

Avances y perspectivas de la agricultura de precisión para la sostenibilidad agrícola Advances and prospects of precision agriculture for agricultural sustainability

Jorge Martín Guzmán-Albores^a; Manuel de Jesús Matuz-Cruz^b; Julia Yazmín Arana-Llanes^c;
Elizabeth López-Carrasco^d; Vidalia Gómez-Vázquez^e; Noé González-Cárdenas^f

Abstract:

Precision agriculture is an agricultural practice that uses advanced technologies, such as remote sensing, intelligent irrigation systems, and nanotechnology, to optimize natural resource management and increase agricultural productivity. This discipline emerges in response to contemporary challenges in agriculture, such as increasing food demand, resource scarcity, and environmental impacts. By collecting, analysing, and applying large volumes of data in real-time, precision agriculture enables farmers to make informed decisions and adapt quickly to changing environmental conditions. While precision agriculture offers innovative solutions, its full potential has yet to be realized. Further research and development of new technologies are needed, as well as improved accessibility and adoption by farmers.

Keywords:

Precision agriculture, Nanotechnology, Remote Sensing, Dose Rate Technology

Resumen:

La agricultura de precisión es una práctica agrícola que utiliza tecnologías avanzadas, como sensores remotos, sistemas de riego inteligente y nanotecnología, para optimizar la gestión de los recursos naturales y aumentar la productividad agrícola. Esta disciplina surge como respuesta a los desafíos contemporáneos de la agricultura, como el aumento de la demanda de alimentos, la escasez de recursos y los impactos ambientales. Mediante la recopilación, análisis y aplicación de grandes volúmenes de datos en tiempo real, la agricultura de precisión permite a los agricultores tomar decisiones informadas y adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del entorno. Si bien la agricultura de precisión ofrece soluciones innovadoras, su pleno potencial aún no ha sido alcanzado. Es necesario continuar investigando y desarrollando nuevas tecnologías, así como mejorar la accesibilidad y la adopción por parte de los agricultores.

Palabras Clave:

Agricultura de precisión, Nanotecnología, Teledetección, Tecnología de Dosis

^a Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tapachula; Tapachula-Chiapas; México, <https://orcid.org/0000-0002-3383-4605>, Email: jmguzmana@tapachula.tecnm.mx

^b Autor de Correspondencia, Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tapachula; Tapachula-Chiapas; México, <https://orcid.org/0000-0002-9511-7572>, Email: mjmatuz@tapachula.tecnm.mx

^c Escuela Superior de Tlahuelilpan. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; <https://orcid.org/0000-0002-4986-97655>, Email: julia_arana@uaeh.edu.mx

^d Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tapachula; Tapachula-Chiapas; México, <https://orcid.org/0009-0008-2581-1674>, Email: eli.lopez@tapachula.tecnm.mx

^e Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tapachula; Tapachula-Chiapas; México, <https://orcid.org/0009-0008-0432-376X>, Email: plan_tapachula@tecnm.mx

^f Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tapachula; Tapachula-Chiapas; México, <https://orcid.org/0009-0006-0531-9039>, Email: noe.gonzalez@tapachula.tecnm.mx

Introducción

La agricultura, como una de las prácticas más antiguas conocidas por la humanidad, ha experimentado una transformación significativa en el siglo veintiuno. Actualmente, la población mundial ha aumentado en más de 5 mil millones de personas y las estimaciones de la encuesta demográfica predicen que la población mundial llegará a 9.6 mil millones de personas. Este enorme crecimiento de la población mundial requiere mejoras constantes en el rendimiento de los cultivos ^[1].

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, las prácticas agrícolas actuales pueden alimentar a aproximadamente 8 millones de personas, pero pueden ser no sostenibles sin intervención tecnológica ^[2,3]. Por otro lado, las tierras agrícolas están perdiendo su fertilidad debido a los cambios sociales en los estilos de vida y las actividades humanas. Esto podría provocar hambrunas debido a la escasa producción agrícola. Además, la seguridad alimentaria y la agricultura enfrentan desafíos importantes, como el declive de la fertilidad de los suelos, baja producción de los cultivos, fluctuaciones de temperatura, patógenos vegetales y la disminución de la eficacia de los productos agroquímicos (debido principalmente al uso innecesario de fertilizantes y pesticidas, y a la disminución de la disponibilidad de agua de riego) ^[4].

