

Perspectivas científicas del agro

Serie de documentos de trabajo

## Escaneo científico de soluciones “Agritech” orientadas a pequeños productores

Leidy Johanna Cárdenas Solano  
Carlos Alberto Contreras Pedraza





Serie de documentos de trabajo

Perspectivas científicas del agro

## Escaneo científico de soluciones “Agritech” orientadas a pequeños productores

### Autores

Leidy Johanna Cárdenas Solano  
Carlos Alberto Contreras Pedraza

Mosquera, Diciembre 2025

La elaboración de este documento se deriva de las acciones de monitoreo y seguimiento de información científica, desarrollados por el Departamento de Inteligencia Científica y Tecnológica de la Dirección de Investigación y Desarrollo de Agrosavia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Sede Central. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047, Colombia.

**Citación sugerida:** Cárdenas-Solano, L.J. & Contreras-Pedraza, C.A. (2025). *Escaneo científico de soluciones "Agritech" orientadas a pequeños productores*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

DOI: 10.21930/agrosavia.escaneocientifico.2025.3

Línea de atención al cliente: 018000121515

atencionalcliente@agrosavia.co

<http://www.agrosavia.co>



[https://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](https://co.creativecommons.org/?page_id=13)

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	7
Estrategia de búsqueda.....	9
Indicadores bibliométricos .....	9
Dinámica de publicaciones .....	10
Principal representante según producción bibliográfica.....	11
Referentes temáticos en investigación .....	14
Evolución en tópicos de investigación .....	16
Influencia del Covid-19 en la investigación para pequeños productores .....	18
Principales tendencias de investigación .....	20
Tipos clave de soluciones AgriTech para pequeños productores .....	22
Funciones típicas de soluciones AgriTech y sus efectos .....	26
Impactos de soluciones AgriTech en productividad, ingresos y sostenibilidad .....	29
Principales barreras y brechas de adopción .....	30
Estrategias para una implementación inclusiva .....	32
Bibliografía.....	36

## Lista de Figuras

Figura 1. Producción de publicaciones científicas .....	10
Figura 2. Indicadores de producción bibliográfica de investigador con mayor producción	12
Figura 3. Líneas temáticas en investigación.....	15
Figura 4. Evolución temática .....	16
Figura 5. Áreas de enfoque de la investigación AgriTech a raíz del Covid-19 .....	18
Figura 6. Fronteras de investigación Agritech según influencia del Covid-19 .....	19
Figura 7. Mapa temático principales tendencias de investigación .....	20
Figura 8. Innovaciones AgriTech: Soluciones para empoderar al pequeño agricultor .....	23
Figura 9. Barreras y brechas de soluciones “AgriTech” para pequeños productores .....	32
Figura 10. Soluciones “AgriTech” inclusivas para empoderar pequeños productores .....	33
Figura 11. Resumen desafíos persistentes y recomendaciones claves para mejorar la adopción de AgriTech entre pequeños productores .....	35

## Lista de Tablas

Tabla 1. Funciones típicas de soluciones AgriTech y sus efectos.....	26
--	----

## Autores

### **Leidy Johanna Cardenas Solano, M.Sc.**

Orcid: [0000-0001-5471-7160](https://orcid.org/0000-0001-5471-7160)

Ingeniera Industrial, MSc en Ingeniería Industrial enfocada en la gestión de la tecnología y la innovación, certificada como Ciudadana de Datos por Alianza Caoba y Científica de datos certificada por MinTIC y Correlation One, con conocimientos en ISO 27001:2013. Investigador Junior reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y Analista del Departamento de Inteligencia y Divulgación Científica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. Formación en Platzi en Transformación Digital y más de 12 años de experiencia en valoración financiera de tecnologías, transferencia tecnológica y formulación de proyectos de I+D+i para el SGR, Minciencias, y CYTED. Docente universitaria, experiencia de investigación en Gestión de la Innovación Tecnológica y el Conocimiento y formulación de proyectos para la consecución de más de 13 mil millones que se ejecutan a través de proyectos financiados con beneficios tributarios. Las principales áreas de investigación comprenden la gestión del conocimiento, la gestión de la innovación, la gestión de la tecnología, la inteligencia competitiva, la vigilancia tecnológica, la cienciometría, el análisis de las cadenas de valor de la agricultura, la hoja de ruta tecnológica, el benchmarking, y la prospectiva tecnológica.

### **Carlos Alberto Contreras Pedraza, M.Sc.**

Orcid: [0000-0001-7138-2147](https://orcid.org/0000-0001-7138-2147)

Profesional en Ingeniería Industrial, Magíster en Ingeniería Agrícola y estudios en Magister en Ingeniera Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador Master Asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y Coordinador de Inteligencia Científica de la misma. Experiencia en investigación y ejecución de proyectos en el área de gestión tecnológica, gestión de conocimiento y direccionamiento estratégico de sectores productivos. Ha desarrollado proyectos con la Universidad Nacional de Colombia, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, AGROSAVIA, La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria

Naval Marítima y Fluvial - COTECMAR, Cámara de Comercio de Cartagena, Universidad Tecnológica de Bolívar, entre otras. Conocimiento y habilidad en el desarrollo de ejercicios de vigilancia tecnológica y comercial, benchmarking, diagnóstico tecnológico, prospectiva, desarrollo de indicadores en CTI, entre otros. Experiencia en estudios estratégicos para cadenas productivas agroindustriales, manejo de bases de datos de información científica y comercial, elaboración y actualización de indicadores de CTI para el sector agropecuario, al igual herramientas informáticas básicas y especializadas en el campo de la vigilancia tecnológica y comercial.

## Introducción

Las soluciones AgriTech para pequeños productores abarcan desde riego inteligente y monitoreo de cultivos hasta plataformas de comercio y financiamiento digital. La evidencia muestra alto potencial para productividad, ingresos y sostenibilidad, pero también fuertes barreras de acceso, capacidades y modelos de negocio inclusivos. Las soluciones AgriTech ya muestran capacidad para mejorar rendimientos, reducir costos de insumos, abrir mercados y facilitar acceso a financiamiento en pequeños productores. Sin embargo, el impacto pleno depende de cerrar brechas de infraestructura, alfabetización digital y financiamiento, y de diseñar ecosistemas y modelos de servicio explícitamente centrados en los pequeños agricultores.



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito aportar al conocimiento sobre las tendencias de investigación, las líneas temáticas dominantes y los focos emergentes en torno a las soluciones AgriTech dirigidas a pequeños productores. Para ello, se desarrolla una revisión sustentada en el análisis de indicadores bibliométricos y cienciométricos, con el fin de identificar patrones de publicación, dinámicas de producción

científica, tópicos emergentes y áreas de mayor desarrollo dentro del campo. De manera complementaria, a partir del análisis cualitativo de los resúmenes de artículos seleccionados —tanto recientes como relevantes y altamente citados— se caracteriza la evolución temática y las principales tendencias investigativas asociadas con la adopción, implementación e impacto de estas tecnologías en contextos de pequeña producción agrícola.

La estrategia metodológica incluyó una consulta estructurada en la base de datos Scopus®, cuyos metadatos recuperados fueron analizados mediante la herramienta Bibliometrix® v.4.5.3 (Aria & Cuccurullo, 2017). Esta aproximación permitió construir mapas temáticos y otras visualizaciones bibliométricas orientadas a evaluar el grado de desarrollo, relevancia y articulación de los temas abordados en la literatura científica, proporcionando una base empírica para comprender la configuración actual del campo y sus oportunidades de investigación y vigilancia científico-tecnológica.

## Estrategia de búsqueda

Para el análisis de cacao criollo se descargó un corpus con 3.539 registros de la base de datos de Scopus® utilizando la siguiente ecuación de búsqueda, la cual se compone de un conjunto de palabras o términos relevantes conectados mediante operadores booleanos sin ningún tipo de restricción temporal, por tipo de documento y por área temática:

```
(TITLE-ABS-KEY ("Small-Scale Farming" OR "Smallholders Farmers" OR "Smallholder Agriculture" OR "small agribusiness") AND TITLE-ABS-KEY ("smart agriculture" OR "Digital Transformation" OR "Digital Agricultural" OR AgriTech OR "Innovative digital" OR technolog*))
```

La base de datos Scopus® fue consultada directamente para obtener detalles sobre los documentos seleccionados, incluyendo autores, campos de estudio y número de publicaciones. Esta plataforma recopila y organiza una amplia variedad de fuentes, como revistas científicas, artículos de investigación y revisión, libros, patentes y otros recursos. Esto se logra mediante la extracción de metadatos de títulos, autores, resúmenes y palabras clave. Este proceso es posible gracias al uso de algoritmos de búsqueda y análisis semántico, teniendo en cuenta factores como las palabras clave utilizadas, la relevancia de los documentos, la calidad de las revistas y las citas recibidas (Flórez-Martínez et al., 2023). Estos factores se describen a través de indicadores bibliométricos implementados por Scopus®.

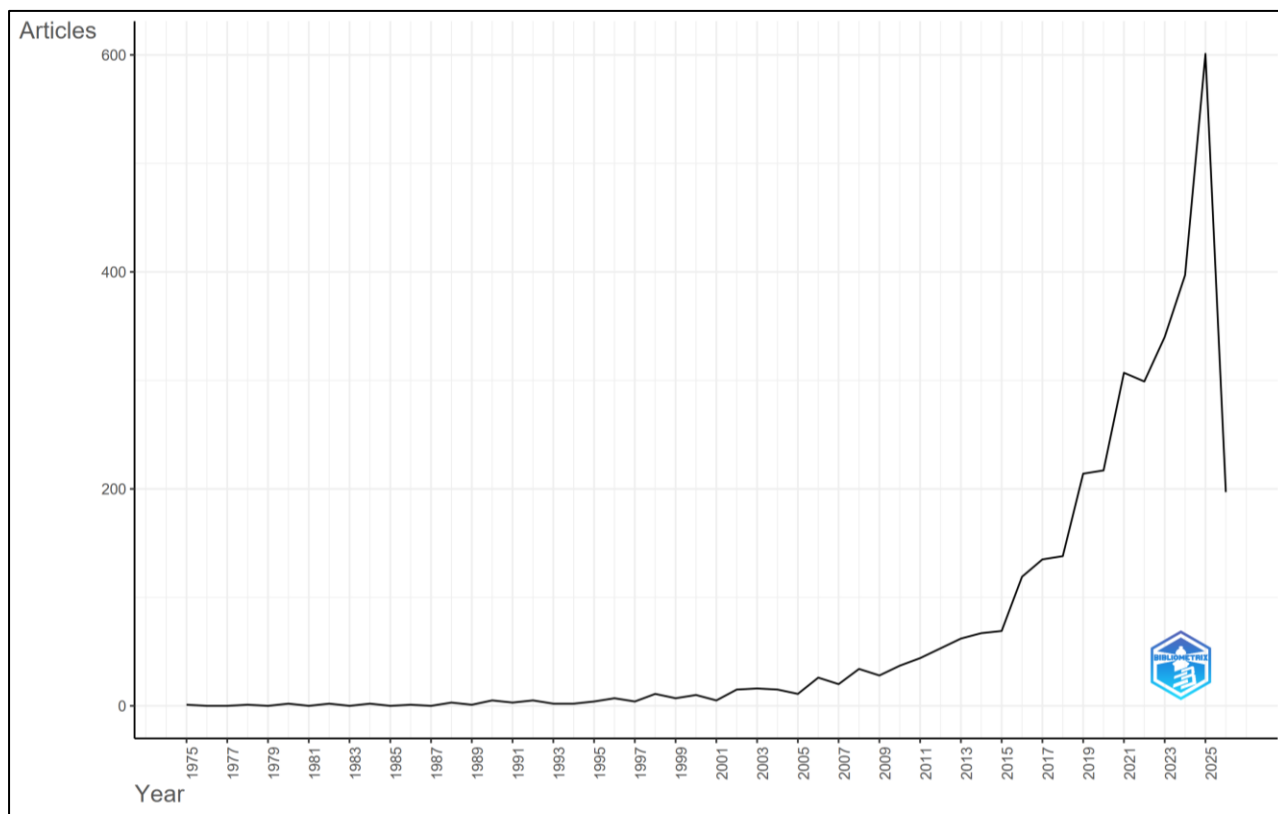
## Indicadores bibliométricos

A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de la producción científica sobre cacao criollo. Este análisis abarca la dinámica de publicaciones, considerando el crecimiento promedio anual en términos de número de publicaciones, lo cual permite identificar cambios significativos en periodos específicos dentro de la ventana temporal analizada y reflejar posibles variaciones o tendencias emergentes en la generación de conocimiento en este ámbito. Asimismo, se analizan los referentes temáticos de investigación, los tópicos persistentes a lo largo del tiempo y la red de coocurrencia de temas, proporcionando una visión integral de las principales áreas de interés y las conexiones temáticas en este campo.

