6. Transformación agrícola: tecnologías emergentes como clave para la sostenibilidad en 2025

Alan Joel Servín Prieto*
Mónica Hernández López**
Tania Elizabeth Velásquez Chávez***
José María Juárez Hernández****
Marcial Humberto Vásquez Corral*****
Adriana Viramontes Acosta******
Jesús Alejandro Valdés Nieblas*******



DOI: https://doi.org/10.52501/cc.361.06

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el papel de las tecnologías emergentes en la transformación agrícola hacia modelos más sostenibles para el año 2025. Frente a desafíos como el cambio climático, la degradación del suelo, la escasez de agua y la creciente demanda alimentaria, se plantea la necesidad de adoptar herramientas innovadoras que permitan una producción eficiente y ambientalmente responsable. El marco teórico se fundamenta en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando aquellos directamente relacionados con la agricultura: hambre cero (ODS 2), agua

* Doctor en Ciencias en Agua y Suelo. Docente-investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5534-7875
** Doctora en Ciencias Agrarias. Docente-investigadora en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6249-127X
*** Maestra en Ingeniería Bioquímica. Docente-investigadora, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7788-1786
**** Maestro en Educación. Docente-investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México. México. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5790-651X
***** Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica. Docente-investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México.
****** Maestra en Ciencias de la Ingeniería Industrial. Docente-investigadora en el Instituto Tecnológico de La Laguna, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3317-4181
******* Doctor en Administración. Docente-investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8184-3349

limpia (ODS 6), producción responsable (ODS 12), acción por el clima (ODS 13), vida de ecosistemas terrestres (ODS 15) y alianzas para lograr los objetivos (ODS 17). Se abordan tecnologías como la agricultura de precisión, biotecnología, inteligencia artificial, Big Data, robótica y sistemas de monitoreo satelital, los cuales tienen un impacto positivo en la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas agrícolas. En las conclusiones se resalta que la integración de estas tecnologías permite mejorar la productividad, optimizar el uso de insumos, monitorear los cultivos en tiempo real y reducir la huella ambiental. Dos estudios de caso aplicados al cultivo de nogal pecanero evidencian el potencial de la teledetección y del uso de lixiviado de vermicompost en el mejoramiento de las condiciones del suelo y la salud de las plantas. Finalmente, se concluye que la transición hacia una agricultura sostenible requiere de políticas públicas inclusivas, una inversión en infraestructura tecnológica, educación rural y alianzas estratégicas para garantizar la seguridad alimentaria global sin comprometer los recursos del planeta.

Palabras clave: *agricultura de precisión, biotecnología, cambio climático, sostenibilidad.*

Introducción

La agricultura ha sido un pilar fundamental en el desarrollo humano y en la supervivencia de las sociedades desde sus inicios. A lo largo de los siglos, las prácticas agrícolas han evolucionado considerablemente, adaptándose a las nuevas necesidades de una población mundial en constante crecimiento (Arias *et al.*, 2019). Sin embargo, en las últimas décadas, la agricultura ha enfrentado desafíos sin precedentes debido a la aceleración del cambio climático, la degradación de los recursos naturales, la escasez de agua, y el aumento de la demanda alimentaria (FAO, 2025). En este contexto, surge la necesidad urgente de transformar los métodos de producción agrícola hacia modelos más sostenibles, capaces de garantizar la seguridad alimentaria para las generaciones futuras mientras se protege el medio ambiente.

El año 2025 marca un hito clave en este proceso de transformación. Si bien los desafíos son numerosos, las tecnologías emergentes ofrecen un

potencial extraordinario para cambiar radicalmente la manera en que cultivamos la tierra, gestionamos los recursos y producimos alimentos. Tecnologías como la agricultura de precisión, la biotecnología, la IA, el big Data, la robótica, y la automatización se están perfilando como herramientas clave para abordar las crecientes presiones sobre los sistemas agrícolas tradicionales (Herrera Cardoso *et al.*, 2024). Estas innovaciones no solo prometen aumentar la eficiencia en la producción, sino que también tienen el potencial de reducir los impactos ambientales negativos, mejorar la gestión de los recursos y aumentar la resiliencia frente a las amenazas del cambio climático.

Una de las grandes promesas de estas tecnologías emergentes es su capacidad para hacer un uso más eficiente de los recursos naturales. La agricultura convencional, en muchos casos, ha sido una de las principales responsables de la degradación del medio ambiente. El uso excesivo de agua para riego, el uso indiscriminado de pesticidas y fertilizantes, y la deforestación son algunos de los problemas ambientales asociados con los métodos agrícolas tradicionales. En este sentido, la adopción de tecnologías avanzadas puede representar un cambio radical hacia un modelo más sostenible. Por ejemplo, los sensores de humedad en el suelo y los sistemas de riego automatizados basados en datos en tiempo real pueden reducir significativamente el consumo de agua, mientras que los drones y satélites pueden monitorear la salud de los cultivos y detectar problemas antes de que se conviertan en amenazas a gran escala.

La agricultura de precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola. Esta es la definición oficial de agricultura de precisión aprobada en julio de 2019 por la *International Society of Precision Agriculture* (ISPA) (2024).

En el ámbito agrícola, la biotecnología vegetal ha sido crucial para mejorar la productividad y promover prácticas agrícolas más sostenibles. Una de las principales herramientas utilizadas es la modificación genética, que ha permitido el desarrollo de cultivos más resistentes a plagas, enfermedades y condiciones climáticas adversas, como la sequía y las temperaturas extre-

mas. Estos cultivos no solo ayudan a garantizar la seguridad alimentaria en contextos de cambio climático, sino que también reducen la necesidad de pesticidas y otros insumos químicos, contribuyendo a una agricultura más amigable con el medio ambiente (Ranjha *et al*., 2022).

El *big data* y la IA también juegan un papel crucial en la transformación agrícola. A medida que los agricultores adoptan sistemas de monitoreo más sofisticados, pueden recopilar grandes volúmenes de datos sobre el estado del suelo, el clima, los cultivos y otros factores relevantes. Esta información, procesada y analizada mediante algoritmos avanzados, permite tomar decisiones más informadas y específicas, optimizando los rendimientos y reduciendo el uso de insumos como fertilizantes y pesticidas. Además, los modelos predictivos basados en IA pueden ayudar a anticipar condiciones climáticas extremas, lo que permitiría a los agricultores tomar medidas preventivas y adaptar sus prácticas a las variabilidades del clima. Además de ayudar en la toma de decisiones, la IA está revolucionando la mecanización agrícola. Robots inteligentes que utilizan visión por computadora e IA están siendo desarrollados para realizar tareas como la cosecha y la siembra de manera autónoma, reduciendo la necesidad de mano de obra y mejorando la eficiencia (Bai *et al*., 2022).

La inteligencia artificial se refiere a la creación de sistemas inteligentes capaces de realizar tareas que, por lo general, requerirían inteligencia humana, tales como el aprendizaje, la resolución de problemas y la toma de decisiones (Holzinger *et al.*, 2023). Aunque se ha establecido como una herramienta esencial en el sector tecnológico, su aplicación se ha expandido a las ciencias de la vida, incluyendo la medicina, la microbiología, la genómica y la biotecnología (Leite *et al.*, 2021).