A lo largo de sesenta años, la Revolución Verde logró el aumento necesario en los rendimientos mediante una fertilización masiva con nitrógeno, una expansión mínima del uso de la tierra, estrategias de riego, mecanización y mejoramiento de variedades de alto rendimiento ^[5]. Sin embargo, la producción agrícola necesita pasar de los métodos tradicionales a nuevas tecnologías capaces de aumentar la productividad, impulsar la economía y cuidar el medio ambiente. Una alternativa para abordar cada una de estas problemáticas es el uso de la agricultura de precisión (AP).

La agricultura de precisión es un sistema que tiene como objetivo maximizar el potencial de los recursos naturales, humanos y mecánicos con una mínima perturbación del agroecosistema ^[1]. La AP brinda la oportunidad de desarrollar estrategias de gestión para utilizar los recursos necesarios en la cantidad requerida, en el lugar adecuado y momentos oportunos, por lo que tiene un gran potencial para mejorar la gestión ambiental y económica de las empresas agrícolas. Por tal motivo, el objetivo de este manuscrito es explorar y analizar las tecnologías y herramientas en agricultura de precisión, con el fin de

comprender su potencial para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y productividad agrícola.

Métodos

El presente estudio se trata de una revisión narrativa de la literatura sobre las Tecnologías y herramientas en agricultura de precisión, para lo cual se realizó una búsqueda electrónica en las bases de datos Pudmed y Sciencie direct, La selección de los estudios preliminares se realizó empleando un algoritmo de búsqueda que incluyó los siguiente conceptos “agricultura de precisión”, “tecnología”, “herramientas y tecnologías”, “tecnologías de tasa variable”, “sensores remotos”, “sistema de riego inteligente”, “nanotecnología” y “mapeo del suelo”.

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión ha emergido como un campo revolucionario que integra tecnologías avanzadas para optimizar la producción agrícola y mitigar los impactos ambientales. En un mundo donde la demanda de alimentos está en constante aumento y los recursos naturales son limitados, la implementación de sistemas agrícolas inteligentes se vuelve crucial para garantizar la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad a largo plazo. Uno de los pilares fundamentales de la agricultura de precisión es la utilización de datos y análisis avanzados para tomar decisiones informadas en tiempo real.

De acuerdo con Araus y Cairns (2014), la fenotipificación de alto rendimiento en el campo se ha convertido en la nueva frontera de la mejora de cultivos, permitiendo a los agricultores identificar rasgos deseables y seleccionar variedades más resistentes a las condiciones adversas. Esta capacidad de recopilar y analizar grandes volúmenes de datos de manera eficiente ha transformado la forma en que se abordan los desafíos agrícolas ^[6]. Además, la inclusión de tecnologías como la visión por computadora y el aprendizaje profundo ha ampliado significativamente las capacidades para la detección de malezas y enfermedades en los cultivos. La eficacia de los modelos de aprendizaje automático, particularmente de los algoritmos de redes neuronales artificiales, ha sido demostrada en la predicción y optimización eficiente de la regeneración de plantas. Esto subraya su utilidad en la mejora de los protocolos de cultivo de tejidos vegetales con fines de mejoramiento genético ^[7].

Herramientas y tecnologías

La agricultura de precisión implica la utilización de tecnologías avanzadas que, mediante la recolección, análisis y aplicación de datos con herramientas tecnológicas, facilitan la toma de decisiones con el fin de mejorar la eficiencia y productividad agrícola con un enfoque en la sostenibilidad ^[8]. Las herramientas y tecnologías hoy en día son las siguientes:

a) Tecnologías de dosis o tasa variable

En agricultura de precisión, una tarea crítica es la aplicación variable de fertilizantes, herbicidas o pesticidas. Uno de los avances más significativos en la Agricultura de Precisión es la Tecnología de Tasa Variable (VRT), que permite ajustar las tasas de aplicación de insumos en función de la variabilidad del campo ^[9]. Esta capacidad de adaptación a las condiciones específicas de cada área de cultivo ha transformado la forma en que se gestionan los recursos, maximizando su uso y minimizando los desperdicios. Se ha logrado avances significativos en el desarrollo de equipos capaces de llevar a cabo la VRA basándose en planes predefinidos. Aunque los detalles de diseño pueden variar entre diferentes máquinas, el componente central de la tecnología de tasa variable (VRT) generalmente involucra un sistema integrado de sensores y controladores de dosis ^[10]. Estos sistemas de sensores a menudo incluyen receptores GPS y se utilizan para proporcionar información georreferenciada que establece los puntos de ajuste específicos para que los controladores de dosis suministren diferentes cantidades de productos agroquímicos en ubicaciones específicas. La mayoría de los aplicadores disponibles en el mercado utilizan boquillas de orificio fijo controladas mediante modulación de ancho de pulso o boquillas de orificio variable controladas por válvula de cierre rápido. Un análisis del tiempo de respuesta de estos diseños reveló que, si bien el aplicador de ancho pulso mostraba un tiempo de respuesta ligeramente más rápido, el aplicador de cierre rápido lograba mantener un flujo y una presión más estables, con menos errores de aplicación, tanto con controles basados en sensores como en mapas ^[11].

