Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

2022

EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN

APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN DE LA AGRICULTURA PARA TRANSFORMAR LOS SISTEMAS AGROALIMENTARIOS

Esta publicación forma parte de la serie editada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura sobre **El Estado del Mundo**.

Cita requerida:
FAO. 2022. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022. Aprovechar la automatización de la agricultura para transformar los sistemas agroalimentarios.* Roma, FAO.
https://doi.org/10.4060/cb9479es

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las designaciones empleadas y la presentación del material en los mapas no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la FAO sobre el estatuto jurídico o constitucional de ningún país, territorio o zona marítima, ni sobre la delimitación de fronteras. Las líneas de trazos en los mapas representan de manera aproximada fronteras respecto de las cuales puede que no haya pleno acuerdo.

ISSN 0251-1371 (impresa)
ISSN 1564-3379 (en línea)
ISBN 978-92-5-137020-9
© FAO, 2022

Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la cita requerida: "La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en inglés será el texto autorizado".

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual www.wipo.int/amc/en/mediation/rules y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (www.fao.org/publications/es) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

FOTO DE PORTADA ©Sorapong Chaipanya/Shutterstock.com

TAILANDIA. Vista aérea de un agricultor utilizando una tableta en un campo de arrozales verdes.

ISSN 0251-1371

2022
EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN

APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN DE LA AGRICULTURA PARA TRANSFORMAR LOS SISTEMAS AGROALIMENTARIOS

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Roma, 2022

ÍNDICE

PRÓLOGO v
METODOLOGÍA ix
AGRADECIMIENTOS x
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS xii
GLOSARIO xiii
MENSAJES PRINCIPALES xvii
RESUMEN xviii

CAPÍTULO 1
LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA: EN QUÉ CONSISTE Y POR QUÉ ES IMPORTANTE 1
Mensajes principales 1
¿Cómo hemos llegado hasta aquí? 3
¿Qué es la automatización agrícola? 4
¿Por qué necesitamos aprovechar la automatización agrícola? Comprensión de los principales factores 7
Dificultades que plantea el progreso de la automatización agrícola 12
Convertir los retos en oportunidades 13
¿En qué se centra el informe? 15

CAPÍTULO 2
COMPRENDER EL PASADO Y MIRAR HACIA EL FUTURO DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA 19
Mensajes principales 19
Tendencias y factores de la mecanización motorizada en el mundo 20
La revolución digital y su potencial para transformar el uso de la mecanización motorizada y las prácticas agrícolas 26
El estado de las tecnologías de automatización digital y la robótica en la agricultura 31
Conclusiones 39

CAPÍTULO 3
ARGUMENTOS A FAVOR DE LA INVERSIÓN EN AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA 41
Mensajes principales 41
Los argumentos a favor de la mecanización motorizada confirman su considerable potencial en muchos contextos 42
Investigar los argumentos a favor de la automatización digital: enseñanzas extraídas de los estudios de casos 49
Más allá de los argumentos a favor: el papel de las inversiones, las políticas y la legislación 54
Trayectorias futuras de la automatización agrícola: consideraciones relativas a la adopción inclusiva y la sostenibilidad ambiental 55
Conclusiones 63

CAPÍTULO 4
REPERCUSIONES Y OPORTUNIDADES SOCIOECONÓMICAS DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA 67
Mensajes principales 67
Un enfoque basado en los sistemas agroalimentarios para analizar las implicaciones sociales 68
Repercusiones laborales de la automatización agrícola 71
La automatización agrícola brinda nuevas oportunidades empresariales y transformadoras que tienen implicaciones en la nutrición y los consumidores 77
Un proceso inclusivo de automatización agrícola 78
El futuro de la mano de obra agroalimentaria 82
Conclusiones 84

CAPÍTULO 5
OPCIONES DE POLÍTICAS PARA UNA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA EFICIENTE, SOSTENIBLE E INCLUSIVA **87**
Mensajes principales 87
Hacia una automatización agrícola responsable 88
Políticas generales para crear un entorno propicio 91
Políticas, legislación e inversiones orientadas a la agricultura 94
Políticas para conseguir que la automatización agrícola contribuya a sistemas agroalimentarios sostenibles y resilientes 100
Políticas para lograr que el proceso de automatización agrícola sea inclusivo y funcione para todos 102
Conclusiones 106

ANEXOS **109**

ANEXO 1
Descripción de los estudios de casos 110

ANEXO 2
Cuadros estadísticos 138

NOTAS **144**

CUADROS

1 Número de estudios de casos por tamaño del productor, nivel de automatización y sector 16
2 Selección de hitos en la automatización digital de la agricultura 32
A2.1 Utilización de tractores por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable, año más reciente disponible 138

FIGURAS

1 Ciclo de tres fases de un sistema de automatización 5
2 Evolución de la automatización agrícola 6
3 Proporción del empleo en la agricultura respecto del empleo total por grupo de ingresos (arriba) y región (abajo), 1991-2019 9
4 Tractores en uso por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable 22
5 Selección de tecnologías digitales y robótica con inteligencia artificial por sistema de producción agrícola 33
6 Preparación para ampliar la escala de tecnologías de automatización digital a lo largo del espectro 51
7 Un enfoque basado en sistemas agroalimentarios de las repercusiones de la automatización en el empleo 69
8 Esquema de las opciones en materia de políticas para aprovechar la automatización agrícola de forma responsable 89

ÍNDICE

RECUADROS

1 Superar las dificultades relacionadas con los datos para informar sobre el uso de la maquinaria agrícola 21

2 Comprender la mecanización en el África subsahariana 25

3 Instrumentos digitales para mejorar el acceso a los servicios de mecanización 27

4 Instrumentos digitales no vinculados a la mecanización: soluciones no incorporadas 29

5 Automatización digital de la producción ganadera: ejemplos de América Latina, África y Europa 34

6 Nuevas tecnologías de acuicultura: ejemplos de la India y México 36

7 Evolución del sector forestal: mecanización y automatización digital 37

8 Análisis comparativo de costos y beneficios entre la tracción mecanizada y la tracción manual o animal en la producción de trigo: datos obtenidos de Etiopía y Nepal 43

9 Aprovechar la automatización agrícola para mejorar la inocuidad de los alimentos 45

10 Mejorar la resiliencia de los pequeños productores mediante maquinaria de pequeño tamaño a motor 46

11 Plantación mecanizada en lechos elevados en Egipto para mejorar la productividad y el aprovechamiento sostenible del agua 47

12 Ahorro de tiempo, esfuerzo y dinero con sembradoras de tambor en la República Democrática Popular Lao 48

13 La evolución de los argumentos a favor de los sistemas de ordeño robotizado 50

14 La repercusión de un pulverizador digital para cultivos hortícolas en la Unión Europea: datos obtenidos de Polonia y Hungría 52

15 La COVID-19 avivó el interés en las tecnologías digitales: datos obtenidos de dos estudios de casos 53

16 Resolver la escasez de mano de obra en los campos de fresa mediante robots recolectores 57

17 Los argumentos a favor de que las mujeres adopten la mecanización motorizada: datos obtenidos de Nepal 59

18 Una idea de robots de cultivo autónomos de bajo costo 62

19 Analizar la automatización agrícola desde la perspectiva del empleo decente 72

20 Las repercusiones en la mano de obra de la cosecha mecanizada de caña de azúcar en el Brasil 75

21 La automatización y las comunidades rurales de emigrantes: el caso de California 76

22 Inclusión de personas con discapacidad 79

23 Inclusión de mujeres y jóvenes: datos objetivos procedentes de estudios de casos 80

24 Mujeres al volante: promover el empoderamiento de las mujeres mediante tractores 81

25 Cómo los diferentes tipos de apoyo público pueden potenciar la automatización agrícola 90

26 Red de banda ancha de libre acceso en Komen (Eslovenia) 92

27 Estrategias nacionales para potenciar la adopción de instrumentos digitales en la agricultura africana 94

28 Adaptación de la automatización digital a diversos contextos: datos extraídos de 27 estudios de casos 97

PRÓLOGO

En el presente informe se aborda en profundidad una realidad de la agricultura, a saber: el sector está experimentando un profundo cambio tecnológico a un ritmo cada vez más rápido. Nuevas tecnologías, inimaginables hace tan solo unos pocos años, están surgiendo con rapidez. En el ámbito de la producción ganadera, por ejemplo, las tecnologías basadas en el marcado electrónico de los animales, así como robots de ordeño y sistemas de alimentación de aves de corral, están extendiéndose cada vez más en algunos países. La orientación del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) permite automatizar la producción de cultivos, mediante el uso de guiado automático para tractores, distribuidoras de fertilizantes y pulverizadores de plaguicidas. Tecnologías aún más avanzadas están apareciendo ya en el mercado en todos los sectores. En la producción de cultivos, se están empezando a comercializar máquinas autónomas, como robots de deshierbe, mientras que vehículos aéreos no tripulados, comúnmente denominados drones, reúnen información tanto para la gestión de cultivos como para la aplicación de insumos. En la acuicultura, la adopción de tecnologías de alimentación y seguimiento automatizados es cada vez mayor. En el ámbito de la actividad forestal, la maquinaria para la corta y el transporte de madera constituye actualmente uno de los principales objetivos de las iniciativas de automatización. Muchas de las tecnologías más recientes facilitan la agricultura de precisión, una estrategia de gestión que emplea la información para optimizar la utilización de los insumos y recursos.

Los recientes adelantos tecnológicos pueden resultar asombrosos y sorprendentes e inspirar el deseo de aprender más. Sin embargo, es importante recordar que el cambio tecnológico no es un fenómeno nuevo y, lo que es crucial, no todos los actores de los sistemas agroalimentarios tienen acceso a él. La FAO viene estudiando este tema desde hace decenios. Lo que vemos hoy en día no es más que un punto de consolidación —por el momento— de un largo proceso de cambio tecnológico en la agricultura que se ha ido acelerando a lo largo de los dos últimos siglos.

Este proceso ha permitido aumentar la productividad, reducir el trabajo pesado en las tareas agrícolas, liberar mano de obra para otras actividades y, en última instancia, mejorar los medios de vida y el bienestar humano. La maquinaria y el equipo han mejorado y a veces han asumido las tres etapas clave que conlleva toda actividad agrícola, a saber, el diagnóstico, la toma de decisiones y la ejecución. La evolución histórica revela cinco categorías de tecnologías: la introducción de herramientas manuales; el uso de la tracción animal; la mecanización motorizada desde la década de 1910; la introducción de equipo digital desde la década de 1980; y, más recientemente, la introducción de la robótica. La automatización a la que se hace referencia en el presente informe comienza realmente con la mecanización motorizada, que ha automatizado considerablemente el componente relativo a la ejecución de las actividades agrícolas. Las tecnologías digitales más recientes y la robótica permiten la automatización gradual también del diagnóstico y la toma de decisiones. Como se señala en el presente informe, esta evolución está en curso, pero no todos los productores agrícolas en todos los países se encuentran en la misma fase.

Es cierto que existe una preocupación generalizada por las posibles repercusiones socioeconómicas negativas del cambio tecnológico que permite ahorrar mano de obra, en particular el desplazamiento de puestos de trabajo y el consiguiente desempleo. Estos temores se remontan al menos a comienzos del siglo XIX. Sin embargo, si miramos al pasado, los temores de que la automatización que aumenta la productividad de la mano de obra dejará forzosamente a las personas sin trabajo de manera masiva simplemente no se ven corroborados por la realidad histórica. Esto se debe a que la automatización de la agricultura forma parte del proceso de transformación estructural de las sociedades en virtud del cual el aumento de la productividad de la mano de obra agrícola libera gradualmente trabajadores agrícolas, permitiéndoles incorporarse a actividades

rentables en otros sectores como la industria y los servicios. Durante esta transformación, la proporción de la población empleada en la agricultura lógicamente disminuye, mientras que se crean puestos de trabajo en otros sectores. Esto viene por lo general acompañado de cambios dentro de los sistemas agroalimentarios, en los que los sectores de las fases anteriores y posteriores evolucionan y se crean nuevos puestos de trabajo y nuevas oportunidades empresariales. Por este motivo, es fundamental reconocer que la agricultura constituye una parte esencial de los sistemas agroalimentarios más amplios.