La agricultura enfrenta desafíos históricos y contemporáneos, como el cambio climático y el aumento de la población mundial, entre muchos otros. Estos problemas han resaltado la necesidad de encontrar enfoques tecnológicos sostenibles que puedan asegurar una producción suficiente de alimentos, con menor impacto ambiental (Tilman *et al*., 2002). La convergencia entre la IA y la biotecnología promete transformar la agricultura, desde la mejora genética de cultivos hasta la automatización de procesos, revolucionando la forma en que se producen alimentos y se gestionan los recursos naturales para enfrentar los desafíos futuros.

Sin embargo, a pesar de los avances prometedores, la transición hacia una agricultura más sostenible mediante el uso de tecnologías emergentes no está exenta de desafíos. A nivel global, la adopción de estas tecnologías está lejos de ser homogénea. Los países en desarrollo enfrentan barreras significativas en términos de acceso a la tecnología, formación adecuada, infraestructura y financiación. Además, el coste inicial de las nuevas tecnologías puede ser prohibitivo para pequeños productores y agricultores, lo que genera una brecha de acceso que podría profundizar las desigualdades existentes en el sector agrícola (FAO, 2022).

Otro desafío importante es la resistencia a los cambios, tanto en los agricultores tradicionales como en las comunidades que dependen de métodos agrícolas más convencionales. Si bien las tecnologías emergentes ofrecen soluciones innovadoras, su implementación efectiva requiere un cambio en la mentalidad y en la formación de los actores clave, incluyendo a los propios agricultores, los gobiernos, las empresas del sector agrícola y la sociedad en general. En este sentido, es crucial que las políticas públicas no solo fomenten la innovación tecnológica, sino que también promuevan la educación y la inclusión digital en las zonas rurales, garantizando que todos los actores puedan beneficiarse de los avances tecnológicos. A medida que el hombre sigue evolucionando, la necesidad de adoptar tecnologías emergentes se vuelve aún más urgente. La combinación de estos avances tecnológicos, junto con políticas públicas adecuadas, tiene el potencial de transformar radicalmente la agricultura, haciendo que sea más eficiente, resiliente y respetuosa con el medio ambiente (World Bank, 2025). Si se implementan correctamente, estas tecnologías pueden garantizar que la agricultura del futuro sea capaz de satisfacer las necesidades alimentarias globales sin comprometer los recursos del planeta. En este capítulo, exploraremos cómo estas tecnologías emergentes están cambiando la faz de la agricultura, sus impactos potenciales en la sostenibilidad y los desafíos y oportunidades asociados con su adopción (Farmonaut, 2025).

Marco teórico

Objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), establecidos por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015 como parte de la Agenda 2030, representan un marco global para abordar los principales desafíos que enfrenta la humanidad en diversas áreas, como la erradicación de la pobreza, la protección del planeta y el impulso de la prosperidad para todos (Murguía-Salas *et al.*, 2023). En particular, la agricultura sostenible juega un papel clave en el cumplimiento de varios de estos objetivos, ya que está directamente vinculada a temas como la seguridad alimentaria, la gestión responsable de los recursos naturales y el cambio climático.

En este contexto, las tecnologías emergentes aplicadas a la agricultura representan una herramienta clave para impulsar el cumplimiento de los ODS. Estas innovaciones tienen el potencial de transformar profundamente el sector agrícola, promoviendo prácticas más eficientes, sostenibles y resilientes. A continuación, se presentan algunos de los ODS más relevantes que pueden verse directamente favorecidos por la incorporación de avances tecnológicos en la actividad agrícola.

ODS 2: Hambre cero

El objetivo 2, que busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición, es uno de los más estrechamente vinculados con la transformación agrícola. Las tecnologías emergentes pueden aumentar los rendimientos de los cultivos y mejorar la calidad de los alimentos, contribuyendo así a garantizar que más personas tengan acceso a alimentos nutritivos y suficientes (Moran, 2024). La agricultura de precisión, por ejemplo, permite una producción más eficiente y adaptada a las condiciones específicas de cada zona, lo que mejora la disponibilidad de alimentos y reduce las pérdidas postcosecha. Además, la biotecnología permite el desarrollo de cultivos más resistentes a plagas y enfermedades,

lo que asegura una producción más estable en zonas vulnerables a condiciones adversas.

ODS 6: Agua limpia y saneamiento

El objetivo 6 busca asegurar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La tecnología agrícola de precisión juega un papel clave en este ODS al permitir un uso más eficiente del agua a través de sistemas de riego inteligentes que solo suministran agua cuando es necesario y en las cantidades justas (Moran, 2024). De esta manera, se reduce el consumo de agua y se minimizan los desperdicios, lo cual es particularmente importante en regiones áridas o con escasez de agua. La tecnología de sensores también puede ayudar a monitorear los niveles de humedad en el suelo, garantizando una gestión eficiente del recurso hídrico.

ODS 12: Producción y consumo responsables

El objetivo 12 tiene como fin garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En el contexto agrícola, las tecnologías emergentes promueven prácticas agrícolas más responsables y eficientes, lo que reduce el impacto ambiental y la huella ecológica de la producción de alimentos (Moran, 2024). Por ejemplo, la agricultura de precisión permite una reducción en el uso de fertilizantes y pesticidas, lo que minimiza la contaminación del suelo y del agua. Además, la automación y la robótica en el campo pueden reducir el uso de recursos, optimizar los procesos y, a su vez, minimizar los residuos generados por la actividad agrícola.

ODS 13: Acción por el clima

El objetivo 13 está enfocado en adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La agricultura sostenible, impulsada por tecnologías emergentes, es una de las principales estrategias para mitigar el

impacto climático de la agricultura (Moran, 2024). El uso de sensores climáticos y la inteligencia artificial permiten a los agricultores prever condiciones meteorológicas extremas y adaptar sus prácticas agrícolas, reduciendo las pérdidas causadas por fenómenos climáticos. Además, las tecnologías de bajo carbono, como las prácticas agrícolas regenerativas, pueden contribuir a la captura de carbono en el suelo, ayudando a mitigar el cambio climático.

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

El objetivo 15 busca proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de manera sostenible, combatir la desertificación, detener la degradación de la tierra y frenar la pérdida de biodiversidad (Moran, 2024). Las tecnologías agrícolas emergentes, como los sistemas de monitoreo remoto y los sensores de salud del suelo, son cruciales para evaluar el estado de los ecosistemas y promover prácticas agrícolas que respeten la biodiversidad. Por ejemplo, el uso de cultivos resistentes a enfermedades y plagas puede disminuir la necesidad de productos químicos, lo que ayuda a preservar los ecosistemas circundantes.

ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos

El objetivo 17 subraya la importancia de fortalecer los medios de implementación y revitalizar la alianza global para el desarrollo sostenible. La cooperación internacional es esencial para la transferencia de tecnologías y conocimientos en el sector agrícola, especialmente en los países en desarrollo (Moran, 2024). Las alianzas público-privadas son fundamentales para promover la innovación y facilitar el acceso a las tecnologías emergentes en regiones donde los recursos son limitados. Además, las organizaciones internacionales, gobiernos y empresas pueden trabajar juntos para establecer políticas que respalden la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles a nivel global.

La agricultura sostenible

La agricultura sostenible es un enfoque que busca equilibrar las necesidades humanas con la preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras (Kogut, 2025). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) define la agricultura sostenible como aquella que "satisface las necesidades alimentarias y los productos agrícolas de la población sin comprometer la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ecológicos esenciales". Este enfoque tiene en cuenta tanto la productividad como la protección del medio ambiente, así como la justicia social y el desarrollo económico. Las tecnologías emergentes se consideran un vehículo clave para lograr estos objetivos, pues permiten una agricultura más eficiente y menos dependiente de los recursos naturales limitados.