b) Sensores remotos o teledetección

El uso de la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección en la investigación agrícola proporciona una visión holística de los factores ambientales que influyen en la salud de las plantas. Estas tecnologías permiten la recopilación, análisis y visualización de datos espaciales y temporales, lo que facilita la identificación de patrones y tendencias relacionadas con enfermedades de las plantas, estrés

hídrico, deficiencias nutricionales y otros problemas que afectan la productividad agrícola. Además, la integración de datos de múltiples fuentes, como imágenes satelitales, datos climáticos y mapas de suelos, permite una evaluación exhaustiva de las condiciones del campo y la toma de decisiones informadas ^[12].

Los sensores remotos (SR) son dispositivos diseñados para recopilar datos a distancia, lo que significa que aprovechan las emisiones electromagnéticas de la superficie terrestre para observar su comportamiento correspondiente ^[13]. Se dispone de una variedad de sensores para la medición y evaluación de los parámetros de un campo agrícola, entre ellos se encuentran los sensores de suelo, que pueden reducir la necesidad de mano de obra y representar una herramienta de gestión valiosa, siempre y cuando proporcionen resultados precisos y los datos se interpreten de manera adecuada ^[14].

Se han llevado a cabo diversos estudios de referencia que exploran el papel de la teledetección en el desarrollo sostenible, abordando una amplia gama de temas que incluyen la evaluación ambiental, los riesgos naturales y el desarrollo socioeconómico, entre otros. Por otra parte, los sensores remotos han sido empleados en la gestión forestal sostenible, en la creación de índices de vegetación globales que permiten monitorear el crecimiento dinámico de las plantas, así como en investigaciones sobre los recursos hídricos ^[15,16,17].

c) Sistema de riego inteligente

La gestión óptima del agua de riego es uno de los principales beneficios de la agricultura de precisión, siendo fundamental para el desarrollo agrícola sostenible, la seguridad alimentaria y el progreso económico en general ^[18]. Esto cobra mayor importancia en un contexto de cambio climático y competencia por el agua con otros sectores económicos. El riego de precisión permite a los agricultores aplicar la cantidad exacta de agua en momentos específicos, en contraposición al riego convencional ^[19].

Cada vez más, se prioriza el riego inteligente, basado en conocimientos y tecnología, debido a sus ventajas, como el control automático y la capacidad de optimizar tanto el rendimiento de los cultivos como la eficiencia en el uso del agua de riego ^[20].

En los últimos años, la literatura ha presentado diversos estudios centrados en la optimización de la gestión del agua de riego. Rodríguez-Ortega et al. (2017) evaluaron los efectos de diferentes temperaturas en el crecimiento

del tomate de invernadero, utilizando un sistema de riego automático proponiendo una estrategia de riego óptima para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego ^[21]. Por otro lado, Goap et al. (2018) desarrollaron un sistema de riego inteligente basado en el Internet de las Cosas (IoT), combinado con un enfoque híbrido de aprendizaje automático para prever la humedad del suelo.

El algoritmo propuesto utiliza datos de sensores recientes y pronósticos meteorológicos para predecir la humedad del suelo en los próximos días. Además, este enfoque de predicción se incorpora en un prototipo de sistema autónomo que es rentable, ya que se fundamenta en tecnologías de código abierto ^[22]. El modo automático de este sistema lo convierte en una solución inteligente y adaptable que puede ser personalizada según los distintos escenarios de aplicación.

d) Nanotecnología

La nanotecnología ha emergido como una herramienta prometedora en el campo de la agricultura de precisión, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la productividad agrícola de manera sostenible. La agricultura de precisión se apoya en una variedad de tecnologías, como el sistema de información geográfica (SIG), el sistema de posicionamiento global (GPS) y la teledetección. Además, la nanotecnología se ha integrado en la agricultura de precisión a través de sistemas de suministro inteligente basados en nanosensores, lo que permite a los agricultores optimizar el uso de insumos y recursos como nutrientes, agua y productos agroquímicos, al mismo tiempo que aumentan la productividad mediante una supervisión más detallada ^[23,24].