## Dinámica de publicaciones

La dinámica de publicaciones representada en la Figura 1 refleja un **crecimiento exponencial** y un interés académico acelerado en el campo de las innovaciones tecnológicas agrícolas (AgriTech) y la seguridad alimentaria de los pequeños productores.

**Figura 1. Producción de publicaciones científicas**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de análisis Bibliometrix 4.5.3®

Según los datos visuales de la gráfica, se pueden identificar las siguientes etapas y tendencias clave:

- **Periodo de baja actividad (1975 - 2005):** Durante aproximadamente tres décadas, el volumen de publicaciones anuales fue mínimo, manteniéndose casi constante y significativamente por debajo de los 50 artículos por año.

- **Fase de crecimiento inicial (2005 - 2015):** A partir de mediados de la década de 2000, se observa un incremento gradual que marca el inicio de una mayor atención científica hacia estas temáticas.
- **Auge y explosión académica (2015 - 2025):** Se evidencia una trayectoria ascendente muy pronunciada a partir de 2015. La producción científica se disparó en este periodo, pasando de unos 100 artículos anuales a un pico histórico de aproximadamente **600 artículos en el año 2025**.
- **Situación en 2026:** El gráfico muestra una caída abrupta en 2026; sin embargo, esto suele reflejar que los datos para el año en curso están incompletos en el momento en que se generó el informe bibliométrico.

Este fenómeno de crecimiento masivo en la literatura científica coincide con la urgencia documentada en las fuentes por abordar desafíos como la **adaptación al cambio climático**, la seguridad alimentaria frente al crecimiento poblacional y la **transformación digital** de los sistemas agrícolas de pequeña escala. Las fuentes sugieren que este interés se ha intensificado debido a la necesidad de encontrar soluciones tecnológicas sostenibles y accesibles para los pequeños agricultores en el contexto de la "Agricultura 4.0" y la "Agricultura Climáticamente Inteligente".

### Principal representante según producción bibliográfica

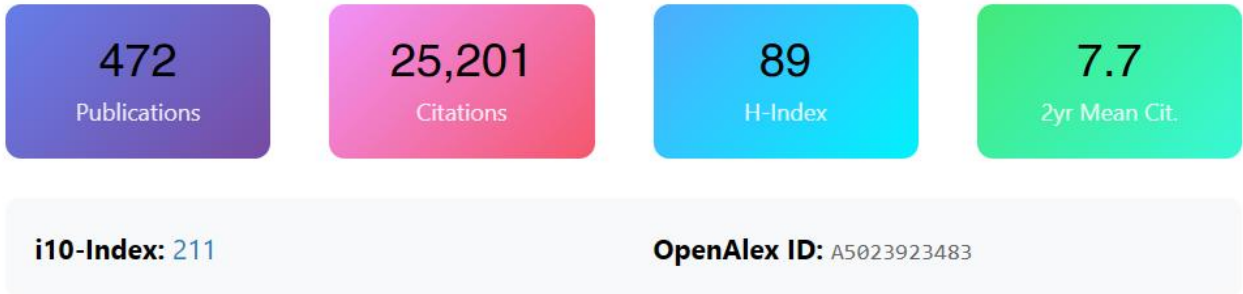
Respecto al análisis detallado de los investigadores, el investigador con mayor producción científica es Martin Qaim<sup>1</sup> de University of Göttingen. Este autor habla principalmente de cómo distintas tecnologías e innovaciones agrícolas afectan a los pequeños agricultores, especialmente en términos de adopción, productividad, ingresos, seguridad alimentaria, acceso a mercados y bienestar rural. Sus indicadores bibliométricos globales y locales son:

---

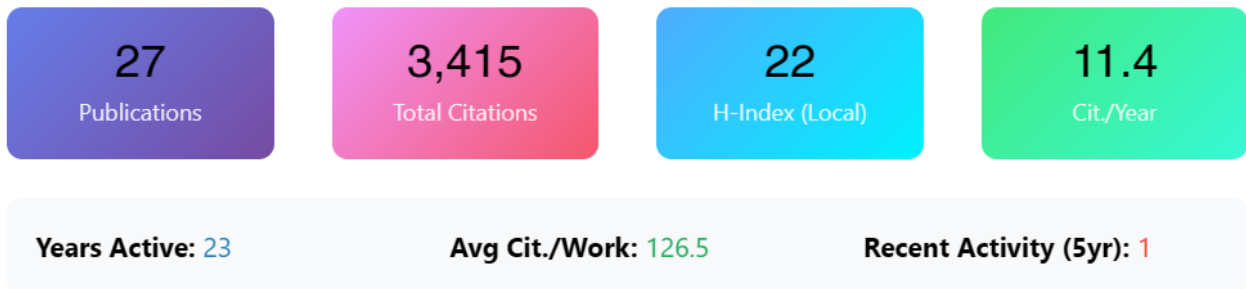
<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4143-0763>

**Figura 2. Indicadores de producción bibliográfica de investigador con mayor producción**

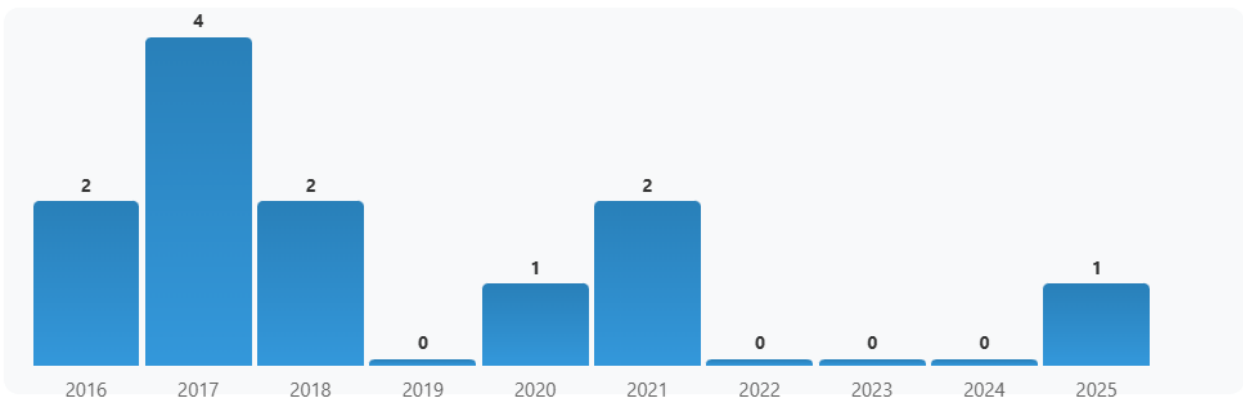
Bibliometric Indicators



Local Bibliometric Indicators



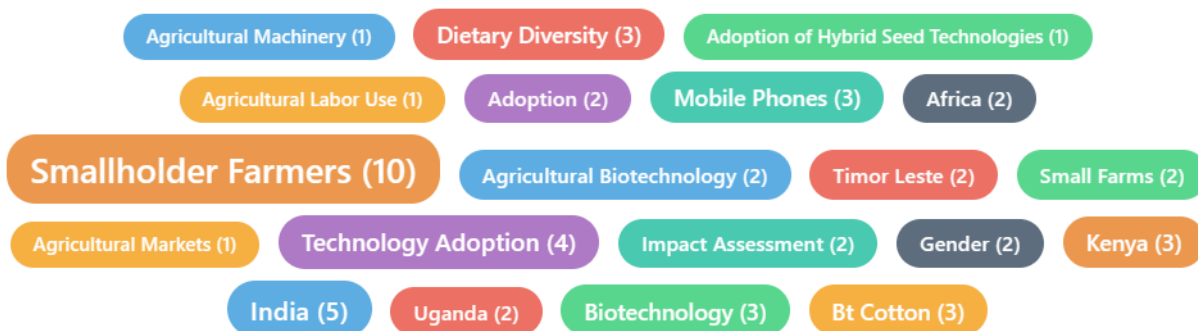
Publication Trends (Last 10 Years)



## Main Research Topics



## Main Keywords



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de análisis Bibliometrix 4.5.3®

Más en detalle, sus temas centrales son estos:

**1. Adopción de tecnologías agrícolas por pequeños productores:** Analiza por qué los agricultores adoptan o no adoptan tecnologías, y qué factores lo explican: acceso a información, crédito, redes sociales, capacitación, provisión de servicios privados y condiciones institucionales. Eso se ve en trabajos sobre semillas híbridas, SRI, servicios privados para laser land levelling y redes sociales para adopción tecnológica.

**2. Tecnologías digitales para extensión, mercados y finanzas:** Una línea muy clara en Qaim es la **digitalización rural**. Estudia cómo los **servicios de extensión digital personalizados**, los **teléfonos móviles** y el **mobile money** mejoran el acceso a información, insumos, mercados, ingresos, diversidad productiva y bienestar de los hogares rurales.

**3. Biotecnología agrícola y cultivos transgénicos:** Otra línea muy fuerte de Qaim es el análisis de **Bt cotton** y, en general, de **cultivos genéticamente modificados**. No lo aborda solo desde la biología, sino desde sus efectos económicos, sociales y ambientales: rendimiento, uso de

pesticidas, intoxicación, ingresos, seguridad alimentaria, sostenibilidad y controversias públicas. En varios de sus trabajos concluye que Bt cotton puede aumentar rendimientos y ganancias, reducir pesticidas y mejorar bienestar en pequeños productores.

**4. Seguridad alimentaria, nutrición y bienestar:** Qaim también conecta la tecnología con resultados más amplios de desarrollo: calidad de dieta, consumo calórico, nutrición, igualdad de género y bienestar del hogar.

**5. Organización económica y articulación al mercado:** También trabaja temas como contract farming, acción colectiva, comercialización y articulación de pequeños productores con mercados de mayor valor. Ahí su interés es mostrar bajo qué condiciones las innovaciones institucionales o contractuales generan beneficios reales.

En síntesis, Qaim habla sobre la relación entre tecnología, adopción e impacto en pequeños agricultores, con un enfoque muy aplicado en desarrollo rural. Su pregunta de fondo a resolver a través de las investigaciones recuperadas para esta temática parece ser: ¿qué tecnologías funcionan para los smallholders, en qué condiciones se adoptan, y si realmente mejoran productividad, ingresos, seguridad alimentaria y bienestar?