En el informe se ponen de manifiesto los posibles beneficios de la automatización agrícola, que son numerosos y pueden contribuir a la transformación de los sistemas agroalimentarios, haciéndolos más eficientes, productivos, resilientes, sostenibles e inclusivos. La automatización puede aumentar la productividad de la mano de obra agrícola y la rentabilidad de la agricultura. Puede mejorar las condiciones laborales de los trabajadores agrícolas. Puede generar nuevas oportunidades de emprendimiento en las zonas rurales, que podrían resultar especialmente atractivas para la juventud rural. Puede ayudar a reducir las pérdidas de alimentos y mejorar la calidad de los productos y su inocuidad. Puede también aportar beneficios en lo que se refiere a la sostenibilidad ambiental y la adaptación al cambio climático. Soluciones recientes que abarcan la agricultura de precisión y la introducción de equipo en pequeña escala, que a menudo es más adecuado para las condiciones locales que la mecanización motorizada asociada al uso de maquinaria pesada, pueden mejorar la sostenibilidad ambiental y la resiliencia al cambio climático y otras perturbaciones. Gracias a estos numerosos beneficios, la automatización agrícola también puede contribuir a alcanzar varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

No obstante, en el presente informe también se reconocen los riesgos y problemas relacionados con la automatización agrícola. Como ocurre con cualquier cambio tecnológico, la automatización de la agricultura conlleva perturbaciones de los sistemas agroalimentarios. Si la automatización es rápida y no se ajusta a las condiciones socioeconómicas y del mercado laboral locales, puede producirse efectivamente un desplazamiento de mano de obra —el resultado común que ha de evitarse—. Además, la automatización puede aumentar la demanda de trabajadores altamente cualificados y, al mismo tiempo, reducir la demanda de trabajadores no cualificados. Si los grandes productores agrícolas prósperos tienen más facilidad de acceso a la automatización que los productores más pequeños y pobres, se corre el riesgo de que la automatización agrave las desigualdades, algo que debe evitarse a toda costa. Si la automatización, sobre todo la mecanización basada en maquinaria pesada, no se gestiona debidamente y no se adapta bien a las condiciones locales, puede poner en peligro la sostenibilidad agrícola. Estos riesgos son reales y se reconocen y analizan en el presente informe.

Sin embargo, como también se indica en el informe, decir no a la automatización no es el camino a seguir. La FAO cree realmente que sin avances tecnológicos y un aumento de la productividad, no existe ninguna posibilidad de liberar a cientos de millones de personas de la pobreza, el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición. Rechazar la automatización puede suponer condenar a los trabajadores agrícolas a un futuro de productividad baja y remuneración escasa por su trabajo perennes. Lo que importa es la manera en la que el proceso de automatización se lleva a cabo en la práctica, no si este se produce o no. Debemos velar por que la automatización se realice de modo que sea inclusiva y promueva la sostenibilidad.

A lo largo de todo este informe, la FAO transmite el concepto de un cambio tecnológico responsable para que la automatización agrícola sea un éxito. ¿Qué entraña esto?

En primer lugar, la automatización debe formar parte de un proceso de transformación agrícola que

discurra paralelamente a cambios de mayor alcance en la sociedad y los sistemas agroalimentarios, los facilite y se vea facilitada por estos. Para ello, es esencial que la adopción de la automatización responda a incentivos reales. Así pues, las tecnologías que ahorran mano de obra pueden impulsar el proceso de transformación agrícola si responden a una creciente escasez de mano de obra y un aumento de los salarios rurales. Por otro lado, si se crean de forma artificial incentivos para la adopción de la automatización o de tecnologías de automatización específicas, por ejemplo, a través de subvenciones públicas —particularmente en contextos en los que la mano de obra es abundante—, la introducción de la automatización puede ser muy perjudicial y tener repercusiones socioeconómicas y en el mercado laboral negativas. Sin embargo, también es importante que las políticas públicas no obstaculicen la automatización, ya que esto podría condenar a los productores y trabajadores agrícolas a un futuro de productividad y competitividad perennemente bajas. En el presente informe se sostiene que la función que corresponde a los gobiernos es crear un entorno propicio que facilite la adopción de soluciones de automatización convenientes, en lugar de incentivar directamente soluciones específicas en contextos en los que podrían resultar inadecuadas o impedir de cualquier modo la adopción de la automatización.

Para mantener la coherencia con los ODS, la automatización ha de ser inclusiva. Debe ofrecer oportunidades para todos, desde los pequeños productores hasta las grandes explotaciones comerciales, y a grupos marginados como mujeres, jóvenes y personas con discapacidad. Deben superarse los obstáculos que dificultan la adopción de la automatización, sobre todo en el caso de las mujeres. Poner soluciones técnicas adecuadas a disposición de todas las categorías de productores supone hacer que las tecnologías sean neutrales respecto de la escala, esto es, hacerlas aptas para los productores de todas las escalas, o accesibles a todos a través de mecanismos institucionales tales como servicios compartidos. Potenciar las competencias digitales mediante educación y capacitación es asimismo esencial para facilitar la introducción y evitar brechas digitales basadas en la desigualdad de conocimientos y habilidades.

Para mejorar la sostenibilidad y ser realmente inclusivas y transformadoras, las soluciones de automatización deben adaptarse al contexto local, no solo en lo que respecta a las características de los productores, sino también a las condiciones biofísicas, topográficas, climáticas y socioeconómicas locales. Este informe es realista y no ofrece una única solución válida para todos los casos. La solución tecnológica más avanzada no es necesariamente la más apropiada en todas partes y para todos. Como muestran las pruebas presentadas, en algunas situaciones, tecnologías sencillas como maquinaria pequeña e incluso equipo de mano pueden generar importantes beneficios para los pequeños productores y hacer posible la producción en terrenos accidentados. Incluso existen situaciones en las que los productores podrían ser capaces de pasar directamente a soluciones tecnológicas más avanzadas. Resulta esencial que los propios productores agrícolas elijan las tecnologías más adecuadas a sus necesidades y que los gobiernos, por su parte, creen el entorno propicio que les permita hacerlo.

Por último, en el presente informe también se sostiene que la automatización agrícola debe contribuir a una agricultura más sostenible y resiliente. En el pasado, la utilización de maquinaria pesada a gran escala ha tenido a menudo efectos negativos en la sostenibilidad ambiental. Para hacer frente a este problema, es necesario adaptar la mecanización a maquinaria más pequeña y más ligera. Al mismo tiempo, la agricultura digital y la robótica que facilitan la agricultura de precisión ofrecen soluciones más eficientes en cuanto al uso de los recursos y más sostenibles desde un punto de vista ambiental. La investigación técnica y agronómica aplicada puede ayudar a encontrar soluciones que pueden conducir a nuevos avances hacia la sostenibilidad ambiental.

PRÓLOGO

En el presente informe se analizan en detalle estas cuestiones y se presenta un examen objetivo y en profundidad de la automatización agrícola, se disipan los mitos infundados que la rodean y se sugieren formas de avanzar con vistas a la adopción de la automatización agrícola en diferentes contextos nacionales y locales. Se señalan esferas en las que sería fundamental realizar intervenciones en materia de políticas e inversiones para conseguir que la automatización agrícola contribuya al desarrollo inclusivo y sostenible.

La FAO cree firme y estratégicamente en la tecnología, la innovación y los datos, apoyados por la gobernanza, el capital humano y las instituciones adecuados, como aceleradores transversales e intersectoriales clave en todas sus intervenciones programáticas para acelerar las repercusiones y, al mismo tiempo, reducir al mínimo las desventajas. Sin duda, estos aceleradores catalizarán la transformación agrícola en todos los contextos. Tengo la esperanza de que este informe de la FAO pueda contribuir de manera constructiva al debate sobre políticas en esta esfera de gran relevancia para la consecución de los ODS.

Qu Dongyu
Director General de la FAO

METODOLOGÍA

La preparación de *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022* comenzó con la formación de un grupo asesor en representación de todas las unidades técnicas pertinentes de la FAO, el cual, junto con un grupo de expertos externos, prestó asistencia al equipo de investigación y redacción. La preparación del informe se basó además en seis documentos de antecedentes y análisis empíricos originales preparados por la FAO y expertos externos. El grupo asesor se reunió de forma virtual para discutir el esquema del informe el 24 de enero de 2022 y comentó los primeros borradores de los capítulos 1 y 2 en marzo de 2022. Los borradores de todos los capítulos se presentaron al grupo asesor y al grupo de expertos externos antes de un taller celebrado de forma virtual del 31 de marzo al 6 de abril de 2022 y presidido por el Director Adjunto de la División de Economía Agroalimentaria de la FAO. Con las orientaciones del taller y de una reunión sucesiva del grupo asesor, el informe se revisó y presentó al equipo directivo de la línea de trabajo de Desarrollo económico y social de la FAO. Con el fin de recabar observaciones, el borrador revisado se distribuyó a otras líneas de trabajo de la Organización y a las oficinas regionales de la FAO para África, América Latina y el Caribe, Asia y el Pacífico, el Cercano Oriente y África del Norte, y Europa y Asia Central. Las observaciones se incorporaron en el proyecto final, que fue revisado por el Director Adjunto de la División de Economía Agroalimentaria, el Economista Jefe de la FAO y la Oficina del Director General.

AGRADECIMIENTOS

El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022 ha sido preparado por un equipo multidisciplinario de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) bajo la dirección de Marco V. Sánchez Cantillo, Director Adjunto de la División de Economía Agroalimentaria, y de Andrea Cattaneo, Economista superior y coordinador de la publicación. Máximo Torero Cullen, Economista Jefe, proporcionó orientación general junto con el equipo directivo de la línea de trabajo sobre Desarrollo económico y social.

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN Y REDACCIÓN
Theresa McMenomy, Fergus Mulligan (coordinador consultor), Ahmad Sadiddin, Jakob Skøt y Sara Vaz.

DOCUMENTOS DE ANTECEDENTES
Christina Cappello (Universidad y Centro de Investigación de Wageningen [WUR]), Tomaso Ceccarelli (WUR), Aneesh Chauhan (WUR), Diane Charlton (Universidad Estatal de Montana), Thoman Daum (Universidad de Hohenheim), Alexandra Hill (Universidad Estatal de Colorado), Sander Janssen (WUR), Inder Kumar (WUR), James Lowenberg-DeBoer (Universidad Harper Adams), Mariette McCampbell (WUR), Giacomo Rambaldi (WUR), David Rose (Universidad de Reading) y Edward Taylor (Universidad de California).

OTRAS CONTRIBUCIONES EXTERNAS
Rabe Yahaya (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT]).

OTRAS APORTACIONES DE LA FAO
Veronica Boero, Alban Lika, Madhusudan Singh Basnyat, Atef Swelam y Michele Vollaro.