La agricultura sostenible en México se enfoca en la idea de mantener la producción agrícola a lo largo del tiempo sin agotar los recursos naturales esenciales. Aquí, se promueven prácticas que son amigables con el medio ambiente y que evitan la degradación del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad. Algunos aspectos destacados de la agricultura sostenible en México incluyen (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023):

- **Rotación de cultivos**: los agricultores mexicanos están adoptando la rotación de cultivos, una práctica que ayuda a mantener la fertilidad del suelo y reduce la presión sobre un solo tipo de cultivo.
- **Uso eficiente del agua**: en un país donde la escasez de agua es un problema importante, la agricultura sostenible fomenta el uso eficiente del agua a través de técnicas como la irrigación por goteo.
- **La Estrategia Nacional de Suelos para una Agricultura Sostenible** (ENASAS) promueve prácticas sostenibles de manejo y restauración de suelos, lo que permite aprovechar y mejorar este recurso e impulsar la productividad en el campo mexicano.
- **Concientización de los agricultores de pequeña escala** sobre los riesgos de los incendios forestales incidentales y cómo evitar los daños a los terrenos agrícolas.

En México, la agricultura sostenible y sustentable son dos perspectivas complementarias que trabajan en armonía para lograr un futuro agrícola más ecológico; ambas son vitales para enfrentar los desafíos ambientales y garantizar la seguridad alimentaria a largo plazo en México. Así, ante los retos de un sector primario que demanda inclusión, día con día nos enfocamos en generar políticas, programas y acciones estratégicas que busquen preservar la vida y generar condiciones de desarrollo para la agricultura, la ganadería y la pesca, así como transitar hacia la autosuficiencia alimentaria del país.

Tecnologías emergentes en la agricultura

Las tecnologías emergentes en la agricultura se refieren a aquellas innovaciones que están transformando el sector mediante el uso de herramientas avanzadas que mejoran la eficiencia de la producción, la gestión de los recursos y la sostenibilidad. Estas tecnologías incluyen las siguientes:

Agricultura de precisión

Esta es una disciplina que utiliza tecnologías avanzadas como sensores remotos, satélites, drones, sistemas de información geográfica (SIG) y sensores de campo para monitorear los cultivos y el entorno (Leyva-Rafull *et al*., 2001). A través de esta tecnología, los agricultores pueden gestionar sus fincas de manera más eficiente y sostenible, ajustando variables como el riego, la aplicación de fertilizantes y pesticidas de acuerdo con las necesidades específicas de cada área de cultivo.

Biotecnología y mejoramiento genético

La biotecnología permite la modificación genética de los cultivos para mejorar su resistencia a plagas, enfermedades, y condiciones adversas como la sequía. El mejoramiento genético de plantas también puede resultar en cul-

tivos que requieran menos insumos, como agua o fertilizantes, lo que contribuye a una agricultura más sostenible. Los cultivos genéticamente modificados (GMO por sus siglas en inglés) son un claro ejemplo de cómo la biotecnología puede mejorar la productividad agrícola sin comprometer el medio ambiente (Ivanchuk, 2025).

Inteligencia Artificial (IA) y *Big Data*

La inteligencia artificial se utiliza para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus cultivos. A través de algoritmos de aprendizaje automático, la IA puede predecir el comportamiento de los cultivos, optimizar el uso de los recursos y detectar enfermedades antes de que se propaguen. Además, *el big data* y el análisis predictivo proporcionan información crítica sobre el clima, los rendimientos y otros factores que afectan la producción agrícola (Culturas del mundo, 2025).

Robótica y automatización

Los avances en robótica y automatización están permitiendo el desarrollo de máquinas que pueden realizar tareas agrícolas de manera autónoma, como la siembra, la cosecha y el monitoreo de cultivos (Culturas del mundo, 2025). Estas tecnologías no solo incrementan la eficiencia, sino que también permiten reducir el uso de mano de obra y minimizar los errores humanos, lo que, a su vez, mejora la productividad y reduce los costos.

El objetivo de la robótica agrícola es ayudar al sector en su eficiencia y en la rentabilidad de los procesos. Es decir, la robótica móvil trabaja en el sector agrícola para mejorar la productividad, la especialización y la sostenibilidad medioambiental (FAO, 2023).

Sostenibilidad y cambio climático en la agricultura

La sostenibilidad en la agricultura no puede desvincularse del cambio climático. Los efectos del cambio climático, como las sequías prolongadas, las inundaciones, el aumento de las temperaturas y la variabilidad climática son algunos de los mayores desafíos para la agricultura mundial. Según el Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1.5 °C del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), se espera que las altas temperaturas y los fenómenos meteorológicos extremos afecten la producción de alimentos, sobre todo en regiones vulnerables. El cambio climático crea una serie de problemas en la agricultura que los propietarios de las explotaciones deben abordar. Conseguir una estrategia sólida de adaptación de la agricultura al cambio climático es clave para tener éxito en este desafío. Hay que tener en cuenta que las medidas de adaptación al cambio climático en la agricultura no son infalibles de por vida ni son las mismas para todos los casos, tienen que adaptarse a cada caso particular, teniendo en cuenta variables como las condiciones climáticas cambiantes o las necesidades agrícolas de los cultivos que se van a plantar (Ivanchuk, 2025).

La agricultura sostenible busca mitigar estos efectos mediante la adopción de prácticas que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero, promuevan la adaptación al cambio climático y fomenten el uso racional de los recursos naturales. Las tecnologías emergentes contribuyen de manera significativa a este objetivo. Por ejemplo, la agricultura de precisión permite a los agricultores utilizar los recursos de manera más eficiente, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos y pesticidas, lo que disminuye la huella de carbono de la agricultura.

El rol de las políticas públicas en la adopción de tecnologías

La implementación de tecnologías emergentes en la agricultura no solo depende de los avances tecnológicos, sino también de las políticas públicas que fomenten su adopción y el desarrollo de infraestructuras adecuadas. Las políticas deben abordar la brecha de acceso a la tecnología, especial-

mente en los países en desarrollo, donde los pequeños productores enfrentan barreras económicas y de formación. De acuerdo con la FAO, es esencial que las políticas promuevan la inclusión digital y el acceso a la educación tecnológica en las zonas rurales para garantizar que los agricultores puedan aprovechar estas innovaciones (FAO, 2023).

Los gobiernos pueden desempeñar un papel fundamental mediante incentivos fiscales, subsidios y programas de capacitación. Además, las políticas deben estar orientadas a crear un entorno favorable para la inversión en investigación y desarrollo (I+D) en el sector agrícola, lo que permitirá a los países mantenerse a la vanguardia de la innovación tecnológica y adoptar soluciones sostenibles (Ríos Hernández, 2021).

Desafíos y oportunidades de la transformación agrícola

La adopción de tecnologías emergentes en la agricultura enfrenta varios desafíos. Entre los más significativos se encuentran (International Society of Precision Agriculture, 2019):

- El costo inicial de la implementación de nuevas tecnologías puede ser limitante para pequeños productores.
- La falta de infraestructura tecnológica adecuada en regiones rurales limita el acceso a la tecnología.
- La resistencia al cambio por parte de los agricultores tradicionales que, debido a la falta de conocimiento o la inseguridad sobre los beneficios, pueden ser reacios a adoptar nuevas prácticas.