### Referentes temáticos en investigación

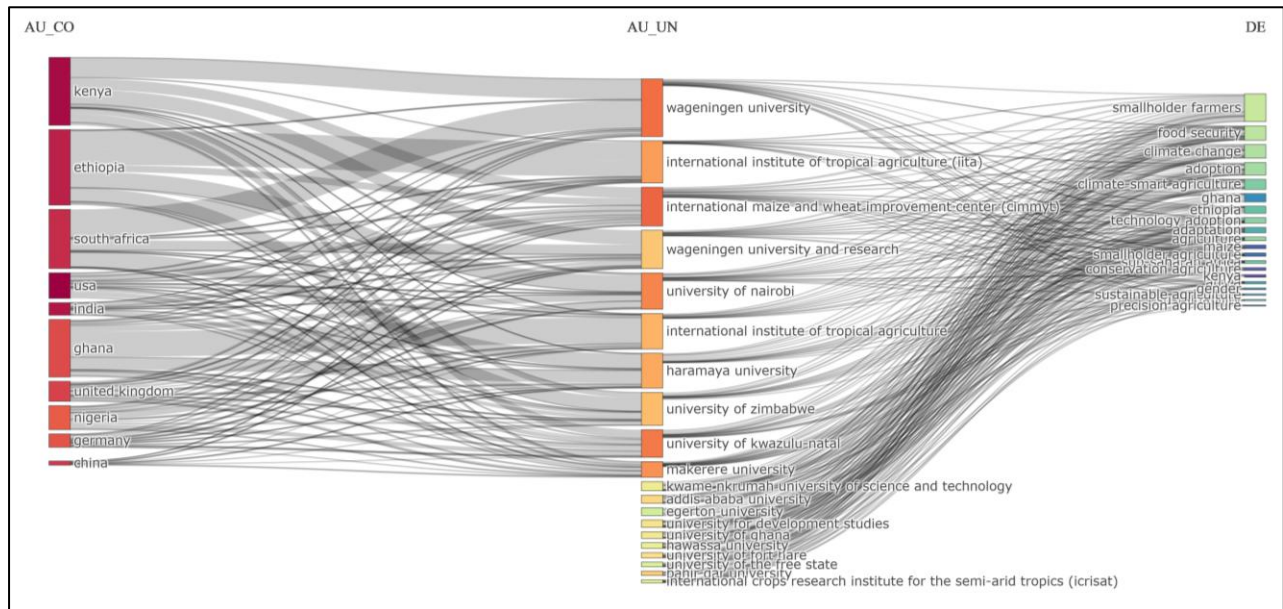
La identificación de referentes en investigación a través del análisis de publicaciones científicas permite conocer investigadores, organizaciones, países líderes y las principales fuentes de consulta, información relevante para mapear una temática. Este proceso es valioso para mapear la temática y detectar referentes, potenciales aliados estratégicos para el desarrollo de proyectos de investigación, transferencias de tecnología, intercambio de conocimientos y la organización de misiones técnicas.

La Figura 3 representa una visualización conocida como *Three-Field Plot* que permite representar las relaciones entre tres dimensiones bibliográficas distintas mediante un diagrama tipo Sankey. Esta visualización facilita el análisis integrado de diferentes campos de metadatos y resulta especialmente útil para comprender cómo se articulan autores, instituciones, países, fuentes, referencias y temáticas dentro de un dominio científico.

La lectura del gráfico debe considerar varios aspectos. El grosor del flujo indica la intensidad de la relación entre dos elementos. Los nodos que presentan múltiples

conexiones entrantes o salientes suelen representar actores o temas con mayor centralidad dentro del campo. Por su parte, las conexiones delgadas o aisladas pueden reflejar nichos especializados, tópicos emergentes o relaciones aún poco consolidadas. El uso de colores facilita el rastreo visual de los flujos, especialmente desde el campo izquierdo, y contribuye a identificar convergencias, especializaciones o patrones de interdisciplinariedad entre los distintos campos.

**Figura 3. Líneas temáticas en investigación**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de análisis Bibliometrix 4.5.3®

Los resultados muestran una clara concentración de la producción científica en Kenia, Etiopía y South Africa, seguidos por países como USA, India, Ghana, Reino Unido y Nigeria. En el plano institucional, sobresalen Wageningen University, el International Institute of Tropical Agriculture (IITA), el International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), la University of Nairobi y Haramaya University, lo que evidencia el papel articulador tanto de universidades con fuerte capacidad investigativa como de centros internacionales especializados en agricultura y desarrollo rural.

En cuanto a los tópicos predominantes, se destacan términos como food security, climate change, climate-smart agriculture, technology adoption, conservation agriculture, sustainable agriculture y precision agriculture. En conjunto, estos descriptores indican que

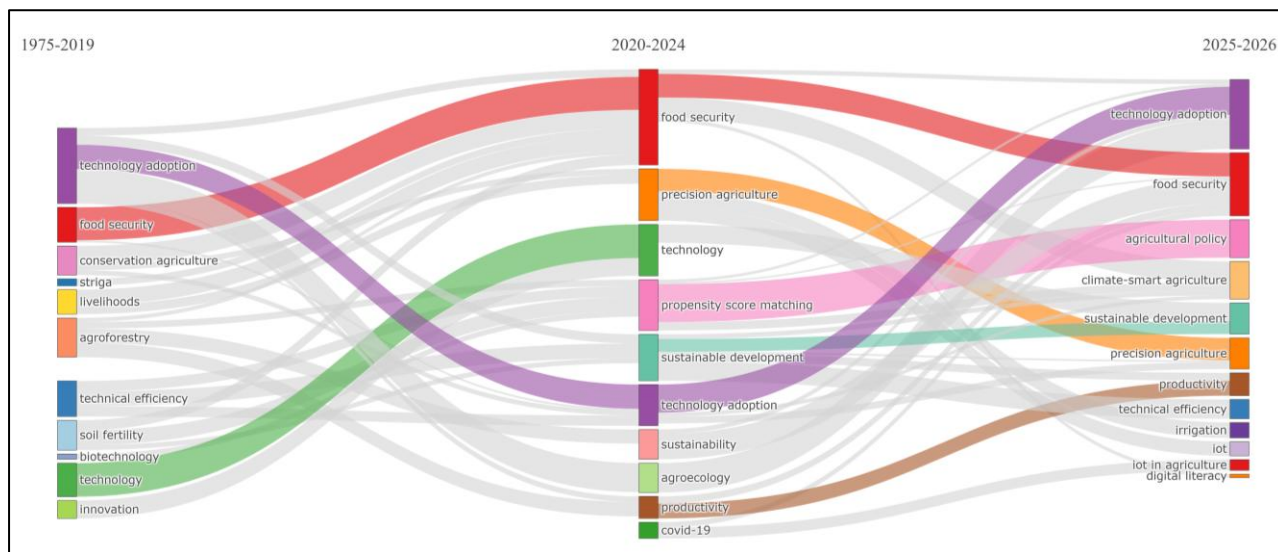
la agenda científica se concentra en la adopción de tecnologías y prácticas agrícolas sostenibles por parte de pequeños productores, con énfasis en seguridad alimentaria, adaptación al cambio climático y mejora del desempeño productivo en contextos rurales.

Este análisis permite identificar actores estratégicos en la investigación de soluciones AgriTech orientadas a pequeños productores, así como reconocer territorios e instituciones donde se está consolidando capacidad científica en temas como agricultura climáticamente inteligente, agricultura de precisión, adopción tecnológica y sostenibilidad. Esta información puede servir de base para priorizar colaboraciones internacionales, acceder a desarrollos tecnológicos pertinentes y fortalecer redes científicas especializadas.

### Evolución en tópicos de investigación

La Figura 4 es un diagrama de flujo tipo Sankey que ilustra cómo los temas de investigación han emergido, crecido, se han fusionado o dividido a lo largo de tres periodos de tiempo: 1975-2019, 2020-2024 y 2025-2026.

**Figura 4. Evolución temática**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de análisis Bibliometrix 4.5.3®

A continuación, se describe la evolución de la estructura conceptual del campo, la cual evidencia una transición desde términos generales hacia aplicaciones tecnológicas

progresivamente más específicas. En el bloque más reciente (2025–2026), adquieren mayor protagonismo temas como la política agrícola (*agricultural policy*) y la alfabetización digital (*digital literacy*), lo que sugiere un desplazamiento del interés investigativo hacia condiciones habilitantes para la adopción y escalamiento de innovaciones. Asimismo, varios subtemas característicos de los primeros años, como la fertilidad del suelo y la biotecnología, muestran una tendencia a converger en los periodos finales hacia enfoques más integrados, asociados con el desarrollo sostenible y la agricultura climáticamente inteligente.

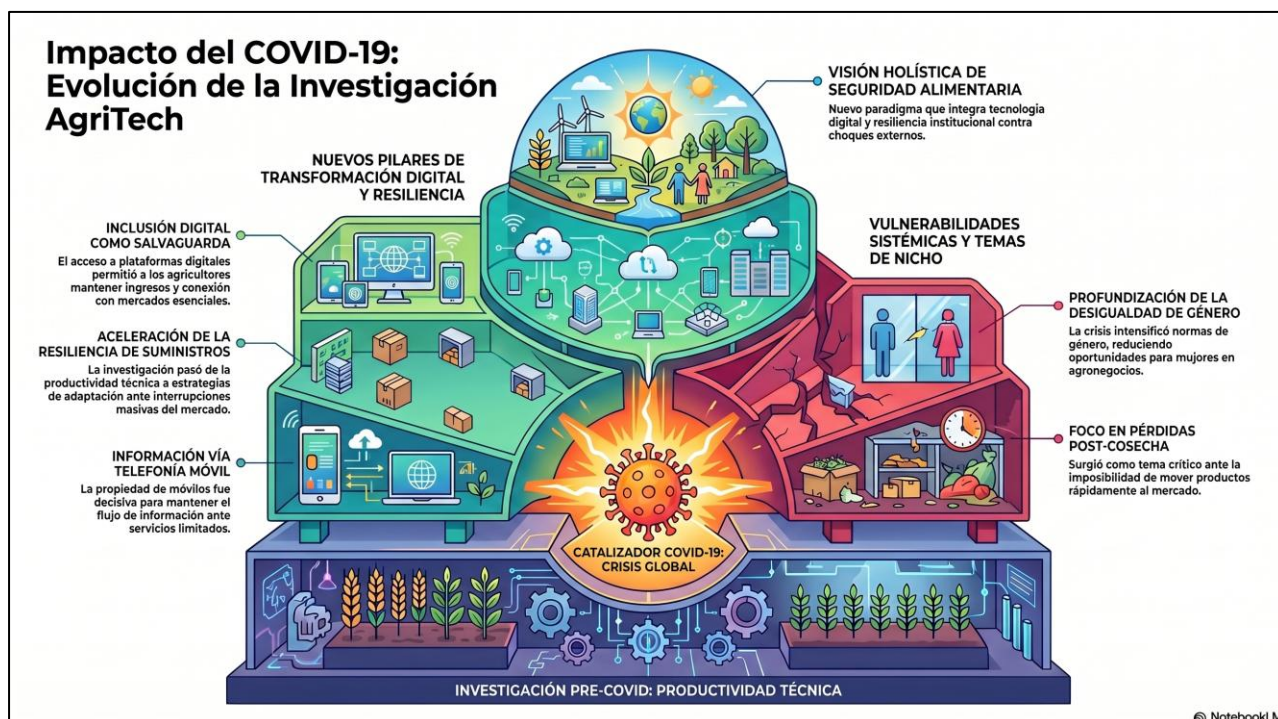
- **Seguridad Alimentaria (Food Security):** Es el eje central y constante. Se observa como una corriente gruesa y estable que fluye a través de los tres periodos, consolidándose como el objetivo final de las innovaciones en AgriTech.
- **Adopción de Tecnología (Technology Adoption):** En el primer periodo (1975-2019), era un tema masivo y general. Con el tiempo, se ha fragmentado y especializado, alimentando temas más específicos como la agricultura de precisión y la alfabetización digital en el periodo más reciente.
- **Evolución de "Tecnología" e "Innovación":** Estos temas basales del primer periodo dieron paso a conceptos modernos como IoT (Internet de las Cosas), Smart Agriculture y Agricultura de Precisión en el periodo 2020-2024, reflejando la transformación digital documentada en las fuentes.
- **Covid-19:** Este tema aparece claramente en el bloque 2020-2024 como un factor que impactó las cadenas de suministro y la resiliencia de los pequeños productores.