GRUPO ASESOR DE LA FAO
Maysoon Alzoubi, Huda Alsahi, Marwan Benali, Henry Burgsteden, Aziz Elbehri, Mayling Flores Rojas, Ken Lohento, Magnus Grylle, Karim Houmy, Dejan Jakov Ijevic, Josef Kienzle, Lan Li, Preetmoninder Lidder, Joseph Mpagalile, Ahmad Mukhtar, Eva Galvez Nogales, Santiago Santos Valle, Beate Scherf, Josef Schmidhuber y Xinhua Yuan.

GRUPO DE EXPERTOS EXTERNOS
Imran Ali (Universidad de Central Queensland), Christina Cappello (WUR), Tomaso Ceccarelli (WUR), Aneesh Chauhan (WUR), Diane Charlton (Universidad Estatal de Montana), Thomas Daum (Universidad de Hohenheim), Kit Franklin (Universidad Harper Adams), Alexandra Hill (Universidad Estatal de Colorado), Ivo Hostens (Asociación Europea de la Industria de Maquinaria Agrícola), Sander Janssen (WUR), Inder Kumar (WUR), James Lowenberg-DeBoer (Universidad Harper Adams), Mariette McCampbell (WUR), Giacomo Rambaldi (WUR), David Rose (Universidad de Reading), Salah Sukkarieh (Universidad de Sydney) y Edward Taylor (Universidad de California).

ANEXOS
Ahmad Sadiddin y Sara Vaz prepararon los anexos con la asistencia del equipo de WUR: Christina Cappello, Tomaso Ceccarelli, Aneesh Chauhan, Sander Janssen, Inder Kumar, Mariette McCampbell y Giacomo Rambaldi.

APOYO ADMINISTRATIVO
Liliana Maldonado prestó apoyo administrativo.

La Subdivisión Lingüística (CSGL) de la División de Servicios a los Órganos Rectores (CSG) de la FAO realizó las traducciones.

La Subdivisión de Publicaciones (OCCP) de la Oficina de Comunicación (OCC) de la FAO proporcionó apoyo editorial y se encargó del diseño y la maquetación, así como de la coordinación de la producción, en los seis idiomas oficiales.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AD	apoyo a la toma de decisiones
COVID-19	enfermedad por coronavirus
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FIDA	Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola
FMIS	sistema de gestión de la información sobre explotaciones agropecuarias
GEI	gases de efecto invernadero
GIZ	Sociedad Alemana de Cooperación Internacional
GNSS	sistema mundial de navegación por satélite
GPS	sistema de posicionamiento mundial
ha	hectárea
I+D	investigación y desarrollo
IA	inteligencia artificial
IdC	internet de las cosas
IVR	respuesta vocal interactiva
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OIT	Organización Internacional del Trabajo
OMS	Organización Mundial de la Salud
PMA	Programa Mundial de Alimentos
RuLIS	Sistema de información sobre medios de vida rurales
RVO	Organismo de Fomento Empresarial de los Países Bajos
SAT	sistema de aeronaves no tripuladas
SIG	sistema de información geográfica
SMS	servicio de mensajes cortos
TD	teledetección
TDV	tecnología de dosis variable
TIC	tecnologías de la información y la comunicación
USD	dólar de los Estados Unidos de América
USSD	servicio suplementario de datos no estructurados
VA	visión artificial
ZLTO	Organización de Agricultura y Horticultura del Sur

GLOSARIO

Agricultura de conservación (también denominada labranza de conservación). Un sistema de cultivo que promueve la menor alteración posible del suelo (cultivo con escasa labranza o sin labranza), el mantenimiento de cobertura permanente del suelo y la diversificación de las especies vegetales. Potencia la biodiversidad y los procesos biológicos naturales por encima y por debajo de la superficie del suelo, lo que contribuye a una mayor eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, así como a la mejora y la sostenibilidad de la producción de cultivos[10].

Agricultura de precisión. Una estrategia de gestión basada en reunir, procesar y analizar datos temporales, espaciales e individuales y combinarlos con otra información a fin de gestionar con precisión las variaciones en el campo y apoyar las decisiones de gestión y la acción precisa de las máquinas con objeto de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola[11].

Agricultura protegida. La producción de hortalizas de alto valor y otros cultivos hortícolas en invernaderos y granjas verticales. Permite a los agricultores producir cultivos comerciales en parcelas pequeñas en zonas marginales y con escasez de agua, donde los cultivos tradicionales pueden no ser viables. También se denomina cultivo protegido o producción de cultivos protegidos[9].

Agricultura vertical. Cultivo en interiores con un ambiente totalmente controlado, utilizado para cultivar en vertical durante todo el año[9].

Automatización agrícola. El uso de maquinaria y equipo en las actividades agrícolas para mejorar el diagnóstico, la toma de decisiones o la ejecución, reduciendo el trabajo agrícola pesado o mejorando la puntualidad, y posiblemente la precisión, de las actividades agrícolas. La automatización agrícola incluye tecnologías para la agricultura de precisión. Algunos ejemplos de la maquinaria y el equipo utilizados en la automatización de la agricultura son:

- tractores que arrastran, empujan o ponen en marcha una variedad de aperos, equipo y herramientas que realizan actividades agrícolas (es decir, automatización de la función de ejecución);
- sensores, máquinas, drones y satélites, dispositivos como teléfonos inteligentes y tabletas o *software* (por ejemplo, aplicaciones de asesoramiento y de gestión de explotaciones agrícolas en línea) y plataformas, para monitorear los animales, el suelo, el agua y las plantas con el fin de ayudar a los seres humanos en la toma de decisiones sobre las tareas agrícolas[1] (es decir, automatización de la función de diagnóstico), y
- opciones más avanzadas, como robots deshierbadores que pulverizan herbicidas con precisión únicamente donde se necesita y con la dosis precisa, o drones para monitorear las condiciones a distancia y aplicar fertilizantes, plaguicidas y otros tratamientos desde el aire[2, 3] (es decir, automatización de las tres funciones: diagnóstico, toma de decisiones y ejecución).

Equipo automatizado. Sistemas en los que algunas funciones (parcialmente automatizados) o todas las funciones (completamente automatizados), una actividad o un comportamiento definidos de una máquina o un sistema de máquinas, se han automatizado para que funcionen sin intervención humana[4].

Automatización digital de la agricultura. El refuerzo de procesos automatizados en la maquinaria y el equipo agrícolas (por ejemplo, tractores y sus aperos, sistemas de alimentación y ordeñadoras) mediante la adición de instrumentos digitales que aumentan su eficiencia y precisión como resultado del acceso a datos y servicios digitales a través de sistemas de administración de explotaciones agropecuarias, plataformas y redes inteligentes interoperables.

Cerca virtual. Tecnología consistente en equipar a los animales con receptores-emisores de un sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) para determinar su ubicación en la que se utilizan alertas sonoras, descargas eléctricas u otros estímulos para mantener a los animales dentro de límites geolocalizados. Puede eliminar la

necesidad de cercas físicas, y el GNSS ayuda a los productores a localizar a los animales que pastan a campo abierto en pastizales de gran extensión[5].

Explotación agrícola. Cualquier unidad de producción agrícola de gestión integrada que produce cultivos, ganado, productos agroforestales o productos acuícolas.

Ganadería de precisión. Una estrategia de gestión del ganado basada en datos para monitorear y controlar la productividad, el medio ambiente, la salud y el bienestar de un animal o un grupo de animales de forma continua y automatizada y en tiempo real. Se centra en mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción ganadera[5].

Honorarios por servicio. En el contexto de las máquinas agrícolas, un acuerdo comercial por el que el agricultor paga a un proveedor por los servicios de una máquina por unidad (por ejemplo, por hectárea, hora, animal o tonelada cosechada), en lugar de ser propietario de la máquina[5].

Inteligencia artificial (IA). Sistemas informáticos que utilizan algoritmos para analizar su entorno y realizar acciones, con cierto grado de autonomía, para alcanzar objetivos específicos. La IA puede basarse exclusivamente en programas informáticos y actuar en el mundo virtual (por ejemplo, asistentes de voz, *software* de análisis de imágenes, motores de búsqueda, sistemas de reconocimiento de voz y de rostros), o bien estar integrada en dispositivos físicos (por ejemplo, robots avanzados, automóviles autónomos, drones o aplicaciones del IdC)[5].

> **Aprendizaje automático.** Un tipo de IA y un método de análisis de datos que utiliza algoritmos informáticos para automatizar la elaboración de modelos analíticos. Se basa en la detección de patrones en los datos para mejorar el rendimiento de las máquinas al predecir con mayor precisión los resultados sin instrucciones humanas explícitas.

Internet de las cosas (IdC). Un sistema en el que los dispositivos —incluidos teléfonos móviles, sensores, drones, máquinas y satélites— están conectados a Internet[9].

Interoperabilidad. La capacidad de las máquinas y el equipo para crear, intercambiar y consumir datos debido a la existencia de expectativas claras y compartidas sobre el contenido, los contextos y el significado de esos datos[9].

Macrodatos. Conjuntos de datos grandes, diversos y complejos generados a partir de instrumentos, sensores, transacciones financieras, redes sociales y otros medios digitales que suelen superar la capacidad de almacenamiento y la potencia de procesamiento de los ordenadores personales y el *software* básico de análisis.

Marcado electrónico. El uso de un microchip o receptor-emisor electrónico integrado en una etiqueta, bolo o implante para identificar a un animal de granja individual[5].

Mecanización agrícola motorizada. La aplicación de todo tipo de motores mecánicos, independientemente de la fuente de energía, a las actividades relacionadas con la agricultura[7].

Mecanización agrícola. El uso de tecnologías de todos los niveles, desde herramientas manuales simples y básicas hasta equipo y maquinaria más sofisticados a motor, para ejecutar actividades agrícolas[6]. Las fuentes de energía en la mecanización agrícola son de tres tipos: tecnología de herramientas manuales (herramientas y aperos que dependen del músculo humano como principal fuente de energía); tecnología de animales de tiro (máquinas, aperos y equipo movidos por animales), y tecnología motorizada (mecanización impulsada por motores)[7].

Modelo de empresa a cliente. Relaciones y ventas de productos y servicios directamente entre una empresa y los clientes que son los usuarios finales de sus productos o servicios[9].

Modelo de empresa a empresa. Relaciones y ventas entre empresas, más que entre una empresa y clientes individuales[9].

Productores agrícolas. Hogares que explotan empresas agrícolas dedicadas a la producción de cultivos, la producción ganadera, la pesca, la acuicultura, el pastoreo o la actividad forestal.

Los **pequeños productores (agrícolas)** son aquellos que explotan cualquiera de las empresas agrícolas definidas anteriormente, pero que operan con mayores restricciones debido al acceso limitado a los mercados y a recursos como la tierra y el agua, la información, la tecnología, el capital, los activos y las instituciones[8].

Robot. Máquina capaz de funcionar de forma autónoma sin intervención humana directa[12]. Puede ser estacionaria (por ejemplo, un robot de ordeño) o móvil (por ejemplo, para la conducción automática). El término suele usarse principalmente en los medios de comunicación y entre el público en general, y a menudo se atribuyen a los robots características humanas. En los debates más técnicos, se prefieren términos como máquina autónoma o equipo autónomo[13].

Robot andador. Una máquina autónoma móvil que utiliza extremidades articuladas en lugar de ruedas para desplazarse[5].

Robot de ordeño. Toda ordeñadora que automatiza el ordeño de los animales lecheros, especialmente de las vacas lecheras, sin necesidad de mano de obra. También se denominan sistemas de ordeño automático.

Robots de enjambre. Múltiples máquinas móviles autónomas, relativamente pequeñas, que realizan el trabajo que hace una máquina grande en la mecanización convencional.