Sin embargo, estos desafíos también abren un espacio para las oportunidades. Las innovaciones colaborativas y las alianzas público-privadas pueden generar soluciones accesibles para los agricultores, permitiendo un modelo de agricultura sostenible que esté al alcance de todos. Además, la digitalización del sector agrícola y el fomento de la educación tecnológica pueden facilitar la adopción de tecnologías emergentes en diversas regiones (Veneros *et al.*, 2020).

La visión 2025 y más allá

El año 2025 se presenta como una fecha clave para evaluar el progreso hacia una agricultura más sostenible y tecnológica. Se espera que para ese entonces las tecnologías emergentes hayan alcanzado un nivel de madurez tal que la mayoría de los productores agrícolas puedan integrarlas en sus procesos productivos, ayudando a hacer frente a los desafíos globales de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

Caso de estudio 1: monitoreo del estado nutrimental del nogal pecanero mediante sensores remotos

Introducción



Figura 6.1. *Plantío de Nogal Pecanero*

Fuente: elaboración propia.

El nogal pecanero (*Carya illinoinensis* Koch.) es una de las especies frutales más importantes en la Comarca Lagunera y en otras regiones de México, debido a su alto valor comercial y su creciente demanda en los mercados nacionales e internacionales (figura 6.1). Sin embargo, el éxito de su producción depende en gran medida de su manejo agronómico, incluyendo la fertilización y el monitoreo de su estado nutricional.

En los últimos años, el uso de tecnologías de monitoreo remoto ha revolucionado la agricultura de precisión, permitiendo evaluar la condición de los cultivos sin necesidad de inspecciones manuales constantes. En este contexto, el presente estudio se enfocó en la utilización de imágenes satelitales Sentinel-2 y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar el estado nutricional del nogal pecanero y mejorar su gestión productiva de manera eficiente y sostenible.

Objetivo del estudio

Estimar el estado nutricional del nogal pecanero mediante el uso de sensores remotos.

Metodología

El diagrama de flujo (ver figura 6.2) describe el proceso metodológico seguido para la recolección, el procesamiento y el análisis de datos en un estudio agrícola. El esquema integra dos fuentes principales de información: datos obtenidos en campo mediante muestreo directo y datos derivados de imágenes satelitales. Ambos conjuntos de datos convergen en una base común que permite realizar un análisis estadístico integral, orientado a evaluar la relación entre variables biofísicas y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

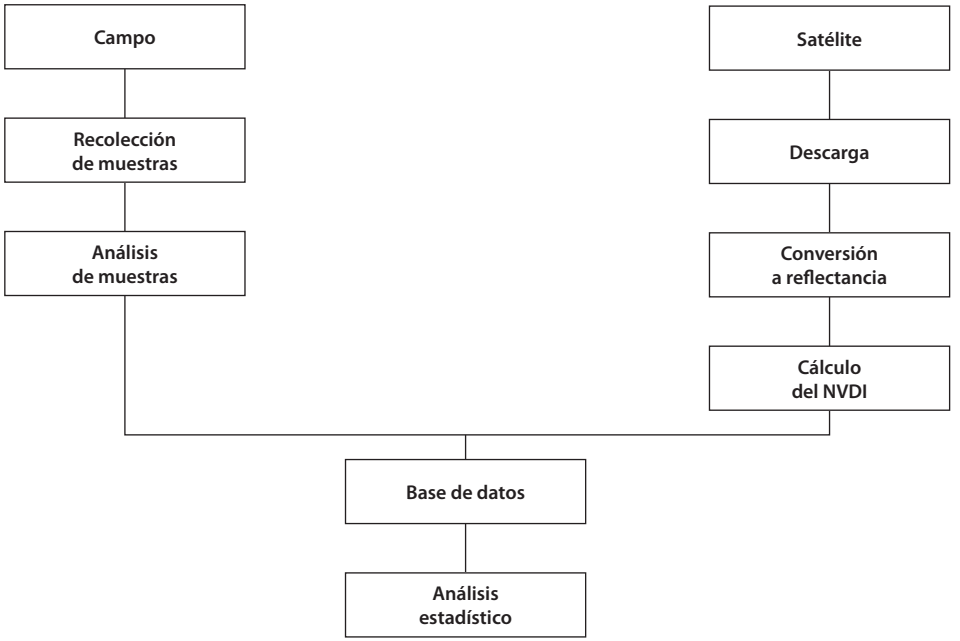


Figura 6.2. *Proceso metodológico de la investigación*

Fuente: elaboración propia.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Pequeña Propiedad Santo Niño, una zona con una importante superficie destinada al cultivo de nogal pecanero. Esta región se caracteriza por su clima semiárido y suelos franco-arcillosos, condiciones que influyen en el crecimiento y producción del nogal y se ubica en el municipio de San Pedro, Coahuila, en las coordenadas 709489.57 m E 2844554.58 m N, zona UTM 13 datum WGS84 (figura 6.3).

Se utilizaron árboles de 30 años de edad de la variedad "Wichita y Western Schley". La huerta está plantada en un sistema de marco real a 10 por 10 m, con una densidad de 100 árboles por hectárea.

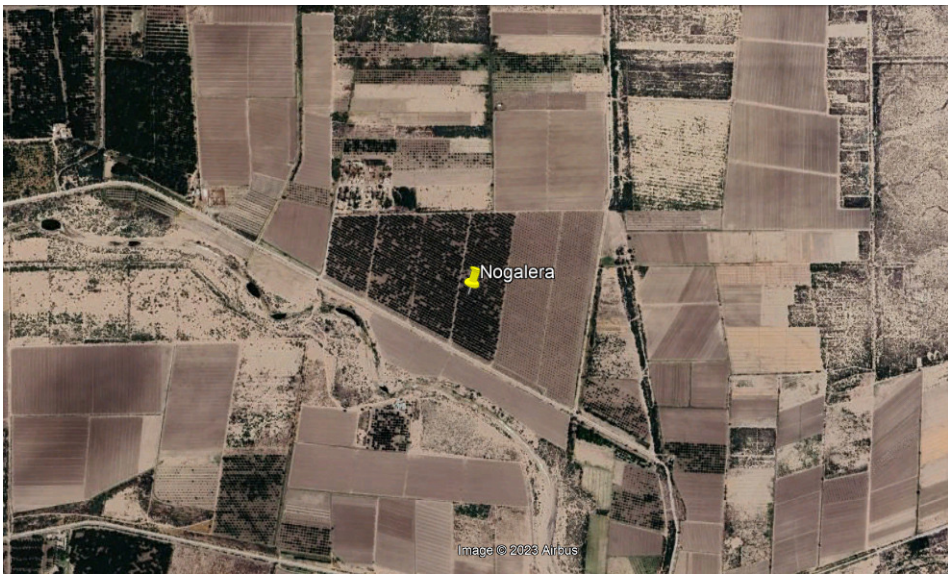


Figura 6.3. *Localización del área de estudio*

Fuente: Google Earth®.

Tratamientos

Las dosis fueron 300 L•ha^{-1} en el riego de aniego, 200 L•ha^{-1} en el primer riego de auxilio, 100 L•ha^{-1} en el segundo y tercer riego de auxilio. Se utilizó un diseño aleatorio, siendo un árbol una unidad experimental. En el sitio se implementaron cinco tratamientos, correspondientes a diferentes periodos de aplicación continua de un mismo insumo en dosis constantes cada año. Estos tratamientos fueron los siguientes: T1, con un año de aplicación; T2, con dos años de aplicación; T3, con seis años de aplicación; T4, con siete años de aplicación (figura 6.4).