Esta evolución temática coincide con el crecimiento exponencial mostrado en otros gráficos (Figura 1), donde el interés científico-académico se dispara a partir de 2015, alcanzando un pico de publicaciones en 2025. El gráfico de evolución muestra que este auge no es solo en cantidad, sino en una complejidad creciente de los temas tratados, pasando de la agronomía tradicional (como agroforestry o soil fertility) hacia la Agricultura 4.0 y el uso de Inteligencia Artificial.

## Influencia del Covid-19 en la investigación para pequeños productores

La pandemia de Covid-19 influyó de manera significativa en la investigación para pequeños productores al actuar como un catalizador para el estudio de la resiliencia, la transformación digital y las vulnerabilidades sistémicas de las cadenas de suministro.

**Figura 5. Áreas de enfoque de la investigación AgriTech a raíz del Covid-19**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

De acuerdo con las fuentes, los principales impactos y áreas de enfoque de la investigación a raíz de la pandemia son:

### 1. Enfoque en la Resiliencia y Cadenas de Suministro

- **Disrupción de mercados:** La investigación documentó cómo la pandemia interrumpió las cadenas de suministro de productos básicos, empeorando las luchas tradicionales de los pequeños agricultores y dificultando su existencia económica.
- **Estrategias de adaptación:** En regiones como Bangladesh, se estudió cómo el Covid-19 afectó las estrategias de agricultura climáticamente inteligente (CSA). Se observó que, mientras los esfuerzos de intensificación se mantuvieron, la migración

estacional y las prácticas de mitigación de gases de efecto invernadero se estancaron.

## 2. Aceleración de la Transformación Digital

- **Inclusión digital como salvaguarda:** La crisis resaltó la importancia de la inclusión digital para construir cadenas de suministro resilientes. El acceso a plataformas digitales permitió a los agricultores permanecer conectados con los mercados esenciales y mantener ingresos durante las restricciones.
- **Importancia de la información:** La propiedad de teléfonos móviles se identificó como un factor decisivo para mejorar la productividad y los ingresos en tiempos de crisis, facilitando el flujo de información cuando los servicios de extensión física estaban limitados.

En el análisis bibliométrico del periodo 2020-2024, el "Covid-19" aparece como un nodo temático específico en la evolución de la investigación. El gráfico muestra que el Covid-19 se consolidó como un tema de nicho estrechamente relacionado con el estudio de pérdidas postcosecha y el almacenamiento hermético, reflejando la preocupación por la seguridad alimentaria ante la imposibilidad de mover los productos rápidamente al mercado.

**Figura 6. Fronteras de investigación Agritech según influencia del Covid-19**



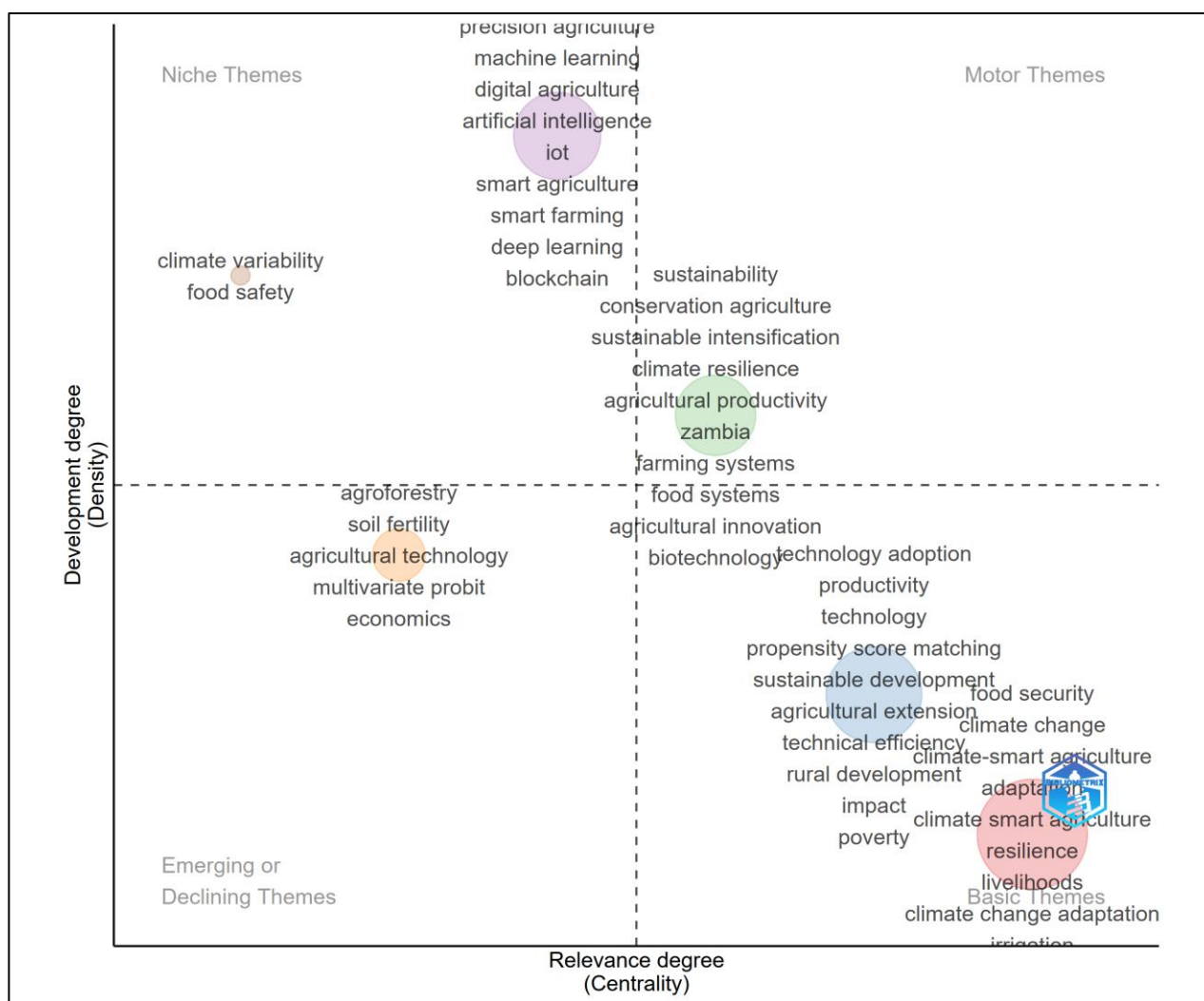
**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

En resumen, el Covid-19 desplazó la frontera de investigación desde una productividad puramente técnica hacia una visión más holística de la seguridad alimentaria, donde la tecnología digital y la resiliencia institucional son herramientas críticas para enfrentar choques externos masivos.

### Principales tendencias de investigación

La Figura 7 presenta el mapa temático del campo de estudio, en el cual los principales tópicos de investigación se organizan a partir de dos dimensiones estratégicas: centralidad y densidad.

**Figura 7. Mapa temático principales tendencias de investigación**



**Fuente.** Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

La centralidad expresa el grado de relevancia de un tema dentro del campo, es decir, su nivel de conexión con otros clústeres temáticos y su capacidad de articulación en la estructura conceptual general. La densidad, por su parte, refleja el nivel de desarrollo interno de cada tema, indicando el grado de cohesión, consolidación y especialización del conocimiento acumulado en torno al clúster. A partir de estas dos dimensiones, los temas se distribuyen en cuatro cuadrantes que permiten interpretar su posición estratégica dentro del dominio analizado, siguiendo el enfoque de Callon et al. (1991), Cobo et al. (2011) y los desarrollos recientes de Aria et al. (2025).

En el **cuadrante superior derecho**, correspondiente a los **temas motores**, se ubican los tópicos que combinan alta centralidad y alta densidad; por tanto, representan líneas de investigación sólidamente desarrolladas y, al mismo tiempo, fundamentales para la articulación del campo. En esta zona se identifican clústeres asociados con *sustainability*, *conservation agriculture* y *sustainable intensification*, lo que sugiere que estos enfoques constituyen ejes consolidados y de alto valor estructurante en la investigación sobre tecnologías y estrategias agrícolas orientadas a pequeños productores.

El **cuadrante inferior derecho** agrupa los temas base o transversales, caracterizados por una alta centralidad, pero una menor densidad interna. Se trata de temas estrechamente conectados con el resto del campo, aunque todavía con margen para profundizar su desarrollo y especialización. En este grupo destacan clústeres como *food security*, *climate change* y *climate-smart agriculture*, así como *technology adoption*, *productivity* y *technology*. Su ubicación indica que estos tópicos constituyen la base conceptual y aplicada del campo, articulando buena parte de la producción científica, aunque algunos de ellos aún presentan oportunidades de fortalecimiento interno.

En el **cuadrante superior izquierdo**, correspondiente a los temas de nicho, se localizan clústeres con alta densidad, pero baja centralidad; es decir, temas bien desarrollados internamente, aunque con menor articulación respecto al conjunto del campo. En esta categoría aparecen *sustainable agriculture*, *precision agriculture* y *machine learning*, lo que sugiere la presencia de una línea especializada y técnicamente robusta, con fuerte cohesión conceptual, pero todavía relativamente periférica frente a los grandes núcleos

temáticos. En este mismo cuadrante también se ubica *climate variability*, como tema específico con desarrollo propio, aunque con una inserción más limitada en la estructura general del campo.

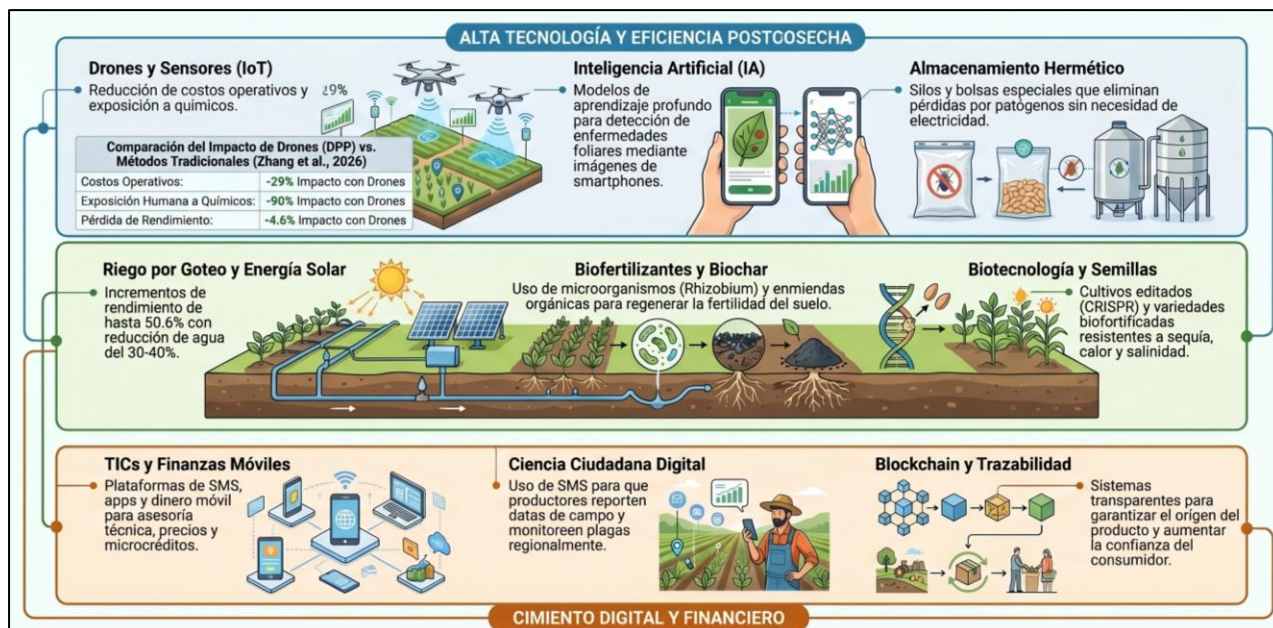
Por su parte, en el **cuadrante inferior izquierdo** se encuentran los temas emergentes o en declive, caracterizados por baja centralidad y baja densidad. Estos temas pueden corresponder tanto a líneas incipientes, aún en proceso de consolidación, como a tópicos que han perdido protagonismo relativo en la agenda científica. En la figura, este espacio está representado por el clúster conformado por *agroforestry*, *soil fertility* y *agricultural technology*, cuya posición sugiere que, aunque siguen presentes en la conversación científica, actualmente ocupan un lugar menos articulado y menos desarrollado que otros enfoques más recientes o integradores.