Robótica. Rama interdisciplinaria de la informática y la ingeniería que abarca el diseño, la construcción, el funcionamiento y la utilización de robots. Integra muchos campos, como la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica, la ingeniería de la información, la mecatrónica, la electrónica, la bioingeniería, la ingeniería informática, la ingeniería de control, la ingeniería de *software* y las matemáticas.

Servicio suplementario de datos no estructurados (USSD). Un servicio de mensajería que es más interactivo que el servicio de mensajes cortos (SMS). Se caracteriza por el uso de códigos que empiezan con * y terminan con # (por ejemplo, *845#). Un mensaje del USSD tiene 182 caracteres como máximo y se utiliza para acceder a información sobre agricultura, salud, noticias, el tiempo, etcétera[14].

Sistema de aeronaves no tripuladas (SAT). Un sistema grande que incluye aeronaves (drones) con sensores montados, una estación de control en tierra operada por el piloto y el *software* utilizado para analizar los datos recogidos por los sensores[9].

Sistema de asistencia al operador. Un sistema que ayuda a los operadores humanos de máquinas agrícolas. Normalmente, utiliza datos de sensores de varias fuentes en la máquina para ayudar al operador a tomar decisiones; puede ajustar automáticamente la configuración de la máquina para optimizar las prioridades del operador (por ejemplo, la eficiencia del combustible, la velocidad del trabajo realizado, la calidad del producto); se introdujo por primera vez en las cosechadorastrilladoras[5].

Sistema mundial de navegación por satélite (GNSS). Cualquier sistema que utilice señales de satélite para proporcionar información de localización. Algunos ejemplos son el sistema de posicionamiento global (GPS) de los Estados Unidos de América, el sistema europeo Galileo, el GLONASS de la Federación de Rusia y el sistema BeiDou de China[5].

Guiado automático. Una tecnología facilitada por el GNSS que permite dirigir y posicionar en el campo de forma automatizada máquinas agrícolas autopropulsadas (por ejemplo, tractores, cosechadoras-trilladoras, cosechadoras de forraje, pulverizadoras). Con el guiado automático más avanzado, el ordenador realiza casi toda la dirección en el campo, incluido el giro al final de una hilera. La tecnología de guiado automático suele requerir la presencia de un operador humano en el asiento de la

máquina para que tome el control en caso de que se produzca un fallo de funcionamiento u otro problema. Es un buen ejemplo de una tecnología de agricultura de precisión[5].

Sistema de posicionamiento global (GPS). GNSS de los Estados Unidos de América. Dado que fue el primer GNSS disponible para uso civil, a veces se utiliza el término "GPS" como término genérico para designar el GNSS[5].

Sobre la marcha. En el contexto de las máquinas agrícolas, situación en la que el funcionamiento de la máquina se ajusta mientras se desplaza por un campo basándose en un algoritmo que utiliza datos de sensores sin intervención humana directa[5].

Soluciones digitales no incorporadas o incorporadas. Las soluciones digitales no incorporadas (en la maquinaria) son principalmente soluciones basadas en *software* que no dependen del uso de maquinaria agrícola, sino que requieren recursos físicos limitados, generalmente un teléfono inteligente o una tableta, o instrumentos informáticos como aplicaciones de asesoramiento, *software* de administración de explotaciones agropecuarias y plataformas en línea.
Pueden incluir la teledetección o sistemas de aeronaves no tripuladas, aunque limitados a datos para apoyar la toma de decisiones y la exploración. Cuando los instrumentos digitales se instalan en la maquinaria y el equipo agrícolas, se dice que están "incorporados" y permiten que la maquinaria interactúe con el entorno a través de la acción directa (ejecución), en lugar de limitarse a la observación y el apoyo a la toma de decisiones[9].

Tecnología de dosis variable (TDV). Tecnología basada en una combinación de equipo y programas informáticos para variar la aplicación de fertilizantes, plaguicidas, semillas y otros insumos de cultivo en los campos con miras a optimizar el rendimiento en función de las necesidades de los cultivos, de modo que se obtengan los mayores rendimientos posibles con la menor cantidad posible de insumos[5].

Controladores de secciones de pluma de pulverizadora. Un enfoque de TDV facilitada mediante el GNSS con la finalidad de controlar partes de la pluma de una pulverizadora basándose en un mapa de prescripción o en datos de sensores. La anchura de la sección puede variar desde varios metros hasta una sola boquilla. La tecnología actual permite abrir, cerrar y accionar las boquillas por impulsos a diferentes velocidades.

Corte automático de hileras de siembra. Un enfoque de TDV facilitada mediante el GNSS con la finalidad de controlar unidades individuales de sembradoras en línea, basándose en un mapa de prescripción o en datos de sensores. A menudo se utiliza para evitar sembrar en zonas no destinadas al cultivo o la doble siembra en las hileras finales.

TDV basada en mapas. Una TDV basada en un mapa que documenta información espacial sobre las condiciones de puntos específicos del campo. Un analista humano prepara con antelación en una actividad separada este mapa de información espacial que se utilizará para guiar la TDV.

TDV basada en sensores. Una TDV que se basa en la lectura de sensores recogida sobre la marcha en el campo, por lo que la información que guía la TDV se recoge automáticamente (a diferencia de una TDV basada en mapas). Normalmente, el sensor está situado en la parte delantera del aplicador, el ordenador que utiliza un algoritmo para variar las dosis está colocado en la máquina y el equipo de aplicación está en la parte trasera de la máquina.

Teledetección. Proceso de recopilación de información sobre objetos en la Tierra a distancia, mediante el uso de aeronaves, satélites u otras plataformas dotadas de sensores[9].

Vehículo aéreo no tripulado o **dron.** Una máquina autónoma que vuela. Se puede guiar por control remoto o mediante un dispositivo controlado por *software*. En la agricultura, se utiliza a menudo para recoger imágenes aéreas o para aplicar fertilizantes, semillas, plaguicidas u otros insumos para los cultivos[5, 9].

MENSAJES PRINCIPALES

1 La automatización agrícola puede desempeñar una importante función con miras a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 1 (Fin de la pobreza) y el ODS 2 (Hambre cero) y los relacionados con la sostenibilidad ambiental y el cambio climático, mediante el fomento de la resiliencia, el aumento de la productividad y la eficiencia en el uso de los recursos, y la mejora de la calidad e inocuidad de los alimentos.

2 La automatización agrícola puede agravar las desigualdades si sigue siendo inaccesible para los pequeños productores y otros grupos marginados, como los jóvenes y las mujeres. Algunas tecnologías, como la maquinaria motorizada pesada, también pueden ocasionar un impacto ambiental negativo si contribuyen, por ejemplo, al monocultivo y la erosión del suelo.

3 Antes de la revolución digital, la mecanización motorizada (por ejemplo, tractores) fue clave para la transformación agrícola en todo el mundo; sin embargo, se han producido grandes disparidades entre los países, y dentro de ellos, en cuanto a su introducción, que ha sido especialmente limitada en la mayor parte del África subsahariana.

4 Si se ajusta a las necesidades locales y se complementa con instrumentos digitales, la mecanización motorizada sigue ofreciendo posibilidades de mejorar la productividad agrícola, conduciendo así a la reducción de la pobreza y la mejora de la seguridad alimentaria, con beneficios indirectos positivos para la economía en su conjunto.

5 El uso de tecnologías de automatización digital está aumentando, aunque principalmente en los países de ingresos altos. A menudo, los argumentos a favor de su uso no están aún maduros: algunas tecnologías se encuentran todavía en la etapa de los prototipos mientras que, en el caso de otras, las limitaciones de la infraestructura rural de apoyo, como la conectividad y la electricidad, obstaculizan su difusión, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos.

6 Resulta fundamental invertir en infraestructura de apoyo y mejorar el acceso a los servicios rurales (por ejemplo, financiación, seguros, educación) a fin de garantizar el acceso a estas tecnologías, en particular a los grupos marginados, como los pequeños productores agrícolas y las mujeres.

7 Las tecnologías de automatización digital ofrecen un gran potencial para lograr mayor eficiencia, productividad, sostenibilidad y resiliencia. No obstante, se requieren inversiones inclusivas, que atiendan a los productores, fabricantes y proveedores de servicios, con especial atención a las mujeres y los jóvenes, a fin de seguir desarrollando las tecnologías y adaptarlas a las necesidades de los usuarios finales.

8 Las repercusiones de la automatización agrícola en el empleo varían en función del contexto. En situaciones de aumento de los salarios y escasez de mano de obra, la automatización puede beneficiar tanto a los empleadores como a los trabajadores del sector agrícola y de los sistemas agroalimentarios más amplios, creando oportunidades para los trabajadores jóvenes cualificados.

9 En los casos en que abunda la mano de obra rural y los salarios son bajos, la automatización agrícola puede conducir al desempleo. Esto puede ocurrir si la automatización se abarata artificialmente mediante subsidios o si adelantos tecnológicos repentinos ocasionan una rápida disminución de los costos de la automatización.

10 En los contextos en que abunda la mano de obra, los encargados de formular las políticas deberían evitar subvencionar la automatización y centrarse más bien en crear un entorno propicio para su adopción —especialmente por los pequeños productores agrícolas, las mujeres y los jóvenes—, ofreciendo al mismo tiempo protección social a los trabajadores menos cualificados, que es más probable que pierdan sus empleos durante la transición.

11 La creación de un entorno propicio exige medidas múltiples y coherentes, que incluyen legislación y reglamentos, infraestructura, arreglos institucionales, educación y capacitación, investigación y desarrollo y apoyo a los procesos de innovación del sector privado.

12 Las inversiones y otras medidas en materia de políticas destinadas a promover la automatización responsable de la agricultura deberían basarse en las condiciones específicas de cada contexto, como la situación de la conectividad, las dificultades relacionadas con los conocimientos y las competencias, la idoneidad de la infraestructura y la desigualdad en cuanto al acceso.

RESUMEN

A lo largo de la historia, el cambio tecnológico —en los sistemas agroalimentarios y en otros ámbitos— ha permitido mejorar la productividad, los ingresos y el bienestar humano. Hoy en día, las soluciones tecnológicas son indispensables para alimentar a una población en continuo crecimiento frente a la limitación de las tierras agrícolas, el uso insostenible de los recursos naturales y el aumento de las perturbaciones y tensiones, incluido el cambio climático. Estas soluciones son necesarias para hacer todos los sectores de la agricultura —producción de cultivos y ganadería, acuicultura, pesca y actividad forestal— más productivos y sostenibles, así como para incrementar los niveles de productividad de los sistemas agroalimentarios.

El cambio tecnológico ha reducido la necesidad de trabajo manual en la agricultura. Este proceso de aumento de la productividad agrícola y de reasignación de la mano de obra a otros sectores distintos de la agricultura suele denominarse transformación agrícola. Va acompañado de inversiones en sistemas agroalimentarios y otros tipos de infraestructura física y del mercado. La automatización agrícola puede ser un motor de transformación y crear nuevas oportunidades. En este sentido, la mecanización motorizada ha permitido automatizar la ejecución de las actividades agrícolas, mientras que, más recientemente, las tecnologías digitales han creado nuevas oportunidades para automatizar las decisiones que preceden a la ejecución de las actividades físicas.

Los temores habituales de que la automatización conduce a un aumento del desempleo, aunque comprensibles, son cuestionables y, en general, no son corroborados por la realidad histórica. En conjunto, la automatización alivia la escasez de mano de obra y puede hacer la producción agrícola más resiliente y productiva, mejorar la calidad de los productos, aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, promover el empleo decente y mejorar la sostenibilidad ambiental. Las repercusiones socioeconómicas negativas de la automatización agrícola, como el aumento del desempleo, suelen producirse cuando la automatización no se adapta a las necesidades locales específicas. Los riesgos de repercusiones negativas pueden contrarrestarse facilitando la transición de los trabajadores agrícolas a otras oportunidades de empleo, abordando los obstáculos que impiden que los pequeños productores pobres participen en los beneficios y evitando las políticas que subvencionan la automatización en contextos de abundancia de mano de obra y bajos salarios rurales.

AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA: LAS OPORTUNIDADES ABUNDAN, PERO NO ESTÁN EXENTAS DE DIFICULTADES

Cualquier actividad relacionada con la agricultura consta de tres fases: diagnóstico, toma de decisiones y ejecución. La mecanización motorizada automatiza la ejecución de actividades agrícolas como la labranza, la siembra, la aplicación de fertilizantes, el ordeño, la alimentación y el riego. Con las tecnologías de automatización digital, es posible automatizar también el diagnóstico y la toma de decisiones. Estas tecnologías aumentan la precisión de las actividades agrícolas y permiten hacer un uso más eficiente de los recursos e insumos, con posibles beneficios en cuanto a la sostenibilidad ambiental y una mayor resiliencia frente a perturbaciones y tensiones. La evolución tecnológica en la agricultura puede resumirse como un paso progresivo de las herramientas manuales a la tracción animal, a la mecanización motorizada, al equipo digital y, finalmente, a la robótica con inteligencia artificial (IA).

En este contexto, en el presente informe se define la automatización agrícola como sigue:

> el uso de maquinaria y equipo en las actividades agrícolas para mejorar el diagnóstico, la toma de decisiones o la ejecución, reduciendo el trabajo agrícola pesado o mejorando la puntualidad, y posiblemente la precisión, de las actividades agrícolas.

La automatización agrícola presenta muchas oportunidades: puede aumentar la productividad y permitir una gestión más cuidadosa de los cultivos, el ganado, la acuicultura y la actividad forestal; puede proporcionar mejores condiciones de trabajo y mayores ingresos, así como reducir la carga de trabajo de la agricultura; y puede generar nuevas oportunidades empresariales en el medio rural. Las tecnologías que se aplican fuera de las explotaciones agrícolas pueden reducir aún más la pérdida y el desperdicio de alimentos, mejorar la inocuidad de los alimentos y facilitar la adición de valor.

En muchos países, la disminución de la disponibilidad de mano de obra rural —que se refleja en el aumento de los salarios agrícolas— es uno de los principales factores determinantes de la automatización agrícola. La creciente preocupación de los consumidores por la calidad, la inocuidad, el sabor y la frescura de los alimentos, junto con preocupaciones relacionadas con el medio ambiente, también están estimulando la inversión en tecnologías digitales. Lo mismo ocurre con las dificultades relacionadas con el manejo del ganado y el bienestar de los animales que se derivan del creciente tamaño de los rebaños en la producción ganadera.

Por otro lado, la automatización agrícola puede conllevar el riesgo de exacerbar las desigualdades sociales, ya que los productores más grandes y con más instrucción tienen más capacidad (por ejemplo, fondos, infraestructura rural, aptitudes) para invertir en nuevas tecnologías o para reciclarse y adquirir nuevas competencias. Las mujeres y los jóvenes pueden enfrentarse a obstáculos especialmente importantes, por ejemplo, para obtener educación y capacitación de calidad, así como para tener acceso a la tierra, al crédito y a los mercados. Además, se prevé que la automatización reduzca los empleos que entrañan tareas rutinarias, como la siembra y la cosecha, pero que aumente los empleos cualificados que requieren, por ejemplo, educación secundaria. En los países con una fuerza de trabajo rural numerosa, este cambio en el empleo puede suponer el riesgo de acentuar las desigualdades. Para superar estas dificultades, es necesario reducir los obstáculos para la adopción —que enfrentan en particular los pequeños productores, las mujeres y los jóvenes— a fin de conseguir que las soluciones automatizadas sean neutrales en cuanto a la escala, es decir, que sean accesibles a los productores agrícolas de todas las escalas, desde los pequeños hasta los grandes productores. Esto puede lograrse mediante innovaciones tecnológicas que adapten la automatización a las condiciones de los pequeños productores. Además, arreglos institucionales innovadores, como los activos compartidos o los servicios de alquiler de maquinaria, pueden contribuir a la neutralidad de escala al poner en contacto a los propietarios de equipo con los pequeños productores, que pagan una tarifa por un servicio de automatización en lugar de asumir el costo de la compra de la maquinaria.

La dependencia de la automatización agrícola respecto de maquinaria pesada también puede poner en riesgo la sostenibilidad ambiental y contribuir a la deforestación, el monocultivo de tierras agrícolas, la pérdida de biodiversidad, la degradación de las tierras y la erosión del suelo. Sin embargo, algunos avances recientes en la automatización, especialmente en equipo pequeño basado en la IA, pueden invertir algunos de estos efectos negativos.

COMPRENDER EL PASADO Y MIRAR HACIA EL FUTURO DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

La mecanización motorizada ha aumentado considerablemente en todo el mundo, aunque solo existen datos mundiales fiables, con una amplia cobertura de países, sobre los tractores y únicamente hasta 2009. El uso de tractores como fuerza motriz agrícola fue una de las innovaciones más influyentes del siglo XX; se inició en los Estados Unidos de América entre 1910 y 1960 y se extendió al Japón y Europa después de 1955. Más tarde, muchos países de Asia y América

Latina experimentaron un progreso considerable en la introducción de maquinaria motorizada, además de la aparición de sectores de fabricación de maquinaria agrícola en algunos países. Con el aumento de los mercados de alquiler de maquinaria, su introducción se ha generalizado y ha facilitado el acceso de los pequeños productores. Sin embargo, la introducción de tractores se ha estancado en el África subsahariana en los últimos decenios, y las herramientas manuales ligeras siguen siendo el principal tipo de equipo utilizado. Los esfuerzos de promoción de la mecanización realizados durante las décadas de 1960 y 1970, basados en proporcionar maquinaria subvencionada a los agricultores y crear explotaciones estatales y empresas públicas de alquiler, resultaron costosos y en su mayoría fracasaron debido a problemas de gobernanza. Esto está cambiando con la reaparición de la agricultura en la agenda de desarrollo de África, lo que ha llevado a un renovado interés en la automatización.

Desde la década de 1970, las tecnologías digitales han llegado a la agricultura a través de diversas aplicaciones. Al principio, se trataba sobre todo de tecnologías sencillas de ganadería de precisión que facilitaban el manejo de animales individuales mediante la identificación electrónica (también denominada "marcado electrónico"), lo que luego allanó el camino a los robots de ordeño en la década de 1990. Al mismo tiempo, empezaron a aparecer herramientas digitales incorporadas a la mecanización, como maquinaria con sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS), que facilitaron el guiado automático de tractores, esparcidoras de fertilizantes y pulverizadoras de plaguicidas. Más recientemente, se está empezando a utilizar dispositivos no incorporados, como los teléfonos inteligentes, para informar a los productores mediante sensores, cámaras de alta resolución y diversas aplicaciones integradas en los dispositivos. Estas tecnologías pueden reducir los costos y aumentar la productividad; sin embargo, su adopción parece ser consecuencia también de consideraciones no monetarias, por ejemplo, una mayor flexibilidad de los horarios de trabajo y una mejor calidad de vida, como en el caso de los robots de ordeño.

Aún más avanzadas son las soluciones del internet de las cosas (IdC), que se utilizan, por ejemplo, para controlar y a veces automatizar, al menos en parte, las decisiones sobre el cuidado de los cultivos, el ganado o los peces. Los servicios digitales también incluyen servicios de activos compartidos, que conectan a los propietarios de equipo (por ejemplo, tractores o drones), y a veces también a los operadores, con los agricultores que necesitan ese equipo.

Las tecnologías digitales también ofrecen posibilidades a la agricultura de precisión no mecanizada. Hace mucho tiempo ya que se elaboraron metodologías para la aplicación manual de fertilizantes en sitios específicos: cabe mencionar, por ejemplo, la tecnología de dosis variable (TDV) para los fertilizantes del arroz o un escáner de suelo manual disponible en varios países de ingresos bajos de África y Asia. Los agricultores no mecanizados de Asia y África también están utilizando servicios de vehículos aéreos no tripulados, comúnmente conocidos como drones; se usa el GNSS para medir la superficie de los campos (Asia) y delimitar los campos para determinar la tenencia de la tierra (África).

EL ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE AUTOMATIZACIÓN DIGITAL Y LA ROBÓTICA EN LA AGRICULTURA

Las aplicaciones de la automatización digital y la robótica en la agricultura son extremadamente diversas. Los teléfonos inteligentes, con diversos sensores y cámaras de alta resolución incorporados, son los aparatos más accesibles para los productores (en especial, los pequeños productores) en los países de ingresos bajos y medianos. Sin embargo, la escasa alfabetización digital en las zonas rurales, la falta de tecnologías adaptadas a los pequeños productores y el costo relativamente elevado de estas tecnologías

siguen siendo los mayores obstáculos para su introducción.

Más recientemente, se ha empezado a comercializar tecnologías avanzadas como los robots autónomos para cultivos (por ejemplo, para la cosecha, la siembra y el deshierbe). Se utilizan drones para recopilar información y automatizar la aplicación de insumos, pero su uso suele estar estrictamente reglamentado.

En el sector de la acuicultura, la automatización va en aumento en respuesta a la escasez de mano de obra y a los elevados salarios. En los bosques, gran parte del trabajo de recolección de madera está ya muy mecanizado, y los robots móviles, combinados con nuevas técnicas de realidad virtual y teledetección, están preparando el camino para máquinas automáticas avanzadas. Además, se está utilizando la teledetección para controlar la deforestación. La digitalización y la automatización también tienen gran potencial en la agricultura de ambiente controlado, que incluye la agricultura en interiores y la agricultura vertical. Los invernaderos son la forma más común de agricultura de ambiente controlado y, por su propia índole, pueden someterse a vigilancia, control y optimización ambientales.

Existen muchas soluciones tecnológicas ya disponibles para su adopción en países de ingresos tanto altos como medianos y bajos. En la dirección que tomen y su índice de adopción influirán considerablemente las decisiones en materia de políticas. Los gobiernos deben facilitar el acceso a estas tecnologías para todos —en particular, los pequeños productores, las mujeres, los jóvenes y otros grupos vulnerables y marginados— y asegurarse de que se adapten al contexto y las necesidades específicos de los productores. Idealmente, los gobiernos deberían crear condiciones equitativas respecto de las tecnologías innovadoras con objeto de permitir al sector privado satisfacer la demanda de automatización.

PASO A PASO: LA MECANIZACIÓN MOTORIZADA SIMPLE TODAVÍA DESEMPEÑA UN PAPEL IMPORTANTE

Aunque las tecnologías digitales y la robótica prometen grandes cosas, la mecanización motorizada puede generar aún muchos beneficios, como aumento de los ingresos, reducción de los costos, ahorro de mano de obra y disminución del trabajo pesado. Puede liberar mano de obra doméstica y permitir que los hogares agrícolas asignen menos tiempo a la agricultura para dedicarse a trabajos no agrícolas. También puede haber beneficios indirectos para la economía en general. Estos pueden reflejarse en una mayor demanda de bienes y servicios no agrícolas por parte de los hogares agrícolas a medida que mejora la productividad de la mano de obra, así como la expansión de la economía no agrícola a medida que los trabajadores dejan la agricultura y pasan a sectores con mayor productividad de la mano de obra. La automatización también puede mejorar la inocuidad de los alimentos, gracias a las tecnologías de conservación y almacenamiento, así como hacer la producción agrícola más resiliente, en particular a las perturbaciones climáticas, ya que permite a los agricultores completar las actividades agrícolas más rápidamente y tener más flexibilidad a fin de adaptar las actividades a los cambios en las condiciones meteorológicas.