Recolección de datos

Se realizó un muestreo en campo para recolectar datos de las plantas en distintas etapas de su ciclo fenológico. Se tomaron muestras de hoja y suelo,



Figura 6.4. *Distribución de los tratamientos aplicados*
Fuente: elaboración propia, Google Earth®.



Figura 6.5. *Muestreo en el sitio de estudio*

Fuente: elaboración propia.

pero para este estudio solo se consideraron las muestras de planta para determinar su contenido de nitrógeno (figura 6.5).

Los muestreos se realizaron en los cuatro puntos cardinales de la parte media del árbol y se tomaron el tercer par de folíolos de los brotes seleccionados; para cada muestra se tomaron alrededor de 80 folíolos por árbol.

Preparación de la muestra

Las muestras recolectadas fueron analizadas en el Laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Las hojas se lavaron primero con agua corriente y luego con agua desionizada. Posteriormente, se dejaron secar a temperatura ambiente y, una vez secas, se introdujeron en una estufa de circulación de aire forzado a 60 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, se molieron utilizando un tamiz de malla.

Análisis de laboratorio

Las muestras de planta fueron analizadas para determinar (Figura 6):



Figura 6.6. *Análisis de muestras en el Laboratorio del ITS Lerdo*

Fuente: elaboración propia.

1. Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl (cuadro 6.1).
2. Materia orgánica mediante el método de cenizas (cuadro 6.2).

Cuadro 6.1. *Resultados de nitrógeno*

Muestra	*mL gastados de H_2SO_4*	*Nitrógeno (%)*
T1R1	3.5	2.17
T1R2	3.3	2.03
T1R3	2.5	1.47
T1R4	3.9	2.45
T1R5	3.5	2.17
T2R1	3.4	2.10
T2R2	3.8	2.38
T2R3	2.0	1.12
T2R4	3.5	2.17
T2R5	3.2	1.96
T3R1	3.2	1.96
T3R2		
T3R3	3.3	2.03
T3R4		
T3R5	3.1	1.89
T4R1	2.7	1.61
T4R2	2.7	1.61
T4R3	2.5	1.47
T4R4	3.4	2.10
T4R5	3.9	2.45

Fuente: elaboración propia.

Procesamiento de imágenes satelitales

Se emplearon imágenes del satélite Sentinel-2 correspondientes a los meses de abril y julio. Estas imágenes fueron procesadas en el software QGIS para obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), un índice espectral que permite estimar la cantidad de clorofila en la planta y, por lo tanto, su estado nutricional.

Cuadro 6.2. *Resultados de materia orgánica*

Muestra	*PCV*	*PCM*	*MO (%)*
T1R1	40.897	40.964	13.4
T1R2	37.858	37.913	11.0
T1R3	36.936	36.986	10.0
T1R4	39.853	39.908	11.0
T1R5	26.880	26.955	15.0
T2R1	30.512	30.580	13.6
T2R2	28.840	28.905	13.0
T2R3	25.064	25.155	18.2
T2R4	42.025	42.096	14.2
T2R5	44.762	44.848	17.2
T3R1	39.932	40.006	14.8
T3R2	37.377	37.490	22.6
T3R3	39.560	39.625	13.0
T3R4	39.115	39.190	15.0
T3R5	37.543	37.611	13.6
T4R1	63.005	63.063	11.6
T4R2	26.626	26.688	12.4
T4R3	26.201	26.263	10.6
T4R4	41.716	41.772	11.2
T4R5	46.504	46.567	12.6

Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos en las imágenes satelitales se compararon con los resultados del análisis de laboratorio utilizando el software STATGRAPHICS®. Se realizó un análisis de correlación lineal entre los valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los niveles de nitrógeno, además de un ANOVA para determinar la significancia estadística de los resultados (figura 6.7).

Resultados

Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal simple con el propósito de evaluar la relación entre el contenido de nitrógeno en las hojas del nogal pecanero y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI),

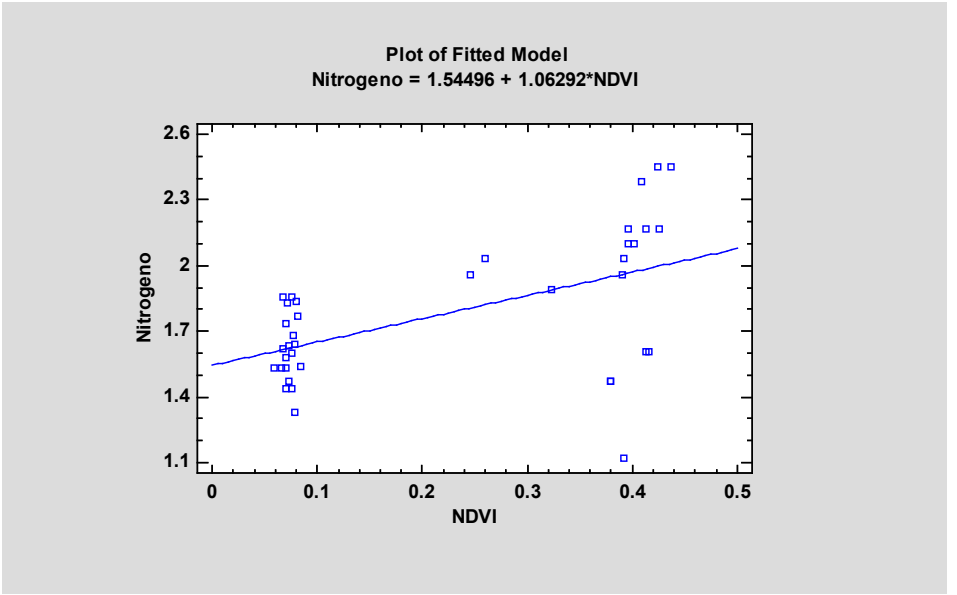


Figura 6.7. *Correlación lineal entre valores NDVI y niveles de nitrógeno*
Fuente: elaboración propia, Statsgraphics®.

obtenido a partir de imágenes satelitales. El modelo ajustado se expresó mediante la siguiente ecuación:

$$\textbf{Nitrógeno (\%)} = 1.54496 + 1.06292 \cdot \textbf{NDVI}$$

Este modelo indica que, por cada unidad de incremento en el NDVI, el contenido de nitrógeno en la planta aumenta en promedio 1.06292 unidades, lo cual sugiere una relación directa entre el vigor vegetal y la disponibilidad de este nutriente esencial.

Desde el punto de vista estadístico, el modelo resultó altamente significativo, con un valor de $p = 0.0005$, claramente inferior al umbral convencional de 0.05, lo que permite afirmar, con un 95 % de confianza, que existe una asociación estadísticamente significativa entre ambas variables.

El coeficiente de determinación (R^2) fue del 28.9 %, lo cual indica que el NDVI explica aproximadamente un 29 % de la variabilidad en los valores de nitrógeno observados. Aunque esta proporción no es elevada, sí representa una tendencia relevante y científicamente respaldada. El coeficiente de corre-

lación obtenido fue de 0.5375, lo cual sugiere una relación positiva de intensidad moderada entre las variables, confirmando la validez del modelo como herramienta exploratoria en estudios agrícolas.

El error estándar de estimación fue de 0.272, lo que refleja una dispersión moderada entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Asimismo, el error absoluto medio (MAE) se calculó en 0.1987, indicando que, en promedio, las predicciones del modelo difieren menos de un 0.2 % respecto a los valores reales de nitrógeno, lo cual denota una aceptable precisión predictiva.