En conjunto, el mapa temático evidencia que la estructura del campo está fuertemente sostenida por temas vinculados con la seguridad alimentaria, el cambio climático, la adopción tecnológica y la agricultura climáticamente inteligente, mientras que enfoques como la agricultura de precisión y el aprendizaje automático avanzan como nichos especializados con potencial de expansión. A su vez, temas más tradicionales como la fertilidad del suelo y la agroforestería parecen haber perdido centralidad relativa o estar siendo absorbidos dentro de marcos más amplios relacionados con la sostenibilidad y la intensificación sostenible.

### Tipos clave de soluciones AgriTech para pequeños productores

Las soluciones **AgriTech** para pequeños productores se dividen en varias categorías clave que buscan cerrar la brecha de productividad, mejorar la resiliencia climática y facilitar el acceso a mercados. Según la literatura científica, estas innovaciones han experimentado un **crecimiento exponencial** en la última década para responder a desafíos como la inseguridad alimentaria y el cambio climático.

Figura 8. Innovaciones AgriTech: Soluciones para empoderar al pequeño agricultor



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

A continuación, se detallan los tipos clave de soluciones identificados en las fuentes:

### 1. Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)

- **Servicios de Asesoría o asistencia agronómica Digital:** Plataformas como **AgroTutor** e **iSAT** entregan información personalizada sobre fechas de siembra, manejo de cultivos y alertas climáticas mediante SMS o respuesta de voz interactiva (IVR). (Joseph, J.E., et al., 2026; Aliyu, K.T., et al. (2026)). En general, apps, SMS, radio, videos y redes sociales para decisiones sobre siembra, fertilización y manejo de plagas (Mollel et al., 2025; Yuan & Sun, 2024).
- **Aplicaciones Móviles:** Herramientas como **farmbetter** y plataformas de redes sociales permiten a los agricultores acceder a precios de mercado en tiempo real y conectarse directamente con compradores, reduciendo la asimetría de información. (Sarma, P.K., 2026; Mangole, C.D., et al., 2026; Okello, J.J., et al., 2009; Nwangwu, K.N., et al., 2024)
- **Ciencia Ciudadana Digital:** Uso de SMS para que los productores reporten datos del campo, permitiendo un monitoreo regional más preciso. (Beza, E., et al., 2018).

## 2. Agricultura de Precisión e Internet de las Cosas (IoT)

- **Sensores de Bajo Costo:** Dispositivos para medir la **humedad del suelo**, el pH y los niveles de nutrientes (N-P-K), facilitando la toma de decisiones basada en datos para el riego y la fertilización.
- **Drones (UAV):** Utilizados para el mapeo de la salud de los cultivos, detección temprana de plagas y la aplicación dirigida de pesticidas, lo que puede reducir los costos operativos en un 29% y la exposición humana a químicos en un 90%.
- **Inteligencia Artificial y Machine Learning:** Modelos de aprendizaje profundo aplicados a la detección de enfermedades foliares a través de imágenes de smartphones y la predicción de brotes de plagas.
- **Producción y manejo de cultivos:** sensores, IoT y riego automatizado para monitorear humedad y clima, mejorando eficiencia hídrica y rendimientos (Dhillon & Moncur, 2023; Dahane et al., 2022).

## 3. Biotecnología y Semillas Mejoradas

- **Cultivos Tolerantes al Estrés:** Desarrollo de variedades de maíz, arroz y leguminosas resistentes a la **sequía**, el calor y la salinidad.
- **Cultivos Genéticamente Modificados y Editados:** Semillas como el **algodón Bt**, que reducen el uso de pesticidas en un 50% y aumentan los rendimientos, además del uso incipiente de **CRISPR** para mejorar rasgos específicos sin introducir ADN foráneo.
- **Biofortificación:** Cultivos enriquecidos nutricionalmente, como la batata de pulpa anaranjada, para combatir deficiencias de micronutrientes.

## 4. Gestión del Agua e Irrigación

- **Riego por Goteo y de Precisión:** Sistemas automatizados de bajo costo que optimizan el uso del agua, logrando incrementos en el rendimiento de hasta un 50.6% con una reducción del 30-40% en el consumo de recurso hídrico.
- **Energía Solar:** Implementación de **bombas de agua solares** que proporcionan una solución de riego sostenible y asequible en zonas sin conexión a la red eléctrica.
- **Cosecha de Agua de Lluvia:** Técnicas como los pozos **zai** y cordones de piedra, combinados con pronósticos meteorológicos digitales. (Garrity, D.P., et al., 2010; Biazin, B., et al., 2012; Zougmore, R., et al., 2014)

## 5. Manejo de Suelos y Nutrientes

- **Biofertilizantes e Inoculantes:** Uso de microorganismos como el **Rhizobium** para la fijación biológica de nitrógeno, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos costosos y contaminantes.
- **Biochar (Bío-carbón):** Enmienda orgánica que mejora la fertilidad del suelo a largo plazo, la retención de humedad y actúa como una herramienta de **secuestro de carbono**.
- **Nanotecnología:** Desarrollo de nanofertilizantes y nanopesticidas que permiten una liberación controlada de activos, mejorando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental.

## 6. Tecnologías Postcosecha y Almacenamiento

- **Almacenamiento Hermético:** Uso de silos metálicos y bolsas especiales que eliminan las pérdidas por insectos y patógenos, permitiendo a los agricultores vender cuando los precios son más altos.
- **Cadena de Frío Pasiva:** Mantas de enfriamiento evaporativo que extienden la vida útil de frutas y hortalizas entre 2 y 4 días sin necesidad de electricidad.
- **Secadores Solares:** Tecnologías híbridas para transformar productos perecederos en productos estables y con valor agregado.

**7. Finanzas Digitales y Trazabilidad (FinTech):** microcrédito, seguros indexados, pagos móviles y plataformas de inversión que mejoran acceso a crédito y gestionan riesgos (Rayhan et al., 2024; Kondrat, 2025; Zhao et al., 2022; Joy et al., 2024; Akinwale et al., 2023).

- **Dinero Móvil y Crédito Digital:** Servicios que alivian las restricciones de liquidez y facilitan la inversión en insumos de calidad.
- **Microseguros Indexados:** Seguros vinculados a datos satelitales que compensan automáticamente a los productores ante eventos climáticos extremos.
- **Blockchain:** Sistemas para garantizar la **trazabilidad** de los productos en la cadena de suministro, aumentando la confianza del consumidor y facilitando la inclusión en mercados de alto valor.

- **Plataformas de mercado y e-commerce rural:** venta directa vía plataformas y redes sociales (WeChat, WhatsApp, TikTok, etc.), ampliando canales y precios (Yuan & Sun, 2024; Balyan et al., 2024; Khedekar et al., 2024).

### 8. Mecanización Apropriada a Escala

- Equipos diseñados para pequeñas parcelas, como **motocultores**, sembradoras de precisión manuales y trilladoras mecánicas, que reducen la carga de trabajo manual y abordan la escasez de mano de obra rural. (Mottaleb, K.A., et al., 2016; Sims, B. & Kienzle, J., 2017; Paudel, G.P., et al., 2019; Banik, B., et al., 2026; De Resende, R.C. & Gonzaga, L.M., 2019)

El éxito de estas soluciones depende no solo de la innovación técnica, sino también de su asequibilidad, facilidad de uso y la integración de conocimientos locales en su diseño.

### Funciones típicas de soluciones AgriTech y sus efectos

Las soluciones AgriTech abarcan una amplia gama de herramientas diseñadas para modernizar la agricultura de pequeña escala, con funciones que van desde la entrega de información hasta el mejoramiento genético y la optimización de recursos. Sus efectos principales incluyen el aumento de la productividad, la mejora de los ingresos y el fortalecimiento de la resiliencia climática. A continuación, se detallan las funciones típicas de estas soluciones y sus impactos principales.

**Tabla 1. Funciones típicas de soluciones AgriTech y sus efectos**

Función	Ejemplo de herramienta	Impacto principal	Citaciones
<b>Riego eficiente</b>	Sensores + IoT bajo costo	Ahorro de agua, mejor rendimiento	(Dhillon & Moncur, 2023; Mdemu et al., 2020; Dahane et al., 2022)
<b>Monitoreo plagas</b>	Apps y drones/UAVs	Menos pérdidas y químicos	(Dhillon & Moncur, 2023; Balyan et al., 2024)

Función	Ejemplo de herramienta	Impacto principal	Citaciones
<b>Venta directa</b>	Plataformas y redes sociales	Mayor acceso a mercados e ingresos	(Amonov et al., 2025; Yuan & Sun, 2024; Balyan et al., 2024)
<b>Crédito/seguro</b>	FinTech rural, wallets, crowdfunding	Más inversión y adopción tecnológica	(Rayhan et al., 2024; Kondrat, 2025; Zhao et al., 2022; Lyu et al., 2025)

**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de análisis *Consensus NLP* ©

Las soluciones AgriTech abarcan una amplia gama de herramientas diseñadas para modernizar la agricultura de pequeña escala, con funciones que van desde la entrega de información hasta el mejoramiento genético y la optimización de recursos. Sus efectos principales incluyen el **aumento de la productividad**, la **mejora de los ingresos** y el **fortalecimiento de la resiliencia climática**.

A continuación, se detallan las funciones típicas de estas soluciones y sus efectos documentados en las fuentes recuperadas de la base de datos Scopus®:

### Plataformas Digitales y Servicios de Información (TIC)

- **Funciones:** Difusión de información meteorológica, precios de mercado, asesoramiento técnico personalizado y alertas sobre plagas o enfermedades a través de SMS, aplicaciones móviles o respuesta de voz interactiva (IVR).
- **Efectos:** Reducen la asimetría de información, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas que optimizan la asignación de recursos. Se han reportado aumentos en los rendimientos de cultivos como el maíz (10.5%) y el mijo (41%) gracias al uso de asesoría digital. Además, facilitan la conexión directa con los mercados, mejorando los precios de venta.

### Servicios Financieros Digitales (FinTech)

- **Funciones:** Facilitación de transferencias de dinero (Mobile Money), acceso a crédito digital, ahorros y microseguros agrícolas.

- **Efectos:** Alivian las restricciones de liquidez, permitiendo a los productores invertir en insumos de mejor calidad (semillas, fertilizantes). El uso de dinero móvil se asocia con mayores beneficios económicos, bienestar familiar y una mayor comercialización agrícola.