Por consiguiente, todavía hay margen para aumentar el uso de la mecanización motorizada en algunos contextos. En los países de ingresos bajos y medianos, los pequeños productores pueden beneficiarse más de las máquinas pequeñas, como los tractores de dos ruedas, que representan una opción menos costosa y más sostenible desde el punto de vista ambiental que la maquinaria pesada tradicional. Las recientes innovaciones para adaptar maquinaria motorizada a las necesidades locales pueden ayudar a los países a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y ahorrar recursos escasos (por ejemplo, agua) mediante sinergias innovadoras entre la mecanización y otras prácticas de gestión de los campos. Por ello,

la mecanización agrícola ocupa un lugar destacado en la agenda política de muchos países de ingresos bajos y medianos. Este es el caso, especialmente, del África subsahariana, donde la mecanización agrícola se descuidó durante algún tiempo, tras los anteriores fracasos de los programas estatales de mecanización.

Las tecnologías manuales y la tracción animal también pueden desempeñar todavía un papel importante en muchos contextos. La tracción animal puede ser una importante fuente de energía para las explotaciones agrícolas muy pequeñas y fragmentadas, y herramientas manuales avanzadas pueden reducir la necesidad de energía humana. Aunque son menos potentes que los tractores, tanto los animales de tiro como las herramientas manuales avanzadas pueden aún ayudar a remediar la escasez de mano de obra y facilitar un mayor rendimiento de los cultivos y la expansión de las tierras en muchas zonas. En muchos casos, son probablemente la opción más viable para aumentar el suministro de energía.

DE CARA AL FUTURO: ARGUMENTOS A FAVOR DE LA INVERSIÓN EN AUTOMATIZACIÓN DIGITAL

El argumento a favor de la inversión en tecnología agrícola se basa en la posible utilidad para el sector privado. Se supone que los actores pertinentes —incluidos productores, comerciantes y proveedores de servicios— toman decisiones racionales que maximizan sus beneficios y su bienestar. La inversión en tecnologías de automatización conlleva costos, que tienden a aumentar si las tecnologías no están ampliamente disponibles a nivel local. Los proveedores y productores solo asumirán el compromiso necesario si los beneficios son superiores a los costos. En el caso de algunas tecnologías y en determinadas condiciones, los costos de inversión pueden superar los beneficios privados; por otro lado, puede haber importantes beneficios para la sociedad en general. En este caso, es necesaria la intervención pública para armonizar los beneficios privados con los intereses de la sociedad en su conjunto.

Dada la escasez de datos, se utilizaron 27 estudios de casos, basados en entrevistas con proveedores de servicios de automatización digital, para arrojar luz sobre el argumento a favor de la automatización digital de la agricultura. Los estudios de casos abarcan todas las regiones del mundo y todos los sistemas de producción agrícola (cultivos, ganadería, acuicultura y agroforestería). Representan soluciones de automatización digital en diferentes etapas de preparación: muchas de ellas aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo y comercialización. Los resultados revelan que solo 10 de los 27 proveedores de servicios son rentables y sostenibles desde el punto de vista financiero. Estos 10 proveedores, en su mayoría ubicados en países de ingresos altos, utilizan soluciones que están en su etapa de madurez (es decir, han sido ampliamente adoptadas) y prestan servicios principalmente a grandes productores. Más de un tercio de los estudios de casos sugieren que los agricultores se están beneficiando de estas soluciones mediante aumentos de la productividad y la eficiencia y nuevas oportunidades de mercado. En conjunto, los resultados indican que los argumentos a favor de las tecnologías de automatización digital aún no están maduros, en parte porque muchas de estas tecnologías se encuentran aún en la etapa de los prototipos, pero también porque existen graves obstáculos para su adopción, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos.

Aunque el desarrollo de muchas tecnologías se encuentra aún en una etapa preliminar, los estudios de casos permiten extraer varias enseñanzas importantes. Los factores clave para la adopción son, en primer lugar, el conocimiento de la capacidad de una solución para realizar actividades agrícolas con éxito y, en segundo lugar, la capacidad de los agricultores para manejar la solución. Los obstáculos más frecuentes para la adopción de estas tecnologías son la falta de

alfabetización digital, la limitada conectividad y la escasa disponibilidad de otros elementos de infraestructura de apoyo, como la electricidad. A ello se suma a menudo la reticencia al cambio, generalmente relacionada con el envejecimiento de la población agrícola. Se señala que el cambio generacional actúa como un motor de la adopción, y se considera que los jóvenes agricultores son fundamentales en la transformación hacia la digitalización y la automatización avanzada. Las condiciones del mercado también actúan ya sea como un motor o un obstáculo para la adopción, dado que una fuerte competencia entre los productores los incita a asumir más riesgos y adoptar nuevas tecnologías que prometen mayor productividad y eficiencia. Los factores limitantes pueden ser la reglamentación gubernamental de las importaciones de tecnología, la ausencia de políticas de intercambio de datos y la insuficiencia de las políticas y los incentivos públicos. Por otro lado, cuando están bien proyectados, los reglamentos o el apoyo público pueden ser un fuerte motor para la adopción.

MÁS ALLÁ DE LOS ARGUMENTOS A FAVOR: LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA PROMETE BENEFICIOS AMBIENTALES, PERO ES NECESARIO SEGUIR INVESTIGANDO

En los países de ingresos altos, pero también en muchas explotaciones comerciales de países de ingresos bajos y medianos, la agricultura ya está muy mecanizada, principalmente gracias al uso de máquinas grandes. Sin embargo, este tipo de mecanización ha ocasionado erosión del suelo, deforestación y pérdida de biodiversidad, todo lo cual contribuye a reducir la resiliencia. Las innovaciones de las tecnologías de automatización y la investigación agronómica aplicada pueden ayudar a explorar soluciones para abordar estas dificultades. Por ejemplo, la mecanización motorizada puede adaptarse a maquinaria más pequeña y ligera. Las soluciones que ofrecen posibilidades para los pequeños productores incluyen tractores pequeños de cuatro ruedas y de dos ruedas. Pueden reducir al mínimo la pérdida de biodiversidad, ya que no requieren un desmonte y una remodelación importantes de los campos. Otras máquinas motorizadas pequeñas, como las deshierbadoras propulsadas y las trilladoras móviles, también pueden producir beneficios en cuanto a la igualdad de género, ya que las mujeres pueden manejarlas con facilidad.

Las tecnologías de automatización digital que apoyan la agricultura de precisión también presentan una oportunidad para obtener grandes beneficios ambientales. Pueden facilitar la adopción de prácticas sostenibles, como la agricultura de conservación. Hay ejemplos de éxito en el uso de ordenadores y del IdC para automatizar invernaderos, lo que permite ahorrar agua y otros insumos. Los enjambres de pequeños robots pueden producir beneficios ambientales mediante la reducción del uso de plaguicidas y herbicidas, la optimización del uso de otros insumos y la reducción de la compactación del suelo. Ya son económicamente viables en determinadas circunstancias, pero es necesario seguir investigando, especialmente acerca de su potencial para la agricultura en pequeña escala, donde deberían tener una ventaja comparativa sobre la maquinaria grande en las explotaciones con campos de forma irregular.

Estos beneficios ambientales son actualmente específicos de cada lugar; asimismo, muchas soluciones están todavía en las primeras etapas de desarrollo y comercialización. Por lo tanto, se precisan más investigaciones, incluidos ensayos. Si tanto los encargados de formular las políticas como los productores conocen plenamente los beneficios de estas tecnologías, la inversión en su desarrollo debería aumentar. La transición a energías renovables también es importante y puede ofrecer nuevas oportunidades para impulsar la automatización, especialmente en las zonas rurales remotas; sin embargo, también en este caso es necesario investigar qué soluciones de energía renovable sin conexión a la red pueden alimentar más eficazmente cada tipo de maquinaria.

LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA TIENE REPERCUSIONES COMPLEJAS SOBRE LOS TRABAJADORES Y TAMBIÉN PUEDE BENEFICIAR A LOS CONSUMIDORES

Resulta muy difícil medir las repercusiones generales de la automatización agrícola en el empleo porque ello requiere grandes cantidades de datos que permitan el seguimiento de todas las transformaciones y la reubicación conexa de trabajadores, no solo en las actividades agrícolas, sino también en las etapas anteriores y posteriores. A medida que se desarrolla la transformación agrícola, la gente abandona la agricultura para buscar trabajos mejor pagados y la proporción de personas empleadas en la agricultura sigue disminuyendo. El proceso reconfigura la oferta y la demanda de mano de obra en sistemas agroalimentarios completos. Cuando todos los nodos de los sistemas agroalimentarios cambian simultáneamente, es casi imposible atribuir las repercusiones socioeconómicas y en el mercado de trabajo a casos específicos de automatización agrícola.

Los posibles efectos de la automatización agrícola sobre el empleo en el sector pueden ser diversos. Es probable que la demanda de mano de obra poco cualificada disminuya a medida que se automatizan muchas tareas. Mientras tanto, la automatización aumenta la demanda de trabajadores relativamente cualificados. Si se consideran los sistemas agroalimentarios en su conjunto, la automatización podría disminuir el empleo estacional con salarios bajos en las explotaciones agrícolas, pero podría aumentar el empleo mejor pagado y menos estacional en las etapas anteriores y posteriores.

Las implicaciones de la automatización también pueden ser diferentes en distintos tipos de explotaciones. En el caso de los pequeños agricultores y los agricultores de subsistencia, la automatización puede liberar mano de obra familiar para el empleo no agrícola, pero también puede facilitar la expansión de la producción. En las explotaciones comerciales familiares, puede liberar mano de obra familiar y reducir la demanda de mano de obra contratada, pero si las actividades agrícolas comerciales se expanden como resultado de la automatización, puede haber más necesidad de mano de obra asalariada. Las explotaciones comerciales de empresas son las más automatizadas, con el correspondiente descenso de las necesidades de mano de obra en las explotaciones. No obstante, incluso en este caso, si la adopción de la automatización se ve estimulada por el aumento de los salarios y la escasez de mano de obra, tenderá a aumentar la productividad de la mano de obra y los salarios sin provocar desempleo.

Si la automatización se produce en lugares donde abunda la mano de obra, y se incentiva mediante subvenciones que la abaratan artificialmente, existe un serio riesgo de desplazar mano de obra y generar desempleo, con importantes implicaciones socioeconómicas, especialmente para las personas más pobres y menos cualificadas, que no pueden encontrar fácilmente otro empleo.

La automatización agrícola tiene repercusiones socioeconómicas significativas para los consumidores, ya que se traduce en una reducción de los costos de producción de los alimentos. Los avances en la automatización digital también pueden crear nuevas oportunidades empresariales beneficiosas para los consumidores —por ejemplo, al posibilitar el resurgimiento de cultivos autóctonos ricos en nutrientes cuya automatización resulta dificultosa— y reducir sustancialmente los costos de producción de los alimentos orgánicos, que actualmente exigen mucha mano de obra.

EL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA DEBE SER INCLUSIVO Y NO DEJAR A NADIE ATRÁS

La automatización agrícola debe incluir a quienes experimentan vulnerabilidad, exclusión y marginación, en particular los pequeños productores, los pastores, los pescadores y silvicultores en pequeña escala y las comunidades

forestales, los trabajadores agrícolas asalariados, las microempresas y los trabajadores informales, las personas sin tierra y los trabajadores migrantes. La participación de las mujeres, los jóvenes y las personas con discapacidad es especialmente importante.