Por último, la prueba de Durbin-Watson arrojó un valor de 2.178 con un $p = 0.6534$, lo que sugiere la inexistencia de autocorrelación significativa en los residuos. En otras palabras, los errores se distribuyen de forma aleatoria, cumpliendo con los supuestos fundamentales del modelo de regresión lineal.

Implicaciones y aplicaciones

El uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) en el monitoreo agrícola se posiciona como una estrategia innovadora y eficaz dentro de la agricultura de precisión. Este enfoque permite evaluar el estado nutricional de los cultivos de manera no invasiva, rápida y a gran escala. Los resultados del presente estudio ofrecen múltiples aplicaciones prácticas, entre las que destacan:

La optimización en el uso de fertilizantes, al identificar con mayor exactitud las necesidades nutricionales del cultivo, permite reducir los costos de producción y minimizar los impactos ambientales derivados del uso excesivo de insumos. Además, la teledetección facilita la detección temprana de deficiencias nutrimentales, lo que posibilita una intervención oportuna con medidas correctivas adecuadas.

Otro beneficio clave es el incremento en la eficiencia del manejo agronómico al proporcionar información detallada y en tiempo real sobre el estado fisiológico del cultivo, reduciendo la necesidad de inspecciones manuales frecuentes. Esto cobra especial relevancia en explotaciones de gran escala, donde el monitoreo tradicional resulta costoso o inviable.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, esta tecnología contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), especialmente el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al fomentar prácticas agrícolas más eficientes, racionales y ambientalmente responsables.

Conclusiones

Este estudio demostró que la integración de herramientas de teledetección y SIG en el manejo agronómico del nogal pecanero constituye una alternativa técnicamente viable y científicamente válida para estimar su estado nutricional. La correlación positiva encontrada entre el NDVI y el contenido de nitrógeno en la planta sugiere que las imágenes satelitales pueden complementar, e incluso en ciertas condiciones sustituir parcialmente, los métodos convencionales de diagnóstico nutricional.

Estos hallazgos resultan particularmente valiosos para los productores, técnicos e investigadores del sector agrícola, al proporcionar una herramienta adicional para la planificación y toma de decisiones en el manejo del cultivo. Al mismo tiempo, promueven la implementación de prácticas más eficientes y sustentables, contribuyendo a una agricultura moderna, tecnificada y ambientalmente responsable.

En suma, el uso de imágenes satelitales para el monitoreo del estado nutricional del nogal pecanero representa una contribución relevante al desarrollo de la agricultura de precisión en regiones como la Comarca Lagunera, y puede ser replicado en otros sistemas agrícolas con características agroclimáticas similares.

Caso de estudio 2: aplicación de lixiviado de vermicompost y su aporte nutrimental al suelo y cultivo de nogal pecanero

Introducción

El nogal pecanero (*Carya illinoinensis* Koch.) es una especie hortofrutícola de alta rentabilidad para los estados productores del norte de México. Sin

embargo, este cultivo tiene varias limitantes, entre las que se encuentran las deficiencias y desbalances nutricionales derivados de las características edáficas y climáticas de las regiones productivas de la región Lagunera. Debido a esto, se está optando por el uso de distintos abonos orgánicos como fuente de nutrimentos para proporcionar al suelo las características adecuadas para el correcto desarrollo del nogal.

El uso de lixiviado de vermicompost, generado a partir de diversos residuos orgánicos, se ha incrementado en diferentes regiones del mundo como abono de alta calidad. Donde el producto aplicado al suelo favorece e incrementa la actividad biótica y su acción aumentando la resistencia de las plantas frente a plagas y organismos patógenos. El presente trabajo tiene como finalidad evaluar el aporte nutrimental tanto en suelo como en planta del lixiviado de vermicompost durante varios años de aplicación al nogal pecanero.

Objetivo del estudio

Aplicar lixiviado de vermicompost y evaluar el aporte nutricional al suelo y al cultivo de nogal pecanero, mediante muestras y análisis en laboratorio.

Metodología

El diagrama (figura 6.8) constituye un enfoque sistemático y secuencial que abarca todas las etapas necesarias para garantizar una evaluación rigurosa y reproducible de los tratamientos experimentales. El proceso inicia con la preparación y estabilización de los residuos orgánicos mediante un precompostaje, seguido por la producción controlada de vermicompost, de donde se obtiene el lixiviado a utilizar. Posteriormente, se establece un diseño experimental con criterios científicos que permiten la aplicación diferenciada de tratamientos, asegurando la validez estadística de los resultados. A lo largo del experimento, se realiza un monitoreo detallado tanto del suelo como de las plantas, mediante muestreos específicos que permiten analizar los cambios físicos, químicos y biológicos inducidos por el lixiviado.

Finalmente, los datos recolectados son sometidos a análisis estadísticos que permiten identificar diferencias significativas entre tratamientos, establecer correlaciones entre variables, y generar conclusiones sólidas sobre la efectividad del lixiviado como insumo agrícola. En conjunto, esta metodología permite una evaluación integral, desde el manejo inicial del insumo orgánico hasta la interpretación cuantitativa de los efectos obtenidos en campo.

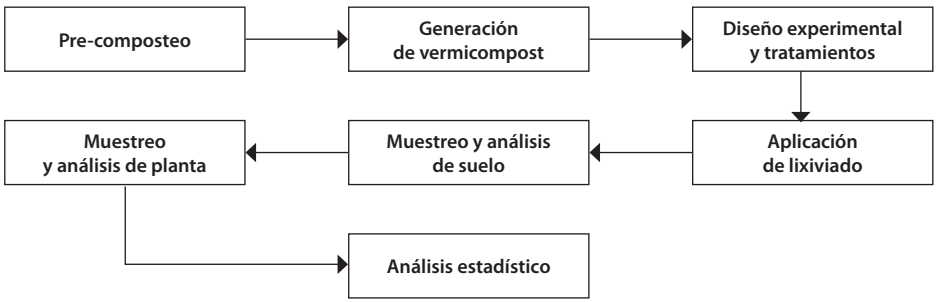


Figura 6.8. *Proceso metodológico de la investigación*

Fuente: elaboración propia.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Nogalera de la Pequeña Propiedad Santo Niño (figura 6.9) ubicada en San Pedro de las Colonias, Coahuila, con coordenadas geográficas 709489.57 m E, 2844554.58 m N.

Se utilizaron árboles de 30 años de la variedad "Wichita" y "Western Schley". La huerta está plantada en un sistema de marco real a 14 × 14 m, con una densidad de 51 árboles por hectárea. El riego de la huerta es por gravedad, aplicado desde el 1 de marzo hasta el 30 de julio.

Precompostaje

Se utilizó estiércol de bovino como alimento base para las lombrices, realizando un precompostaje para adecuar las características físicas tales como pH, temperatura, humedad, ideales para la obtención y el desarrollo de



Figura 6.9. *Área de Estudio P.P. Santo Niño*

Fuente: elaboración propia, Google Earth®.

vermicompost y lixiviado. El cual se aplicó como tratamiento para satisfacer las necesidades nutricionales de los nogales.

Tratamientos

Las dosis fueron 300 L•ha^{-1} en el riego de aniego, 200 L•ha^{-1} en el primer riego de auxilio, 100 L•ha^{-1} en el segundo y tercer riego de auxilio. Se utilizó un diseño aleatorio, siendo un árbol una unidad experimental. Se consideraron en cuenta cinco tratamientos los cuales fueron los años de aplicación donde se añadieron las mismas dosis cada año, siendo estos: T1: un año de aplicación, T2: dos años de aplicación, T3: seis años de aplicación, T4: siete años de aplicación y T5: testigo.