### **Agricultura de Precisión e Internet de las Cosas (IoT)**

- **Funciones:** Monitoreo en tiempo real de la humedad y el pH del suelo, la calidad del agua en acuicultura y el estado de salud del ganado mediante sensores.
- **Efectos:** Optimizan el uso de agua y fertilizantes, reduciendo el desperdicio y los costos variables. Sistemas de riego inteligente han logrado reducir el uso de agua hasta en un 40% mientras aumentan el rendimiento de los cultivos en más del 50%. En ganadería, permiten la detección temprana de enfermedades como la mastitis con alta precisión.

### **Drones (UAV) y Teledetección**

- **Funciones:** Mapeo de la salud de los cultivos, detección de brotes de plagas y aplicación dirigida de pesticidas o agua.
- **Efectos:** Permiten intervenciones rápidas y localizadas que reducen las pérdidas post-siembra. El uso de drones para la protección de plantas se asocia con una reducción del 29% en los costos operativos y una disminución del 90% en el tiempo de exposición de los agricultores a químicos nocivos.

### **Biotecnología y Mejoramiento de Semillas**

- **Funciones:** Desarrollo de variedades de cultivos resistentes a la sequía, tolerantes al calor, enriquecidas nutricionalmente (biofortificadas) o resistentes a plagas (como el algodón Bt).
- **Efectos:** Incrementan significativamente los rendimientos (entre 24% y 50% en algunos casos) y reducen la dependencia de pesticidas químicos en un 50%. Estas semillas mejoran la seguridad alimentaria al aumentar la disponibilidad de calorías y la calidad de la dieta en los hogares productores.

### **Tecnologías de Manejo Postcosecha**

- **Funciones:** Almacenamiento hermético en silos metálicos o bolsas especiales, y sistemas de enfriamiento evaporativo pasivo para productos frescos.

- **Efectos:** Eliminan casi por completo las pérdidas debidas a insectos y patógenos en granos almacenados. Esto permite a los agricultores vender sus excedentes meses después de la cosecha, cuando los precios de mercado son más altos, rompiendo así el ciclo de la pobreza. Las mantas de enfriamiento pueden extender la vida útil de frutas y verduras entre 2 y 4 días sin necesidad de electricidad.

### **Mecanización Apropriada a Escala**

- **Funciones:** Uso de motocultores, sembradoras de precisión y cosechadoras combinadas adaptadas a pequeñas parcelas.
- **Efectos:** Reducen la carga de trabajo manual y abordan la escasez de mano de obra rural. Aumentan la eficiencia en la preparación de la tierra y la puntualidad de las operaciones agrícolas, lo que se traduce en mayores rendimientos y rentabilidad económica.

### **Impactos de soluciones AgriTech en productividad, ingresos y sostenibilidad**

La implementación de soluciones AgriTech y prácticas agrícolas climáticamente inteligentes (CSA) ha generado impactos positivos y medibles en la vida de los pequeños productores, abordando la productividad, los ingresos y la sostenibilidad de manera interconectada. A continuación, se detallan los hallazgos principales documentados en las fuentes:

- La adopción de agricultura de precisión y sensores ha permitido optimizar el uso de nitrógeno, aumentando la eficiencia de absorción en un 368% sobre las prácticas tradicionales. Además, Plataformas como "Science and Technology Backyard" en China ayudaron a los agricultores a pasar del 62.8% al 79.6% del rendimiento potencial alcanzable en sus condados.
- Digital tools pueden aumentar rendimientos (casos de +4–6% con agricultura de precisión y hasta +25% con IoT), reducir fertilizante ~20% y pérdidas por plagas ~15 % (Dhillon & Moncur, 2023; Kondrat, 2025; Amonov et al., 2025).
- Plataformas y e-commerce elevan ventas (ejemplo: +30 %), reducen pérdidas postcosecha y mejoran precios al productor (Rayhan et al., 2024; Amonov et al., 2025; Akinwale et al., 2023; Yuan & Sun, 2024).

- Uso de economía y finanzas digitales impulsa adopción de tecnologías ecológicas y prácticas agrícolas sostenibles (Yang et al., 2024; Zhao et al., 2022; Lyu et al., 2025).
- El uso de dinero móvil (Mobile Money) ha mejorado los ingresos de los hogares al facilitar remesas y reducir las restricciones de liquidez para invertir en insumos. Además, el almacenamiento hermético (silos metálicos o bolsas) permite a los agricultores vender sus granos meses después de la cosecha, cuando los precios de mercado son significativamente más altos.
- Prácticas como la Agricultura Siempre Verde (Evergreen Agriculture) y la agricultura de conservación mejoran la estructura del suelo, el ciclo de nutrientes y el almacenamiento de carbono orgánico. El uso de biochar ha demostrado ser una herramienta eficaz para la captura de carbono a largo plazo y la mejora de la retención de humedad en suelos arenosos (D.S., Powlson et al.; 2011).

### Principales barreras y brechas de adopción

Los pequeños agricultores enfrentan obstáculos como costos elevados de capital y capacitación, falta de infraestructura (especialmente conectividad a internet), brechas en habilidades técnicas, y tecnologías diseñadas principalmente para operaciones grandes que no se adaptan a contextos de pequeña escala (ver resumen en Figura 9). A continuación, se explican las **principales barreras y brechas de adopción** en AgriTech para pequeños productores, de acuerdo con el análisis de los resúmenes de los artículos más citados, más relevantes y más recientes recuperados con la ecuación de búsqueda estructurada en el alcance de este documento:

**Infraestructura y acceso:** La carencia de servicios básicos como electricidad confiable y redes de comunicación estables constituye un obstáculo crítico que limita la "entrega de último kilómetro" (Gumbi et al., 2023; Mollel et al., 2025; Satria et al., 2025; Balyan et al., 2024; Choruma, D.J., et al., 2024; Aniteneh, C.T., 2026; Yuan, Y. & Sun, Y., 2024). En el caso de tecnologías avanzadas como los drones (UAV), la electrificación rural por debajo del 50% en muchas regiones impide su despliegue masivo (Ahmed, W.A., et al., 2026). Además, las barreras geográficas y la infraestructura vial deficiente encarecen la logística y dificultan el acceso físico a los insumos tecnológicos, especialmente en zonas remotas

(Chandio, A.A., et al., 2021; Cunguara, B. & Darnhofer, I., 2011; Mohapatra, K.K., et al., 2026; Hussain, M.A. & Guha, P., 2026)

**Capacidades digitales:** La baja alfabetización digital y la falta de habilidades técnicas son factores determinantes que impiden el aprovechamiento de las plataformas digitales (Gumbi et al., 2023; Satria et al., 2025; Finger, 2023; Waris et al., 2025; Choruma, D.J., et al., 2024; Aniteneh, C.T., 2026; Yuan, Y. & Sun, Y., 2024). Existe a menudo un desajuste de diseño entre las aplicaciones y las percepciones de los agricultores sobre las capacidades de sus dispositivos, lo que genera desconfianza (Wyche, S. & Steinfield, C., 2016; Muromba, P., et al., 2025). Asimismo, rasgos psicológicos como el escepticismo tecnológico y la falta de "creencia en la competencia tecnológica" (TCM) influyen negativamente en la intención de adopción (Kimaro, D.J., et al., 2026; Cao, K., et al., 2026; Khoza, S., et al., 2021).

**Financiamiento y modelos de negocio:** Los **altos costos iniciales** de inversión son la barrera económica primordial; por ejemplo, el capital requerido para ciertas tecnologías puede representar entre 0.8 y 3.1 veces el ingreso anual de un pequeño productor; así como, la dependencia de intermediarios y plataformas poco adaptadas a pequeños productores (Satria et al., 2025; Rayhan et al., 2024; Kondrat, 2025; Akinwale et al., 2023). La falta de garantías bancarias o títulos de propiedad limita el acceso al crédito formal en bancos comerciales. Además, muchas soluciones están diseñadas para escalas industriales, resultando en una baja rentabilidad o retornos de inversión muy lentos para parcelas de pequeña escala.

**Brecha entre grandes empresas y pequeños agricultores:** Se ha documentado una "división de innovación" donde los grandes productores acceden a tecnologías de precisión y mecanismos de transferencia de riesgo que los pequeños no pueden costear (Dhillon & Moncur, 2023; Finger, 2023; Kondrat, 2025). Los derechos de propiedad intelectual (IPR) sobre semillas y rasgos tecnológicos clave suelen estar concentrados en empresas privadas, lo que puede limitar la autonomía de los pequeños productores y su capacidad de innovar localmente. Esta asimetría de poder a menudo resulta en un "colonialismo de datos", donde la información recolectada beneficia a las corporaciones, pero margina la voz y las necesidades de las comunidades rurales.

Figura 9. Barreras y brechas de soluciones “AgriTech” para pequeños productores

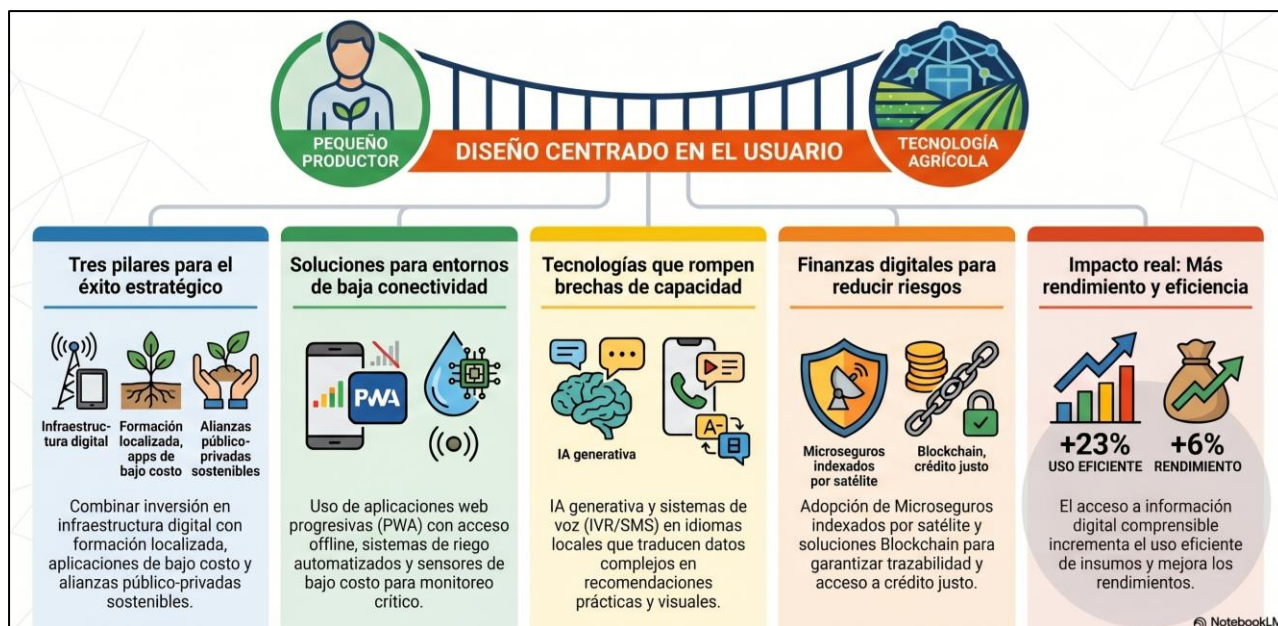


**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

### Estrategias para una implementación inclusiva

La literatura reciente coincide en que la efectividad de las soluciones AgriTech para pequeños productores no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico por se, sino de su diseño, accesibilidad y modelos de implementación (ver resumen en Figura 10). En este sentido, se identifican tres lineamientos estratégicos clave: (i) la combinación de inversión en **infraestructura digital** con procesos de **formación localizada** y extensión adaptada; (ii) el desarrollo de **aplicaciones sencillas**, de **bajo costo** y con contenidos contextualizados; y (iii) la consolidación de **alianzas público-privadas** y esquemas de **costo compartido** que garanticen la sostenibilidad de las soluciones (Gumbi et al., 2023; Satria et al., 2025; Yuan & Sun, 2024; Waris et al., 2025; Mdemu et al., 2020; Kondrat, 2025; Akinwale et al., 2023; Balyan et al., 2024). En este marco, las soluciones tecnológicas emergentes se orientan a mitigar barreras estructurales —infraestructura, capacidades, financiamiento y desigualdad— mediante enfoques centrados en la asequibilidad, la resiliencia operativa (offline/low-tech) y el diseño centrado en el usuario.