Las implicaciones de género de la automatización de las explotaciones agrícolas son complejas. Sin embargo, las mujeres van a la zaga de los hombres en la adopción de tecnología agrícola debido a los obstáculos para el acceso al capital, los insumos y los servicios (por ejemplo, información, extensión, crédito, fertilizantes) y, en algunos contextos, también debido a las normas culturales. Los encargados de formular las políticas y los asociados locales en la ejecución deben promover el desarrollo de tecnología, la difusión y la prestación de servicios teniendo en cuenta las cuestiones de género.

Los jóvenes agricultores parecen ser los primeros en abrazar el proceso con entusiasmo. La automatización agrícola promete nuevos tipos de trabajos que exigen un sólido conjunto de habilidades. Un programa robusto de desarrollo del capital humano y de creación de capacidades, centrado en los jóvenes, debe ser una prioridad.

A medida que la automatización que permite ahorrar mano de obra se extiende en las explotaciones, no solo se reduce la mano de obra agrícola, sino que esta se vuelve más cualificada. Un reto importante es facilitar la transición de la mano de obra agrícola de las actividades manuales poco cualificadas al trabajo con tecnologías más complejas. Sin embargo, los temores de que la automatización desplace a millones de trabajadores agrícolas sin otras perspectivas de trabajo son infundados. La automatización de los trabajos agrícolas, con la consiguiente evolución de la mano de obra agrícola, es un proceso gradual que difiere en función del lugar, los cultivos y las tareas agrícolas. Los incentivos para adoptar la automatización que ahorra mano de obra son mayores en relación con las tareas agrícolas específicas que requieren mucha mano de obra y que pueden automatizarse fácilmente a bajo costo. Mientras algunas tareas se automatizan, otras seguirán precisando mucha mano de obra.

Si las tecnologías de automatización disponibles no son neutrales en cuanto a la escala, existe el riesgo de que los pequeños productores y elaboradores quiebren por carecer de las economías de escala necesarias para seguir siendo competitivos. Sin embargo, este no es un resultado inevitable de la automatización de la agricultura; la clave está en la generalización de la automatización neutral en cuanto a la escala y de bajo costo.

En cualquier caso, la suposición de que limitar la automatización puede preservar el empleo y los ingresos agrícolas es infundada. De hecho, las políticas destinadas a restringir la automatización solo harán que las explotaciones agrícolas sean menos competitivas y no puedan ampliar su producción. Para mejorar los salarios y las condiciones de trabajo de sus trabajadores, las explotaciones agrícolas deben llegar a ser más productivas mediante el uso de nuevas tecnologías. Sin tecnologías que mejoren la productividad de la mano de obra, las perspectivas de sacar de la pobreza y la inseguridad alimentaria a los trabajadores agrícolas pobres son escasas.

PRESENTACIÓN DE UN PLAN DETALLADO PARA UNA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA EFICIENTE, SOSTENIBLE E INCLUSIVA: POLÍTICAS, INVERSIONES E INSTITUCIONES

La automatización agrícola tiene un gran potencial para contribuir a un desarrollo rural sostenible e inclusivo basado en una agricultura intensiva pero sostenible. Sin embargo, el aprovechamiento de este potencial no es automático y depende del contexto socioeconómico, así como del entorno de políticas e institucional en el que se desarrolla el proceso de automatización agrícola. Que los países ganen o pierdan como resultado del proceso depende de la manera en que gestionen la transición. Los países que establezcan la

infraestructura física, económica, jurídica y social necesaria para la automatización digital saldrán beneficiados. Los países que hagan caso omiso de este reto pueden perder.

Como todo cambio tecnológico, la automatización agrícola conlleva inevitablemente algunas perturbaciones y, si bien genera beneficios, también da lugar a compensaciones. El informe propone una serie de posibles opciones en materia de políticas, instituciones, legislación e inversiones. En conjunto, forman un plan para velar por que la automatización agrícola contribuya a conseguir sistemas agroalimentarios eficientes, productivos, sostenibles, resilientes e inclusivos. Algunas opciones se centran en la creación de un entorno propicio para los negocios en la agricultura, en particular en lo que respecta a las inversiones en tecnologías de automatización, y estas deben complementarse con reglamentos y otras medidas para garantizar que conduzcan a la sostenibilidad ambiental y la resiliencia al clima. Por último, se deben establecer políticas y programas para que el proceso dé resultados para todos, especialmente para los grupos marginados, como las mujeres, los pequeños productores y los jóvenes.

Los gobiernos también tendrán que equilibrar las compensaciones entre los diferentes objetivos económicos, ambientales y sociales, a veces contrapuestos. Las políticas, inversiones y otras medidas públicas que se proponen y que se examinan en la sección siguiente como parte de un plan detallado para la automatización agrícola no tienen el mismo peso en todos los contextos. Los gobiernos deben establecer prioridades entre las medidas en función de las dificultades que enfrentan y de sus capacidades nacionales. Un ámbito transversal fundamental para la intervención gubernamental es el apoyo relacionado con servicios generales, que representa las medidas gubernamentales que, sin distorsionar los incentivos ni favorecer a determinados actores sobre otros (o a determinados sectores dentro de la agricultura), crean un entorno propicio para hacer negocios en la agricultura y los sistemas agroalimentarios.

LAS POLÍTICAS E INTERVENCIONES ORIENTADAS A LA AGRICULTURA TAMBIÉN AFECTAN A LA ADOPCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN

Diversas políticas específicas para la agricultura pueden apoyar la automatización de forma más directa y ayudar a superar los obstáculos para su adopción, especialmente para los pequeños productores. Los gobiernos pueden influir en el proceso de adopción a través de políticas crediticias orientadas directamente a la automatización agrícola. Los préstamos para la inversión son la solución más común para financiar la automatización y se presentan en diversas formas, como garantías basadas en contratos, sistemas de garantía de préstamos, grupos de responsabilidad conjunta, arrendamiento con opción a compra y donaciones de contrapartida. Además, las subvenciones específicas "inteligentes" que no distorsionan los mercados pueden desempeñar una función importante. La mejora de la seguridad de la tenencia de la tierra es esencial, ya que la inseguridad de la tenencia de la tierra restringe el acceso de los productores al crédito porque no pueden utilizar los títulos de propiedad como garantía. La reducción de los derechos de importación sobre la maquinaria, el equipo digital y las piezas de repuesto, así como la mejora de los procedimientos aduaneros, también pueden contribuir a reducir los costos de transacción asociados a las tecnologías de automatización y estimular su adopción.

Es preciso desarrollar el capital humano para superar el analfabetismo digital, por ejemplo, a través de centros de formación profesional. Deben reforzarse los conocimientos y las competencias de los fabricantes, los propietarios, los operadores, los técnicos y los agricultores, con los jóvenes como un objetivo estratégico, ya que suelen ser los principales impulsores de la automatización. La mejora de los servicios de

extensión agrícola y asesoramiento rural puede facilitar la adopción. Los servicios públicos de extensión siempre han desempeñado un papel importante con miras al logro de una automatización agrícola inclusiva. Sin embargo, la escasez de personal de extensión con la capacitación adecuada es una limitación importante en la mayoría de los países de ingresos bajos y medianos.

Si bien el capital humano es fundamental para los usuarios (es decir, los agricultores y los proveedores de servicios), es igualmente importante para quienes participan en las innovaciones (como los investigadores y científicos). Los gobiernos pueden financiar la investigación aplicada y el desarrollo de tecnologías de automatización, o bien llevarlos a cabo, en particular con la finalidad de hallar soluciones adaptadas a las necesidades locales y a las de los pequeños productores. Un área importante de investigación es la evaluación de los efectos de las soluciones de agricultura de precisión en cuanto a su rentabilidad, sostenibilidad ambiental e inclusividad. Es necesario centrar la atención tanto en la maquinaria pequeña como en las soluciones digitales de baja tecnología, como los sistemas de respuesta vocal interactiva (IVR), el servicio suplementario de datos no estructurados (USSD) y el servicio de mensajes cortos (SMS). La maquinaria pequeña puede ser más adecuada para las condiciones locales y las explotaciones pequeñas, mientras que las soluciones de baja tecnología pueden llegar más fácilmente a todos los agricultores a un bajo costo.

Por último, los gobiernos deben elaborar normas de garantía de calidad y seguridad, que pueden ser gestionadas por organizaciones públicas, del mercado y del tercer sector. Las leyes y normas de seguridad de la automatización deben basarse en una consulta inclusiva con todas las partes interesadas, ser transparentes y estar respaldadas por medidas que garanticen el cumplimiento por parte de los usuarios.

LAS POLÍTICAS, LAS INSTITUCIONES Y LAS INVERSIONES AJENAS A LOS SISTEMAS AGROALIMENTARIOS AFECTAN A LA ADOPCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

Las políticas generales y las inversiones que no están dirigidas específicamente a los sistemas agroalimentarios pueden conformar el entorno propicio, con inclusión de la infraestructura. La infraestructura viaria es especialmente deficiente en los países de ingresos bajos y en la mayor parte del África subsahariana. La mejora de esta infraestructura puede reducir los costos de transacción relativos al acceso a la maquinaria, las piezas de repuesto, las reparaciones y el combustible, así como facilitar la aparición de mercados de servicios. Resulta igualmente importante invertir en infraestructura energética, por ejemplo, mediante el desarrollo de la electrificación independiente de la red a partir de recursos renovables, ya que ninguna tecnología de automatización funciona sin energía. La disponibilidad de energía renovable basada en inversiones locales puede amortiguar tanto las perturbaciones en el sector energético como las fluctuaciones de los precios de los combustibles.

La mejora de la infraestructura de comunicación y de la conectividad a Internet es fundamental para el funcionamiento adecuado de la automatización agrícola. La deficiencia de la conectividad está muy extendida incluso en algunas zonas rurales de los países de ingresos altos. Las políticas pueden otorgar ventajas fiscales o posibilitar préstamos a bajo interés a los proveedores de servicios de Internet rurales. La legislación puede desempeñar un papel importante, promoviendo asociaciones entre la comunidad y los sectores público y privado con el fin de mejorar la conectividad y la infraestructura conexa en las zonas rurales y proporcionar servicios de datos y apoyo. Las inversiones también deberían dirigirse a la infraestructura de apoyo relacionada, como conjuntos de datos públicos sobre previsiones meteorológicas y calendarios para la producción de cultivos y la ganadería.

Si bien la infraestructura física es una de las principales preocupaciones, las instituciones, las condiciones macroeconómicas y la capacidad institucional en general también son fundamentales para la adopción de la automatización agrícola. Es importante mejorar los mercados de crédito en general; de hecho, el acceso de los pequeños productores al crédito a tasas de interés asequibles suele ser limitado, lo que imposibilita la financiación de las tecnologías de automatización. Es esencial reforzar la capacidad institucional y política para orientar el desarrollo de las tecnologías de automatización; si, por el contrario, las empresas tecnológicas privadas poderosas llegan primero, las consecuencias son potencialmente negativas, con efectos indirectos en la sociedad en general. Asimismo, si se establecen políticas nacionales transparentes de datos —que incluyan normas de protección de datos, intercambio de datos y privacidad— esas mismas empresas pueden facilitar la automatización digital. Otros facilitadores son el desarrollo de la infraestructura nacional de datos y el fomento de la interoperabilidad, es decir, la comunicación precisa y fiable entre máquinas. Por último, las políticas cambiarias y comerciales pueden afectar a los patrones de la automatización debido a los costos de importación de maquinaria, equipo digital y piezas de repuesto.