Muestreo y análisis de suelo

Se obtuvieron muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad de la parte media de la parcela; posteriormente se secaron a temperatura ambiente para

poder realizar los análisis correspondientes. Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento donde se analizaron las siguientes determinaciones: nitrógeno, por el método Kjeldahl; porcentaje de materia orgánica, por el método Walkley Black; pH, por el método del potenciómetro; conductividad eléctrica, por el método del conductímetro; densidad real, por el método del picnómetro; y textura del suelo, por el método Bouyocus.

Muestreo y análisis de planta

Se realizó un muestreo foliar en el mes de julio cuando terminó la etapa de floración, para evaluar el efecto de los tratamientos. Los muestreos se realizaron en los cuatro puntos cardinales de la parte media del árbol y se tomó el tercer par de folíolos de los brotes seleccionados. Para cada muestra se tomaron alrededor de 80 folíolos por árbol.

Las hojas se lavaron con agua corriente, después con agua desionizada, dejándolas secar a temperatura ambiente, posteriormente fueron introducidas en una estufa de circulación forzada de aire a 60 °C hasta seco constante y se molieron.

Para la planta se realizaron cinco repeticiones por tratamientos. Las determinaciones en planta fueron las siguientes: nitrógeno, por el método Kjeldahl; y porcentaje de materia orgánica (MO), por el método de calcinación.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza utilizando el software STATSGRAPHICS® para determinar diferencias significativas entre tratamientos, mediante la prueba de la diferencia mínima significativa de Tukey con un nivel de significancia de 5 %.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los análisis de suelo y planta donde se aplicó lixiviado de vermicompost.

Suelo

Nitrógeno

De acuerdo con el análisis estadístico se encontró que existe una diferencia significativa en la concentración de nitrógeno en el suelo dando un $p < 0.05$, donde se puede observar en el cuadro 6.1 que el T3 y T4 son los que obtuvieron una mayor concentración de nitrógeno con 0.17 y 0.15 %, respectivamente. El T5, que es el testigo, presentó la concentración más baja, lo que demuestra que la aplicación de lixiviado de vermicompost sí va incrementando la concentración de nitrógeno en el suelo conforme a los años de aplicación.

Materia orgánica

Este parámetro presentó una diferencia significativa ($p<0.05$) entre los tratamientos. El testigo presenta el menor porcentaje de contenido de materia orgánica. Este porcentaje va en aumento conforme aumentan los años de aplicación de lixiviado de vermicompost al suelo, observándose los niveles más altos en los T3 y T4 con 2.46 y 2.15 %, respectivamente.

pH

El pH óptimo para el nogal, según informa Sagarpa, abarca el rango de 6.5 a 7.5, es decir, un pH ligeramente ácido a uno neutro o ligeramente alcalino. Se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en los valores de pH entre los distintos tratamientos con respecto al testigo como se observan en el Cuadro 1. Los tratamientos T1, T2 y T5, son suelos fuertemente alcalinos. Esta característica es normal en los suelos calcáreos, propios de la Región Lagunera, sin embargo, no es adecuado este nivel para el desarrollo óptimo de los cultivos de nogal.

Los tratamientos T3 y T4 con valores de pH de 8.33 y 8.47, respectivamente, lograron disminuir el valor inicial del testigo (ver cuadro 6.1). Estos valores se clasifican como medianamente alcalinos; sin embargo, no cumplen con el pH óptimo para el cultivo.

Conductividad eléctrica

El valor más alto presentado en las muestras de suelo corresponde al T2 con 61.6993 $\mu S \bullet m^{-1}$. A pesar de ser el valor más elevado dentro de los cinco tratamientos, está muy por debajo del límite máximo que es 2.00 $dS \bullet m^{-1}$, cumpliendo con el requisito. Adoptando la característica de suelos no salinos.

Densidad real

No hubo diferencia significativa en el valor de densidad real del suelo de los cinco tratamientos. La densidad más alta la presentó el T5 con 2.31 $g \bullet cm^{-3}$, lo que nos indica que el testigo es el tratamiento con menor contenido de materia orgánica. El menor valor de densidad real se obtuvo con el T3, con seis años de aplicación de lixiviado, con 2.11 $g \bullet cm^{-3}$, siendo un resultado esperado puesto que corresponde al tratamiento que presenta el mayor porcentaje de contenido de materia orgánica en el suelo, confirmando que la aplicación de lixiviado de vermicompost contribuye a aumentar la riqueza del suelo.

Clase textural

De acuerdo con los análisis, el suelo de nogal pecanero se dividió en tres tipos de suelo: arenoso franco, franco arenoso y franco arcillo arenoso.

El suelo del T5 tiene textura arenosa franco, por lo que tiene mayor porcentaje de arena que los demás tratamientos, provocando problemas de retención de nutrientes y agua. El T1 tiene un suelo franco arenoso, bajó su porcentaje de arena y aumentó en composición de limo y arcilla. Los siguientes tratamientos: 2, 3 y 4, pertenecen a la clase textural franco arcillo arenosa, siendo estos los más aptos para el crecimiento del nogal como se observa en el cuadro 6.1.

Cuadro 6.3. *Características fisicoquímicas del suelo*

T	N	MO	pH	CE ($\mu S \cdot m^{-1}$)	Dr ($g \cdot cm^{-3}$)	Clase textural
	%					
T1	0.063 b	0.897 b	8.6	19.45	2.23	Franco arenoso franco
T2	0.082 b	1.166 b	8.6	61.70	2.16	Arcillo arenoso
T3	0.173 a	2.466 a	8.3	40.32	2.11	Franco arcillo arenoso
T4	0.151 a	2.152 a	8.5	12.74	2.17	Franco arcillo arenoso
T5	0.019 c	0.269 c	9.0	0.34	2.31	Arenoso franco

T = Tratamiento; T1 = un año de aplicación de lixiviado; T2 = dos años de aplicación; T3 = seis años de aplicación; T4 = siete años de aplicación; T5 = testigo. Columnas con distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$).
Fuente: elaboración propia.

Planta

Nitrógeno

De acuerdo con el análisis estadístico, no se encontró diferencia significativa en el porcentaje de nitrógeno en planta a pesar de los años de aplicación de lixiviado al nogal; sin embargo, el T1 correspondiente a un año de aplicación arroja el mayor porcentaje de N en planta con un 2.42 %. Por otra parte, el T3, de seis años de aplicación, es el que menos porcentaje de nitrógeno contiene, con un 1.526 %. De los cuatro tratamientos analizados, el T1, el T2 y el T4 pertenecen a un nivel nutricional bajo o idóneo; el T3 fue el tratamiento con un nivel más deficiente al estar por debajo del requerimiento mínimo.

Materia orgánica

Se encontró diferencia significativa en el porcentaje de materia orgánica a nivel foliar entre los distintos tratamientos, ver cuadro 6.2. Al igual que con el nitrógeno, el T1 con un año de aplicación de vermicompost tuvo el porcentaje más elevado, con 15.8 %, que se puede atribuir a un aumento rápido y elevado en la concentración de nutrientes en el suelo desde que se inició la aplicación de lixiviado.