**Figura 10. Soluciones “AgriTech” inclusivas para empoderar pequeños productores**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

En primer lugar, frente a las limitaciones de infraestructura y acceso, se destacan herramientas diseñadas para operar en entornos de baja conectividad. Aplicaciones web progresivas (PWA), como AgroTutor, permiten el acceso a asesoría técnica sin conexión a internet, mientras que sistemas de riego automatizados basados en microcontroladores pueden operar completamente offline. Complementariamente, el uso de energías renovables, en particular bombas de agua solares, emerge como una solución costo-efectiva en regiones con baja electrificación rural. A ello se suma la incorporación de sensores de bajo costo, que facilitan el monitoreo de variables críticas como humedad y nutrientes del suelo sin requerir inversiones intensivas.

En segundo lugar, para abordar las brechas en capacidades digitales, la evidencia resalta el papel de tecnologías inclusivas que simplifican la interacción usuario-tecnología. Sistemas basados en inteligencia artificial generativa, como AgroAskAI, permiten traducir información compleja (clima, suelos, plagas) en recomendaciones accionables mediante interfaces de lenguaje natural y soporte multilingüe. Asimismo, el uso de canales de baja complejidad, como SMS e IVR (Respuesta de Voz Interactiva), posibilita la difusión de información técnica y climática en idiomas locales, superando limitaciones de

alfabetización digital. En paralelo, herramientas de aprendizaje visual —como videos cortos offline o dispositivos de termo-imagen— han demostrado ser altamente efectivas en procesos de extensión, con impactos reportados de hasta 10,5 % en el incremento de rendimientos.

En tercer lugar, en relación con las restricciones de financiamiento, se evidencia una creciente adopción de soluciones FinTech y servicios financieros digitales (DFS), que reducen barreras de acceso al crédito mediante mecanismos de evaluación alternativos y disminución de asimetrías de información. Los microseguros indexados, basados en datos satelitales, permiten mitigar riesgos climáticos al automatizar compensaciones, mientras que tecnologías como blockchain facilitan la trazabilidad y el acceso a mercados diferenciados, fortaleciendo el poder de negociación de los productores.

Adicionalmente, para cerrar la denominada “brecha de innovación” entre agricultura a gran escala y pequeños productores, se han desarrollado soluciones de mecanización apropiada, como mini-tractores y herramientas manuales adaptadas a pequeñas parcelas. Más allá de la tecnología individual, la literatura enfatiza el valor de enfoques integrados como los paquetes de innovación socio-técnica (STIB), que combinan soluciones técnicas con arreglos organizativos (cooperativas, redes locales), así como modelos de co-creación como los Science and Technology Backyards (STB), que articulan científicos y agricultores en procesos de innovación basados en necesidades reales del territorio.

De manera transversal, se observa una tendencia hacia el uso de ecosistemas digitales inclusivos, que integran múltiples funcionalidades (asesoría, financiamiento, mercados) en plataformas “todo en uno”, reduciendo la fragmentación tecnológica y la dependencia de intermediarios (Mushi et al., 2022; 2024). Estas soluciones se complementan con modelos de extensión híbrida (blended), que combinan capacitación presencial y herramientas digitales, mejorando significativamente la adopción y el uso efectivo de las tecnologías.

En términos de impacto, la evidencia empírica respalda la efectividad de estas estrategias: estudios de síntesis reportan incrementos promedio del 23 % en el uso de insumos, así como mejoras en rendimiento e ingresos cercanas al 6 %, cuando la información digital es accesible y comprensible para los productores (Beach et al., 2025). No obstante, persisten desafíos asociados a la adopción desigual, particularmente en contextos con limitaciones

estructurales profundas (Mollel et al., 2025; Choruma et al., 2024; Morepje et al., 2024; Satria et al., 2025).

**Figura 11. Resumen desafíos persistentes y recomendaciones claves para mejorar la adopción de AgriTech entre pequeños productores**



**Fuente.** Elaborado a partir de datos de CBinsights®<sup>2 3</sup>, fecha de actualización de consulta abril de 2026. Software de apoyo notebookLM®

En síntesis, las soluciones AgriTech más efectivas no corresponden necesariamente a tecnologías avanzadas de alta complejidad, sino a modelos integrales que combinan simplicidad tecnológica, inclusión digital, sostenibilidad financiera y articulación institucional (ver Figura 11). Este enfoque permite no solo reducir barreras de acceso, sino también potenciar la apropiación tecnológica y la generación de valor en pequeños productores, consolidando una ruta clara para el desarrollo de ecosistemas AgriTech inclusivos y escalables.

<sup>2</sup> Technology and Agriculture: Adoption and Barriers. <https://fsc-ccf.ca/research/technology-adoption-barriers/>

<sup>3</sup> Digital tools crucial for smallholder farmers but fundamental barriers remain — review. <https://www.agtechnavigator.com/Article/2025/04/21/digital-tools-crucial-for-smallholder-farmers-but-fundamental-barriers-remain-review/>

## Bibliografía

- Abdulai, A., Quarshie, P., Duncan, E., & Fraser, E. (2023). Is agricultural digitization a reality among smallholder farmers in Africa? Unpacking farmers' lived realities of engagement with digital tools and services in rural Northern Ghana. *Agriculture & Food Security*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00416-6>
- Akinwale, J., Wole-Alo, F., & Oluwole, B. (2023). Digital Platforms for Linking Agriculture Investors with Smallholder Farmers in Nigeria. *Journal of Agricultural Extension*. <https://doi.org/10.4314/jae.v27i2.6>
- Aliyu, K.T., Nagaraji, S., Odhong, J., Thierfelder, C., Snapp, S. (2026). Co-design and deployment of AgroTutor: a participatory digital advisory tool for sustainable intensification in Malawi. *Computers and Electronics in Agriculture*, 246.
- Amonov, M., Aliyarov, O., Pardaev, L., & Xudayarova, Z. (2025). Innovative digital agriculture solutions for small agribusiness enterprises. *BIO Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202517506007>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aria, M., Cuccurullo, C., D'aniello, L., Misuraca, M., & Spano, M. (2022). Thematic Analysis as a New Culturomic Tool: The Social Media Coverage on COVID-19 Pandemic in Italy. *Sustainability (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063643>
- Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Balyan, S., Jangir, H., Tripathi, S., Tripathi, A., Jhang, T., & Pandey, P. (2024). Seeding a Sustainable Future: Navigating the Digital Horizon of Smart Agriculture. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16020475>
- Banik, B., Jahan, H., Ahmed, M.R., Jackson, T., Jannat, A. (2026). Determinants of modern agricultural machinery adoption in Northern Bangladesh: A multivariate probit analysis. *Sustainable Futures*, 11

- Beach, R., Milliken, C., Franzen, K., & Lapidus, D. (2025). Meta-analysis of the impacts of digital information interventions on agricultural development. *Global Food Security*. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100866>
- Beza, E., Reidsma, P., Poortvliet, P.M., Bijen, B.S., Kooistra, L. (2018). Exploring farmers' intentions to adopt mobile Short Message Service (SMS) for citizen science in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, pp. 295–310
- Cheng, H.-Q., Giri, B., Wu, Q.-S., Zou, Y.-N., & Kuča, K. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate drought stress in citrus by modulating root microenvironment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(9), 1217–1228. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1878497>
- Cheng, H.-Q., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2021). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alleviate Drought Stress in Trifoliolate Orange by Regulating H<sup>+</sup>-ATPase Activity and Gene Expression. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659694>
- Choruma, D., Dirwai, T., Mutenje, M., Mustafa, M., Chimonyo, V., Jacobs-Mata, I., & Mabhaudhi, T. (2024). Digitalisation in agriculture: A scoping review of technologies in practice, challenges, and opportunities for smallholder farmers in sub-saharan Africa. *Journal of Agriculture and Food Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101286>
- Dahane, A., Benameur, R., & Kechar, B. (2022). An IoT Low-Cost Smart Farming for Enhancing Irrigation Efficiency of Smallholders Farmers. *Wirel. Pers. Commun.*, 127, 3173-3210. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09915-4>
- De Resende, R.C., Gonzaga, L.M. (2019). Manual punch planter's design and development for smallholder farmers. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 13(1), pp. 79–97
- Dhillon, R., & Moncur, Q. (2023). Small-Scale Farming: A Review of Challenges and Potential Opportunities Offered by Technological Advancements. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su152115478>
- Dittmer, K., Burns, S., Shelton, S., Costa, C., & Wollenberg, E. (2025). Digital tool innovations for smallholder inclusion. *Outlook on Agriculture*, 54, 212 - 221. <https://doi.org/10.1177/00307270251331644>

- Facelli, E., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2009). Mycorrhizal symbiosis – overview and new insights into roles of arbuscular mycorrhizas in agro- and natural ecosystems. *Australasian Plant Pathology*, 38(4), 338. <https://doi.org/10.1071/AP09033>
- Finger, R. (2023). Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*. <https://doi.org/10.1093/erae/jbad021>
- Flórez-Martínez, D. H., Contreras-Pedraza, C. A., Escobar-Parra, S., & Rodríguez-Cortina, J. (2023). Key Drivers for Non-Centrifugal Sugar Cane Research, Technological Development, and Market Linkage: A Technological Roadmap Approach for Colombia. *Sugar Tech*, 25(2), 373–385. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01200-9>
- Giannakos, M., Papamitsiou, Z., Markopoulos, P., Read, J., & Hourcade, J. P. (2020). Mapping child–computer interaction research through co-word analysis. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 23–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2020.100165>
- Gumbi, N., Gumbi, L., & Twinomurinzi, H. (2023). Towards Sustainable Digital Agriculture for Smallholder Farmers: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151612530>
- Guo, X.-N., Lu, W., Liu, C.-Y., & Wu, Q.-S. (2024a). Regulation of arbuscular mycorrhizal fungi in citrus root hairs mediated by auxin efflux carrier protein PtPINs. *Scientia Horticulturae*, 337, 113574. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113574>
- He, J.-D., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2020). Mycorrhizas enhance drought tolerance of trifoliolate orange by enhancing activities and gene expression of antioxidant enzymes. *Scientia Horticulturae*, 262, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108745>
- Hilal, N., Kim, G. J., & Somerfield, C. (2011). Boron removal from saline water: A comprehensive review. *Desalination*, 273(1), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.012>
- Hu, C., Li, H., Tong, C., Zhang, D., & Lu, Y. (2024). Integrated transcriptomic and metabolomic analyses reveal the effect of mycorrhizal colonization on trifoliolate orange root hair. *Scientia Horticulturae*, 336, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113429>