Seleiman et al. (2020a) reportaron que la nano-fertilización se presenta como una técnica emergente que puede beneficiar significativamente a la agricultura moderna. La aplicación de nano-fertilizantes puede mejorar la eficiencia de la entrega de nutrientes a las plantas, lo que resulta en un mejor crecimiento y desarrollo de los cultivos ^[25].

En efecto, los sistemas nanotecnológicos permiten la implementación de nanosensores, los cuales, conectados a dispositivos GPS, monitorean de manera efectiva el estado del suelo y el crecimiento de los cultivos. Ryu et al. (2020) destacaron el uso de sensores electroquímicos para la detección de especies de nitrógeno en la agricultura de precisión. Estos sensores ofrecen una forma precisa y eficiente de monitorear los niveles de nutrientes en el suelo, lo que permite una aplicación más precisa de fertilizantes y evita la contaminación ambiental

por exceso de nutrientes ^[26]. Estos nanosensores desempeñan varias funciones clave, como localizar variables ambientales para asegurar el óptimo crecimiento de los cultivos y señalar problemas específicos en las áreas de cultivo ^[24]. Por lo tanto, el uso de la nanotecnología en la agricultura de precisión continúa en aumento, ofreciendo nuevas oportunidades para mejorar la productividad agrícola.

e) Mapeo de suelo

El muestreo del suelo desempeña un papel crucial en la obtención de información sobre su composición, incluida la textura (arena, limo, arcilla), la disponibilidad de nutrientes esenciales para los cultivos (N, P, K, Ca, Mg, pH, calcio), y otras propiedades químicas (materia orgánica, salinidad, nitratos, sulfatos, metales pesados) ^[27]. Además, permite detectar la compactación del suelo, el nivel de humedad y otras características mecánicas y físicas.

Existen distintos métodos para llevar a cabo el muestreo del suelo, entre ellos el muestreo aleatorio, adaptativo y en cuadrícula. En el muestreo aleatorio, las muestras se toman de manera aleatoria en diferentes ubicaciones dentro del campo. Por otro lado, en el muestreo adaptativo, la selección de las ubicaciones de las muestras depende de la información previa disponible. Mientras que el muestreo en cuadrícula implica la recolección sistemática de muestras en puntos específicos del campo. Hasta la fecha, ninguna de las técnicas de muestreo del suelo existentes ha sido identificada como la más efectiva ^[23].

Otra técnica para cartografiar las propiedades del suelo en un campo es mediante el uso de sensores en movimiento, los cuales tienen el potencial de ofrecer una mayor densidad de mediciones a un costo relativamente bajo. Estos sensores pueden ser integrados con receptores de señales de satélite (GNSS) para generar mapas de las propiedades del suelo. Alternativamente, pueden operar en tiempo real, donde la salida del sensor se utiliza instantáneamente para aplicar fertilizantes, cal o estiércol en dosis variables (nitratos, sulfatos, metales pesados) ^[28].

Conclusiones

La agricultura de precisión representa una evolución significativa en la forma en que se cultiva y gestiona la tierra, ofreciendo soluciones innovadoras para abordar los desafíos contemporáneos de la agricultura. Mediante el uso de tecnologías avanzadas como sensores remotos, sistemas de riego inteligente, mapeo de suelo y nanotecnología, la agricultura de precisión permite una

gestión más eficiente de los recursos naturales, una mayor productividad agrícola y una reducción de los impactos ambientales.

La capacidad de recopilar, analizar y aplicar grandes volúmenes de datos en tiempo real está transformando la toma de decisiones agrícolas, permitiendo a los agricultores adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes y optimizar el rendimiento de los cultivos.

En un contexto de creciente demanda de alimentos y recursos naturales limitados, la adopción de sistemas agrícolas inteligentes se convierte en una necesidad crucial para asegurar la seguridad alimentaria mundial y promover la sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, para maximizar el potencial de la agricultura de precisión, es necesario continuar investigando y desarrollando nuevas tecnologías, así como mejorar la accesibilidad y la adopción por parte de los agricultores.