Cuadro 6.4. *Contenido de nitrógeno y materia orgánica en nogal.*

Tratamiento	*N (%)*	*MO (%)*
T1	2.42667	15.8 a
T2	2.128	11.68 c
T3	1.526	15.24 ab
T4	2.058	12.08 bc

T1 = un año de aplicación de lixiviado; T2 = dos años de aplicación; T3 = seis años de aplicación; T4 = siete años de aplicación. Columnas con distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los dos casos de estudio presentados en este trabajo evidencian el potencial transformador de integrar tecnologías sustentables, biotecnológicas y de percepción remota en la agricultura moderna, particularmente en el cultivo de nogal pecanero. Esta integración ha permitido avanzar hacia una gestión agronómica más eficiente, sostenible y basada en evidencia, con énfasis en la mejora de la calidad del suelo y la nutrición vegetal.

En ambos estudios se utilizó el vermicompost como una biotecnología base. Esta técnica emplea lombrices para transformar estiércol bovino en un lixiviado líquido altamente nutritivo. El proceso incluyó etapas tecnológicas esenciales como el precompostaje del estiércol, el manejo controlado del sistema de lombricultura y la aplicación del lixiviado mediante riego por gravedad. Esta metodología favoreció la incorporación eficiente del bioinsumo en las parcelas experimentales.

Una innovación destacada fue el uso de imágenes satelitales del programa Sentinel-2 para el monitoreo de la salud vegetal. Mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se logró identificar variaciones en el vigor del cultivo, asociadas a la aplicación del lixiviado. Valores elevados de NDVI reflejaron una vegetación más densa y saludable, mientras que valores bajos indicaron condiciones de estrés o deficiencias nutrimentales. Esta herramienta de teledetección permitió evaluar la respuesta del cultivo a escala espacial, facilitando la toma de decisiones informadas y reduciendo la dependencia de muestreos manuales.

De manera complementaria, ambos estudios incorporaron análisis fisicoquímicos de suelo y foliares en laboratorio. Las variables evaluadas incluyeron nitrógeno, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, densidad real y textura del suelo. Estos datos, sometidos a análisis estadístico, permitieron confirmar diferencias significativas entre tratamientos, estableciendo una relación directa entre la aplicación del lixiviado y la mejora de las condiciones edáficas.

Los resultados obtenidos reflejan un impacto positivo de las tecnologías aplicadas sobre la sustentabilidad agrícola. En el suelo, el lixiviado favoreció el incremento de la materia orgánica y la reducción de la densidad real, contribuyendo a mejorar su estructura y fertilidad. A nivel de planta, aunque no se detectaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno en todos los tratamientos, sí se observaron respuestas fisiológicas positivas en etapas tempranas de aplicación. Asimismo, el uso de monitoreo remoto resultó clave para gestionar eficientemente grandes extensiones agrícolas, permitiendo observar en tiempo real la respuesta del cultivo a los tratamientos, reducir el uso de insumos químicos y optimizar el manejo integral del sistema productivo.

La combinación de biotecnología, análisis químico y herramientas de teledetección constituye una estrategia integral que promueve la sostenibilidad, incrementa la eficiencia productiva y reduce los impactos ambientales. Esta sinergia tecnológica representa un modelo viable para su adopción en otros cultivos y regiones, siempre que se cuente con políticas públicas adecuadas, inversión en infraestructura y capacitación técnica en el medio rural.

Referencias

Arias, F., y Ribes-Giner, G. (2019). Evolución del papel del emprendedor rural: Del agricultor subordinado del siglo XVIII al empresario rural actual. *Revista Venezolana de Gerencia, 24,* 1005–2018. https://doi.org/10.37960/revista.v24i88.30161

Bai, Y., Zhang, B., Xu, N., Zhou, J., Shi, J., y Diao, Z. (2022). *Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review. Computers and Electronics in Agriculture.* https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107584

Culturas del Mundo. (2025). *¿Sabe qué es la agricultura de precisión?* https://hablemosdeculturas.com/agricultura-de-precision/

Farmonaut. (2025). *Transformación digital en la agricultura: Cómo la innovación impulsa a pequeños productores en América Latina y el Caribe.* https://farmonaut.com/south-america/transformacion-digital-en-agricultura-5-innovaciones-clave

Herrera Cardoso, E. D., León Galván, M. F., Sosa Morales, M. E., Ruiz Nieto, J. E., y Cepeda Negrete, J. (2024). Inteligencia artificial y biotecnología: Hacia una agricultura sostenible y eficiente. *Jóvenes en la Ciencia, 32*, 1–5. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4687

Holzinger, A., Keiblinger, K., Holub, P., Zatloukal, K., y Müller, H. (2023). AI for life: Trends in artificial intelligence for biotechnology. *New Biotechnology, 74,* 16–24. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.02.001

International Society of Precision Agriculture. (2019). *Precision agriculture definition*. https://www.ispag.org/resources/definition

Reyes Vázquez, M., y Urrea-López, R. (2016). *Retos y oportunidades para el aprovechamiento de la nuez pecanera en México*. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b790138f4.pdf

Ivanchuk, N. (2025). *Cambio climático en la agricultura: Cómo adaptarse*. EOS Data Analytics. https://eos.com/es/blog/cambio-climatico-y-agricultura/

Kogut, P. (2025). *La agricultura sostenible: Un nuevo concepto de cultivo.* EOS Data Analytics. https://eos.com/es/blog/agricultura-sostenible/

Leite, M. L., de Loiola Costa, L. S., Cunha, V. A., Kreniski, V., de Oliveira Braga Filho, M., da Cunha, N. B., et al. (2021). *Artificial intelligence and the future of life sciences. Drug Discovery Today, 26*(11), 2515–2526. https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.07.002

Leyva-Rafull, L. Z., Souza-Alves de C., M., y Orlando, R. C. (2001). Agricultura de precisión. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 10*(3), 7–10. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93210302

Moran, M. (2024). *Hambre y seguridad alimentaria – Desarrollo sostenible*. Naciones Unidas. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/

Murguía-Salas, V., y Ronzón-Hernández, Z. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Una mirada a mitad de camino. Revisión del Objetivo 8 en México. *Equidad y Desarrollo,* (42), e1594. https://equidad.lasalle.edu.co/article/view/545

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *La escasez de agua supone menos agua para la producción agrícola, lo cual se traduce en una menor disponibilidad de alimentos y pone en peligro la seguridad alimentaria y la nutrición.* https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/es

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Sustainable agricultural practices.* https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/soil-biodiversity/agriculture-and-soil-biodiversity/sustainable-agricultural-practices/en/

Ranjha, M. M. A. N., Shafique, B., Khalid, W., Nadeem, H. R., Mueen-Ud-Din, G., y Khalid,

M. Z. (2022). Applications of biotechnology in food and agriculture: A mini-review. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B: Biological Sciences, 92*(1), 11–15. https://doi.org/10.1007/s40011-021-01320-4

Ríos Hernández, R. (2021). La agricultura de precisión: Una necesidad actual. *I Agric, 11*(1). https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1347

Robotnik. (2024). *Aplicaciones de la robótica en la agricultura*. https://robotnik.eu/es/aplicaciones-de-la-robotica-en-la-agricultura/

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Cultivando el futuro: Agricultura sostenible y sustentable*. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivando-el-futuro-agricultura-sostenible-y-sustentable

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of food and agriculture 2022*. https://doi.org/10.4060/cb9479en

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature, 418*(6898), 671-677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Veneros, J., García, Morales, L., Gómez, V., Torres, M., y López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *IDESIA (Arica), 38*(4), 99–107. https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099

World Bank. (2025). *Digital agriculture: The future of farming in a digital world*. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/218161615982157138/digital-agriculture-the-future-of-farming-in-a-digital-world