientales y del suelo para predecir la salud de los cultivos. El calendario de riego de los campos agrícolas se pronostica empleando WSN como observador de las condiciones ambientales como presión, humedad, temperatura, humedad del suelo, salinidad del suelo y conductividad del suelo (Akhter & Ahmad, 2022).

Las tecnologías de teledetección, como drones, tripulaciones, aviones, satélites y otros sensores terrestres, son empleados para recopilar datos acerca de los cultivos y condiciones del suelo. Además, posibilita la identificación de patrones espaciales coincidentes con plagas o enfermedades de los cultivos. Los datos de sensores y otros datos asociados con coordenadas geoespaciales de un sistema global de navegación por satélite (GNSS) proporcionan información para crear mapas. Los mapas de suelos ofrecen información valiosa sobre la distribución espacial de las propiedades físicas de un terreno como son la disponibilidad de agua, la capacidad de retención de nutrientes, la densidad aparente, la porosidad, la disponibilidad de nutrientes, la topografía, las tendencias meteorológicas y climáticas, y el tiempo de cosecha (Karunathilake et al., 2023).

Conclusiones

Actualmente, la agricultura emplea tecnologías de avanzada con el objetivo de elevar la productividad agrícola y disminuir el daño causado al medio ambiente. La agricultura de precisión o inteligente constituye una respuesta real a la problemática que enfrenta el mundo: el hambre.

Los conocimientos de la física constituyen un pilar esencial para llevar a cabo la agricultura de precisión o inteligente. La teledetección, la fotónica, las redes de sensores inalámbricos son tecnologías que demuestran que la física se ha abierto su propio espacio en la agricultura.

Referencias bibliográficas

- Akhter, R., & Ahmad, S. (2022). Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34, 5602–5618. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.013>
- Cajamar Caja Rural. (2018). Mediterráneo Económico, Colección de Estudios Socioeconómicos. *Bioeconomía y Desarrollo Sostenible*, 31, 293-294.
- Domingues, S., Boff, P., & Carissimi, M. I. (2022). Cromatografía circular Pfeiffer en suelo tratado con altas diluciones dinamizadas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7), 1183-1194.
- Espinosa, A., Ponte, D., Gibeaux, S., & González, C. (2021). Estudio de sistemas IoT aplicados a la agricultura inteligente. *Plus (+) Economía*, 9(1), 33-42. <https://revistas.unachi.ac.pa/index.php/pluseconomia/article/view/479>
- Galindo, G., Schwentesius, R., & Saldierna, G. (2023, 28 de noviembre). *Detección de trazas de glifosato en malezas a partir de espectroscopia RAMAN y aplicaciones agromáticas*. XLIV Congreso Nacional de la Ciencia de la Maleza 2023 <https://www.researchgate.net/publication/375958882>
- Guzmán, A. M. (2022). Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(181), 920-938. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1748>
- Karunathilake, E.M.B.M., Le, A.T., Heo, S., Chung, Y.S., & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, 13(1593), 1-26. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>
- Linaza, M. T., Posada, J., Bund, J., Eisert, P., Quartulli, M., Döllner, J., Pagani, A., Olaizola, I., G., Barriguinha, A., Moysiadis, T., & Lucat, L. (2021). Data-Driven Artificial Intelligence Applications for Sustainable Precision Agriculture. *Agronomy*, 11(6), 1227. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061227>
- Organización de Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023-Spanish.pdf?_gl=1*_9orizx*_ga*MTEwMDUyNDYzMi4xNzAxMDkzOTY4*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcwNDkwMTQ3OC42LjEuMTcwNDkwMjM1NS4wLjAuMA
- Rosales-Soto, A. y Arechavala-Vargas, R. (2020). Agricultura inteligente en México: Análítica de datos como herramienta de competitividad. http://www.web.facpya.uanl.mx/vinculategica/Vinculategica6_2/37_Rosales_Arechavala.pdf
- Saavedra-Rincón, S. y Chaparro-Anaya, O. (2022). Desarrollo de una aplicación en Python para mapeo de variabilidad espacial en la agricultura digital. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 26, 7-27. <http://doi.org/10.53807/revAIA.22.26.01>
- Santoni, M., Ferretti, L., Migliorini, P., Vazzana, C., & Pacini, G. C. (2022). A review of scientific research on biodynamic agricultura. *Organic Agriculture*, 12, 373–396. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00394-2>
- Varón, G. O. y Cárdenas, R. A. (2022). *Desarrollo de un plan de acción para la apropiación y contextualización del concepto de fotónica y sus aplicaciones en los sectores (academia –*

empresa – gobierno). [tesis de licenciatura, Universidad Libre – Seccional Cúcuta].
Repositorio Institucional UN.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/23824/INFORME%20FINAL%20-%20FOTONICA%20-%20VERSION%20FINAL.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Vidosa, R., Iglesias, N., Jelinski, F., Tapia, E., & Lavarello, P. (2022). Reestructuración de la industria de maquinaria agrícola mundial: nuevos estándares frente a la agricultura 4.0. *SaberEs*, 14(1), 85-110. <https://saberes.unr.edu.ar/index.php/revista/article/view/269>
- von Cossel, M., Castro-Montoya, J., & Iqbal, Y. (2023). Social-Ecologically More Sustainable Agricultural Production. *Agronomy*, 13(11), 2818. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112818>