- Hussain, S., Jan, M., Khalid, M. F., Haider, S. T.-A., Ali, M. A., Ahmad, S., Sabir, S., Sétamou, M., & Morillon, R. (2025). Rooting for Resilience: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Boost Citrus Tolerance to Water Scarcity in Rangpur Lime and Carrizo Citrange Rootstocks. *Horticulturae*, 11(1), 24. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010024>
- Joseph, J.E., Whitbread, A.M., Akinseye, F.M., Konte, O., Rötter, R.P. (2026). Evaluating iSAT climate-informed agro-advisories for farm decisions and system performance in Senegal's drylands. *Scientific Reports*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-44231-y>
- Joy, I., Basher, F., Sultana, N., Tahmid, M., Akthar, S., Hasan, M., & Ahmed, S. (2024). Revolutionizing Agricultural Finance: Simplifying Farmer Access to Financial Tools with an Innovative Fintech Platform. *2024 2nd World Conference on Communication & Computing (WCONF)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/wconf61366.2024.10692303>
- Khedekar, L., Dagade, R., Dahatonde, V., Dane, R., Dangat, S., Deore, P., & Dgama, N. (2024). AgriTech: Technology Driven E-Commerce Platform for Sustainable Agricultural Development. *2024 8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 1164-1168. <https://doi.org/10.1109/i-smac61858.2024.10714818>
- Kondrat, O. (2025). Features of the application of innovative tools in the management of enterprises in the agricultural sector of the economy. *Socio-economic relations in the digital society*. <https://doi.org/10.55643/ser.2.56.2025.604>
- Kudama, G., Dangia, M., Wana, H., & Tadese, B. (2021). Will digital solution transform Sub-Saharan African agriculture? *Artificial Intelligence in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.12.001>
- Liu, C.-Y., Guo, X.-N., Dai, F.-J., & Wu, Q.-S. (2024). Mycorrhizal Symbiosis Enhances P Uptake and Indole-3-Acetic Acid Accumulation to Improve Root Morphology in Different Citrus Genotypes. *Horticulturae*, 10(4), 339. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040339>
- Liu, Z., Cao, M.-A., Kuča, K., Alqahtani, M. D., Muthuramalingam, P., & Wu, Q.-S. (2024). Cloning of CAT genes in Satsuma mandarin and their expression characteristics in

response to environmental stress and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Cell Reports*, 43(5), 123. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03218-7>

Lyu, Z., Jing, Z., & Yang, X. (2025). Bridging the digital divide for sustainable agriculture: how digital adoption strengthens farmer livelihood resilience. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1628588>

Mangole, C.D., Mulungu, K., Kaghoma, C.K., Tschopp, M., Kassie, M. (2026). Smallholder farmers' willingness to pay for the farmbetter mobile app-based agricultural extension: evidence from a BDM experiment in Tanzania and Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 24(1).

Mapiye, O., Makombe, G., Molotsi, A., Dzama, K., & Mapiye, C. (2021). Information and communication technologies (ICTs): The potential for enhancing the dissemination of agricultural information and services to smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Information Development*. <https://doi.org/10.1177/02666669211064847>

Mdemu, M., Kissoly, L., Bjornlund, H., Kimaro, E., Christen, E., Van Rooyen, A., Stirzaker, R., & Ramshaw, P. (2020). The role of soil water monitoring tools and agricultural innovation platforms in improving food security and income of farmers in smallholder irrigation schemes in Tanzania. *International Journal of Water Resources Development*, 36, S148 - S170. <https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1765746>

Miine, L., Akorsu, A., Boampong, O., & Bukari, S. (2023). Drivers and intensity of adoption of digital agricultural services by smallholder farmers in Ghana. *Heliyon*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23023>

Mollel, M., Quiroz, L., Varley, C., Firestine, A., McLoughlin, M., Kafunah, J., Kharkar, S., O'Farrell, J., Ndlovu, N., Johnston, A., McKeown, P., Brychkova, G., Murray, U., Leiva, S., & Spillane, C. (2025). Digital technologies to accelerate the impact of climate smart agriculture by next-generation farmers in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1462328>

Morepje, M., Sithole, M., Msweli, N., & Agholor, A. (2024). The Influence of E-Commerce Platforms on Sustainable Agriculture Practices among Smallholder Farmers in Sub-Saharan Africa. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16156496>

- Mottaleb, K.A., Krupnik, T.J., Erenstein, O. (2016). Factors associated with small-scale agricultural machinery adoption in Bangladesh: Census findings. *Journal of Rural Studies*, 46, pp. 155–168
- Mushi, G., Di Marzo Serugendo, G., & Burgi, P. (2022). Digital Technology and Services for Sustainable Agriculture in Tanzania: A Literature Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14042415>
- Mushi, G., Mwakifwamba, A., Burgi, P., & Serugendo, G. (2024). A Farmers' Digital Information System (FDIS) for Sustainable Agriculture Among Smallholder Farmers in Tanzania. *Inf.*, 15\*, 816. <https://doi.org/10.3390/info15120816>
- Naumann, M., Schüßler, A., & Bonfante, P. (2010). The obligate endobacteria of arbuscular mycorrhizal fungi are ancient heritable components related to the Mollicutes. *The ISME Journal*, 4(7), 862–871. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.21>
- Njuguna, E., Daum, T., Birner, R., & Mburu, J. (2025). Silicon Savannah and smallholder farming: How can digitalization contribute to sustainable agricultural transformation in Africa? *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104180>
- Nwangwu, K.N., Onyenekwe, C.S., Opata, P.I., Ume, C.O., Ume, N.N.C. (2024). Can digital technology promote market participation among smallholder farmers? *International Food and Agribusiness Management Review*, 27(4), pp. 706–728
- Okello, J.J., Okello, R.M., Ofwona-Adera, E. (2009). Book Chapter: Awareness and the use of mobile phones for market linkage by smallholder farmers in Kenya. *E Agriculture and E Government for Global Policy Development Implications and Future Directions*, pp. 1–18
- Paresh Kumar Sarma, (2026). Digital Transformation of Social Media on Small-Scale Dairy Family Agribusinesses in Bangladesh: Application of Technology Acceptance Model (TAM) Theory. *Journal of the Knowledge Economy*, vol. 17(2), pages 4797-4822. <https://doi.org/10.1007/s13132-026-03178-1>
- Paudel, G.P., KC, D.B., Rahut, D.B., Justice, S.E., McDonald, A.J. (2019). Scale-appropriate mechanization impacts on productivity among smallholders: Evidence from rice systems in the mid-hills of Nepal. *Land Use Policy*, 85, pp. 104–113

- Pramesti, G. (2025). AgriTech Innovation and Food Security: Balancing Technological Disruption and Smallholder Inclusion. *Jurnal Ekonomi Teknologi dan Bisnis (JETBIS)*. <https://doi.org/10.57185/aqg24191>
- Rayhan, M., Rahman, S., Mamun, A., Saif, A., Islam, K., Alom, M., & Hafiz, N. (2024). FinTech solutions for sustainable agricultural value chains: A perspective from smallholder farmers. *Business Strategy & Development*. <https://doi.org/10.1002/bsd2.358>
- Satria, D., Maghraby, W., & Setyanti, A. (2025). Digital Agricultural Technology for Smallholder Farmers: Barriers and Opportunities in Indonesia. *SOCA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*. <https://doi.org/10.24843/soca.2024.v18.i03.p01>
- Sen, L., Chou, P., Dacuyan, F., Nyberg, Y., & Wetterlind, J. (2024). Barriers and enablers of digital extension services' adoption among smallholder farmers: the case of Cambodia, the Philippines and Vietnam. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 22. <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2368351>
- Sen, L., Phuong, L., Chou, P., Dacuyan, F., Nyberg, Y., & Wetterlind, J. (2025). The Opportunities and Barriers in Developing Interactive Digital Extension Services for Smallholder Farmers as a Pathway to Sustainable Agriculture: A Systematic Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17073007>
- Sims, B., Kienzle, J. (2017). Sustainable agricultural mechanization for smallholders: What is it and how can we implement it? *Agriculture Switzerland*, 7(6), 50
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 111(2), 1053–1070. <https://doi.org/10.1007/S11192-017-2300-7>
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2010.07.002>

- Waris, A., Kumar, A., & Sundaram, R. (2025). Smart farming solutions in India: Exploring agritech service delivery models. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development*. <https://doi.org/10.33545/26180723.2025.v8.i3b.1699>
- Wu, Q. S., Zou, Y. N., Liu, W., Ye, X. F., Zai, H. F., & Zhao, L. J. (2010). Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with mycorrhiza: changes in leaf antioxidant defense systems. *Plant, Soil and Environment*, *56*(10), 470–475. <https://doi.org/10.17221/54/2010-PSE>
- Wu, Q.-S., & Xia, R.-X. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, *163*(4), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.04.024>
- Wu, Q.-S., He, J.-D., Srivastava, A. K., Zou, Y.-N., & Kuča, K. (2019). Mycorrhizas enhance drought tolerance of citrus by altering root fatty acid compositions and their saturation levels. *Tree Physiology*, *39*(7), 1149–1158. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz039>
- Wu, Q.-S., Li, Y., Zou, Y.-N., & He, X.-H. (2015). Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels. *Mycorrhiza*, *25*(2), 121–130. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3>
- Wu, Q.-S., Srivastava, A. K., & Zou, Y.-N. (2013). AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*, *164*, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.010>
- Wu, Q.-S., Xia, R.-X., & Zou, Y.-N. (2006). Reactive oxygen metabolism in mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus (*Poncirus trifoliata*) seedlings subjected to water stress. *Journal of Plant Physiology*, *163*(11), 1101–1110. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.09.001>
- Wu, Q.-S., Xia, R.-X., & Zou, Y.-N. (2008). Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European Journal of Soil Biology*, *44*(1), 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.10.001>
- Wu, Q.-S., Zou, Y.-N., & He, X.-H. (2010). Contributions of arbuscular mycorrhizal fungi to growth, photosynthesis, root morphology and ionic balance of citrus seedlings under salt

stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32(2), 297–304. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0407-z>

Xu, F.-Q., Meng, L.-L., Lei, A.-Q., Hashem, A., Abd\_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate manganese toxicity on trifoliate orange. *Scientia Horticulturae*, 338, 113722. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113722>

Yang, C., Ji, X., Cheng, C., Liao, S., Obuobi, B., & Zhang, Y. (2024). Digital economy empowers sustainable agriculture: Implications for farmers' adoption of ecological agricultural technologies. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111723>

Yang, L., Zou, Y.-N., Tian, Z.-H., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2021). Effects of beneficial endophytic fungal inoculants on plant growth and nutrient absorption of trifoliate orange seedlings. *Scientia Horticulturae*, 277, 109815. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109815>

Yuan, Y., & Sun, Y. (2024). Practices, Challenges, and Future of Digital Transformation in Smallholder Agriculture: Insights from a Literature Review. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122193>

Yuan, Y., & Sun, Y. (2024). Practices, Challenges, and Future of Digital Transformation in Smallholder Agriculture: Insights from a Literature Review. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122193>

Zhang, F., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2020a). Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine metabolism to enhance drought tolerance of trifoliate orange. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103926. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103926>

Zhang, J., Lei, L., Xiao, W., Yang, X., Horwath, W. R., Liao, Y., Yang, H., Jian, Z., & Zeng, L. (2025). Vetch cover crops increase particulate organic carbon in citrus orchard by increasing lignin phenols. *Applied Soil Ecology*, 207, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105921>

Zhao, P., Zhang, W., Cai, W., & Liu, T. (2022). The impact of digital finance use on sustainable agricultural practices adoption among smallholder farmers: an evidence from

rural China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 39281 - 39294.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-18939-z>

Zheng, F.-L., Wang, Y.-J., Hashem, A., Abd\_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024a). Mycorrhizae with *Funneliformis mosseae* regulate the trehalose synthesis and sucrose cleavage for enhancing drought tolerance in trifoliolate orange. *Scientia Horticulturae*, 337, 113486.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113486>

Zoubi, B., Mokrini, F., Houssayni, S., Benkebboura, A., Akachoud, O., Ghoulam, C., Housseini, A. I., & Qaddoury, A. (2025). Effectiveness of the arbuscular mycorrhizal fungi *Funneliformis mossae* and *Rhizophagus irregularis* as biological control agent of the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans*. *Journal of Natural Pesticide Research*, 11, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2024.100104>



**AGROSAVIA**

Corporación colombiana de investigación agropecuaria