Referencias

- [1] Zain, M., Ma, H., Chaudhary, S., Nuruzaman, M., Azeem, I., Mehmood, F., Aiwang D. & Sun, C. (2023). Nanotechnology in precision agriculture: Advancing towards sustainable crop production. *Plant Physiol. Biochem.* 2006:108244.
- [2] [USDA]. United States Department of Agriculture. (2018). World Agricultural Production. Circular Series.
- [3] Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* 36(2-3), 113-132.
- [4] Shahzad, A. N., Qureshi, M. K., Wakeel, A., & Misselbrook, T. (2019). Crop production in Pakistan and low nitrogen use efficiencies. *Nat. Sustain.* 2(12), 1106-1114.
- [5] Zain, M., Ma, H., Nuruzzaman, M., Chaudhary, S., Nadeem, M., Shakoore, N., Azeem I., Duan A., Sun Ch. & Ahamad, T. (2023). Nanotechnology based precision agriculture for alleviating biotic and abiotic stress in plants. *Plant Stress*, 100239.
- [6] Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci.* 19(1), 52-6.
- [7] Aasim, M., Katirci, R., Baloch, F. S., Mustafa, Z., Bakhsh, A., Nadeem, M. A., Ali, S.A., Hatipoglu, R., Ciftci, V., Habyarimana, E., Karaköy, T. & Chung, Y. S. (2022). Innovation in the breeding of common bean through a combined approach of in vitro regeneration and machine learning algorithms. *Front. Genet.* 13, 897696.
- [8] Avola, G., Distefano, M., Torrisi, A., & Riggi, E. (2024). Precision agriculture and patented innovation: State of the art and current trends. *World Patent Information*, 76, 102262.
- [9] Nowak, B. (2021). Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agric. Res.* 10(4), 515-522.
- [10] Bennur, P. J., & Taylor, R. K. (2010). Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system. *Appl. Eng. Agric.* 26(6), 1069-1075.
- [11] Dwivedi, R. S. (2017). Remote sensing of soils (Vol. 497). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- [12] Ashraf, A., Ahmad, L., Ferooz, K., Ramzan, S., Ashraf, I., Khan, J. N., Shehnaz, E., Ul-Shafiq, M., Akhter S., Nabi, A., Rasool R. & Nazir, S. (2023). Remote Sensing as a Management and Monitoring Tool for Agriculture: Potential Applications. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8), 324-343.
- [13] Zhang, Q. (2016). Precision agriculture technology for crop farming (p. 374). Taylor & Francis.
- [14] Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review. *Animals.* 11(8), 2345, 1-18.
- [15] Dudhani, S., Sinha, A. K., & Inamdar, S. S. (2006). Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India. *Energy policy*, 34(17), 3195-3205.
- [16] Avtar, R., Kumar, P., Oono, A., Saraswat, C., Dorji, S., & Hlaing, Z. (2017). Potential application of remote sensing in monitoring ecosystem services of forests, mangroves and urban areas. *Geocarto Int.* 32(8), 874-885.

- [17] Holloway, J., & Mengersen, K. (2018). Statistical machine learning methods and remote sensing for sustainable development goals: A review. *Remote Sens.* 10(9), 1365.
- [18] Bucci, G., Bentivoglio, D., & Finco, A. (2018). Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems: state of art in literature and research. *Calitatea*, 19(S1), 114-121.
- [19] Researcher E. Precision Farming: Sowing the Seeds of a New Agricultural Revolution. The Community Research and Development Information Service (CORDIS). Luxembourg; 2017.
- [20] Shi, J., Wu, X., Zhang, M., Wang, X., Zuo, Q., Wu, X., Zhang, H. & Ben-Gal, A. (2021). Numerically scheduling plant water deficit index-based smart irrigation to optimize crop yield and water use efficiency. *Agric. Water Manag.*, 248, 106774.
- [21] Rodriguez-Ortega, W. M., Martinez, V., Rivero, R. M., Camara-Zapata, J. M., Mestre, T., & Garcia-Sanchez, F. (2017). Use of a smart irrigation system to study the effects of irrigation management on the agronomic and physiological responses of tomato plants grown under different temperatures regimes. *Agric. Water Manag.* 183, 158-168.
- [22] Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open-source technologies. *Comput. Electron Agri.* 155, 41-49.
- [23] Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. (2012). Implications of nanobiosensors in agriculture.
- [24] Prasad, R., Pandey, R., & Barman, I. (2016). Engineering tailored nanoparticles with microbes: quo vadis?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Wires Nanomed. Nanobi.* 8(2), 316-330.
- [25] Seleiman, M. F., Almutairi, K. F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B. A., & Battaglia, M. L. (2020). Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use?. *Plants*, 10(1), 2.
- [26] Ryu, H., Thompson, D., Huang, Y., Li, B., & Lei, Y. (2020). Electrochemical sensors for nitrogen species: A review. *Sensors and Actuators Reports*, 2(1), 100022.
- [27] Pedersen, S. M., & Lind, K. M. (Eds.). (2017). Precision agriculture: Technology and economic perspectives (pp. 52-53). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [28] Wollenhaupt, N. C., Mulla, D. J., & Gotway Crawford, C. A. (1997). Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. The state of site-specific management for agriculture, 19-53.