SI SE DESARROLLA DE MANERA ADECUADA, LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA CONTRIBUIRÁ A CREAR SISTEMAS AGROALIMENTARIOS INCLUSIVOS Y SOSTENIBLES

Incluso suponiendo que los países puedan crear condiciones equitativas para el suministro de tecnologías innovadoras por parte del sector privado, seguirán existiendo retos relacionados con la automatización. La automatización agrícola enfrenta tres retos concretos: no dejar atrás a los grupos marginados, evitar el aumento del desempleo y el desplazamiento de puestos de trabajo y prevenir daños ambientales. Las políticas pueden desempeñar un papel importante a fin de abordar estos retos y velar por que la automatización contribuya a una transformación agrícola inclusiva y sostenible. Por lo tanto, lo más probable es que los encargados de formular las políticas tengan que adoptar medidas.

En primer lugar, los gobiernos deben garantizar que las mujeres, los jóvenes y otros grupos desfavorecidos se beneficien de la automatización. Las políticas que abordan las desventajas que enfrentan las mujeres (por ejemplo, mejorando sus derechos sobre la tierra o facilitando su acceso al crédito y a la extensión) también contribuyen a aumentar el acceso de las mujeres a la automatización. Las actividades de investigación y desarrollo públicas pueden centrarse en tecnologías de mecanización favorables a las mujeres, es decir, adaptadas a sus necesidades. Además, es preciso un programa específico de automatización agrícola dirigido a los jóvenes del medio rural y a otros grupos desfavorecidos, que permita que adquieran las competencias necesarias para desempeñar los nuevos trabajos altamente cualificados asociados a la automatización.

En segundo lugar, los gobiernos deben evitar los efectos negativos sobre el empleo. Es poco probable que la automatización genere desempleo cuando surge en respuesta a las fuerzas del mercado (por ejemplo, el aumento de los salarios rurales) y sustituye al trabajo familiar no remunerado. Por otro lado, si se impulsa artificialmente mediante esfuerzos públicos (por ejemplo, a través de la importación subvencionada de maquinaria), podría conducir al desempleo, al desplazamiento de puestos de trabajo y a la reducción de los salarios rurales. Por lo tanto, los encargados de formular las políticas no deberían promover la automatización antes de que sea realmente necesaria. Al mismo tiempo, no deberían inhibir su adopción basándose en el argumento de que desplazará mano de obra y creará desempleo. El apoyo mediante políticas que proporcionan bienes públicos o colectivos a través del apoyo relacionado con servicios generales es el que más probablemente permitirá una transición

fluida hacia una mayor automatización sin crear desempleo. Esto incluye respaldar actividades de investigación y desarrollo agrícolas y servicios de transferencia de conocimientos.

En tercer lugar, las políticas deben garantizar que la automatización agrícola contribuya a unos sistemas agroalimentarios sostenibles y resilientes. Aunque la mecanización motorizada ha generado muchos beneficios, también ha producido efectos negativos en el medio ambiente, como pérdida de biodiversidad, compactación y erosión del suelo y degradación de la calidad del agua. Las tecnologías de automatización digital más avanzadas, como la agricultura de precisión, pueden reducir al mínimo o evitar estos efectos. La investigación técnica y agronómica aplicada debería explorar las soluciones de automatización que mejor se adapten a las condiciones agroecológicas locales, y los gobiernos deberían facilitar la adopción de tecnologías de automatización ecológicas. Los agricultores son quienes pueden elegir mejor qué soluciones automatizadas se adaptan a las condiciones agroecológicas locales, pero los gobiernos deben crear un entorno propicio, que incluya información sobre las tecnologías disponibles.

En conclusión, si se procura abordar los retos mencionados, la automatización agrícola puede funcionar como un catalizador que apoye la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los ODS 1, 2, 3, 9 y 10. La combinación adecuada de tecnologías —así como las políticas, intervenciones e inversiones apropiadas— dependerá del nivel de desarrollo económico, las instituciones existentes, las características agronómicas locales y los objetivos de los encargados de formular las políticas. Es importante que estos reconozcan la especificidad del contexto de adopción y evalúen los problemas concretos que enfrenta una zona (por ejemplo, conectividad, desigualdad, pobreza, inseguridad alimentaria, malnutrición) antes de combinar los instrumentos de política para la acción. Corresponde a los productores agrícolas decidir qué tecnologías adoptar y a los gobiernos proporcionar un entorno propicio en el que la innovación pueda prosperar, así como los incentivos necesarios para que el proceso de adopción sea lo más inclusivo posible. ■

CHINA
Agricultor supervisando los cultivos de chile con una tableta.
©iStock.com/xijian

CAPÍTULO 1
LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA: EN QUÉ CONSISTE Y POR QUÉ ES IMPORTANTE

MENSAJES PRINCIPALES

➔ La automatización presenta muchas oportunidades para los productores agrícolas y los sistemas agroalimentarios en general, pero la desigualdad en el acceso y la adopción entre los países y dentro de ellos impide aprovechar todo su potencial.

➔ En particular, la automatización de la agricultura puede permitir incrementar la productividad, aumentar la resiliencia, mejorar la calidad de los productos y la eficiencia en el uso de los recursos, reducir el trabajo pesado y la escasez de mano de obra, mejorar la sostenibilidad ambiental y facilitar la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos.

➔ En la agricultura, la automatización puede contribuir a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030, en particular el ODS 1 (Fin de la pobreza) y el ODS 2 (Hambre cero) y los objetivos relacionados con la sostenibilidad ambiental y el cambio climático, así como impulsar cambios más amplios en los sistemas agroalimentarios mediante la creación de nuevas oportunidades empresariales.

➔ La automatización también puede crear desigualdades si queda fuera del alcance de algunos, especialmente de los productores agrícolas en pequeña escala o de sexo femenino. Si no se gestiona de manera adecuada, también puede tener consecuencias ambientales negativas contribuyendo, por ejemplo, al monocultivo.

➔ Para aprovechar todo el potencial de la automatización de la agricultura, las tecnologías deben estar disponibles, ser inclusivas, ser accesibles para todos y adaptarse a las condiciones locales (es decir, deben ser neutrales en cuanto a la escala) y, asimismo, deben mejorar la sostenibilidad ambiental.

➔ Un reto fundamental es conseguir que las tecnologías se adapten a los contextos locales y a los procesos de innovación locales que se promueven, así como crear capacidad entre los productores para adoptar y utilizar esas nuevas tecnologías.

El cambio tecnológico, impulsado y facilitado por los procesos de innovación, ha sido un motor clave de la transformación socioeconómica a lo largo de los tiempos y ha permitido aumentar la productividad y los ingresos, así como mejorar el bienestar humano. Esto se aplica tanto a los sistemas agroalimentarios como a otros sectores de la economía. Hoy en día, a fin de alimentar a una población mundial en constante crecimiento, debemos aumentar la producción de alimentos nutritivos y, al mismo tiempo, hacer frente a la limitada disponibilidad de tierras agrícolas, al uso insostenible de los recursos naturales, al incremento de las perturbaciones y tensiones y a las consecuencias de la aceleración del cambio climático. Por ello, los sistemas agroalimentarios deben superar el reto de aumentar la productividad de forma sostenible. Es cada vez más urgente poner en marcha nuevas soluciones tecnológicas que puedan aumentar la productividad y sostenibilidad en todos los sectores de la producción agrícola —cultivos y ganadería, pesca y acuicultura y actividad forestal— y elevar los niveles de productividad de los sistemas agroalimentarios más allá de la producción primaria.

A medida que el cambio tecnológico sigue transformando nuestras economías, los recientes avances en las tecnologías digitales, como

ordenadores y teléfonos móviles más rápidos, sensores, aprendizaje automático e inteligencia artificial (IA), han dado lugar a la creación de equipo revolucionario, transformando el uso de la maquinaria en las tareas agrícolas. Como ocurre con otras tecnologías, y con las innovaciones en general, estas nuevas tecnologías pueden complementar las tecnologías antiguas o bien sustituirlas. A veces, las tecnologías y prácticas más antiguas pueden ser revitalizadas o bien adaptarse para nuevos usos. Ofrecen posibilidades de evitar no solo gran parte del trabajo físico de la producción agrícola, sino también el trabajo intelectual necesario para recopilar y analizar información y datos y tomar decisiones. Por lo tanto, pueden ayudar a poner en práctica la agricultura de precisión[1], ya que mejoran la puntualidad de las actividades y permiten aplicar los insumos de manera más precisa y eficiente.

No es la primera vez en la historia de la humanidad que las consecuencias negativas del progreso tecnológico para los trabajadores causan temor. En la práctica, la idea generalizada de que la automatización conduce a la pérdida de puestos de trabajo y al aumento del desempleo no se ve confirmada por la realidad histórica. En el presente informe se sostiene que, por el contrario, la automatización (incluidas las tecnologías digitales) puede hacer la producción agrícola más resiliente a las perturbaciones y tensiones, como la sequía y la aceleración del cambio climático. La automatización de la agricultura puede aumentar la productividad, mejorar la calidad de los productos, incrementar la eficiencia en el uso de los recursos, aliviar la escasez de mano de obra y promover el empleo decente reduciendo el trabajo pesado, además de mejorar la sostenibilidad ambiental. Aunque debe reconocerse que la introducción de tecnologías de automatización, sobre todo si no se adaptan a un contexto local específico, puede provocar problemas socioeconómicos para algunos grupos, como efectos negativos en el mercado laboral, estos problemas pueden abordarse mediante políticas y legislación adecuadas, que se examinan en el informe. También plantean problemas los obstáculos que pueden impedir la aplicación de la automatización, en particular entre los pequeños productores pobres, creando así desigualdades en cuanto al acceso.

La automatización de la agricultura reviste gran importancia para varios ODS, en particular el ODS 1 (Fin de la pobreza) y el ODS 2 (Hambre cero). En la medida en que la agricultura de todo el mundo sea receptiva a la automatización, también puede impulsar el progreso hacia la consecución del ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), que exige apoyar y actualizar las capacidades tecnológicas, la investigación y la innovación, especialmente en los países de ingresos bajos. Asimismo, si se superan los obstáculos para la adopción, la automatización puede contribuir a reducir la brecha tecnológica y a promover el progreso hacia la consecución del ODS 5 (Igualdad de género), el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) y el ODS 10 (Reducción de las desigualdades). Gracias a su potencial para proporcionar condiciones de trabajo más seguras y alimentos más inocuos y de mayor calidad, puede contribuir al logro del ODS 3 (Salud y bienestar). Por último, la adopción satisfactoria de soluciones de automatización que mejoren la sostenibilidad ambiental puede contribuir al progreso hacia el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 12 (Producción y consumo responsables), el ODS 13 (Acción por el clima), el ODS 14 (Vida submarina) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

En el presente informe se investiga de qué manera la automatización de la agricultura, así como de las primeras etapas de la cadena de suministro de alimentos, puede contribuir a la consecución de los ODS y tener repercusiones positivas. Se examina el estado de la adopción de la automatización agrícola, incluidas las tendencias de su implantación, los factores determinantes de estas tendencias y sus posibles repercusiones socioeconómicas. Se examinan una serie de opciones e intervenciones en materia de políticas y legislación que podrían maximizar los beneficios y reducir al mínimo los riesgos de las tecnologías de automatización. En el Capítulo 1 se define la automatización agrícola, se explica su importancia para el desarrollo sostenible y se exponen las oportunidades, dificultades y compensaciones que las nuevas tecnologías de automatización pueden crear o conformar. Una premisa fundamental del análisis que se presenta en este informe es que los avances en la automatización agrícola pueden ayudar a la humanidad a superar numerosas dificultades relacionadas con la necesidad de

aumentar la producción de alimentos nutritivos de forma sostenible, pero que es probable que estos creen nuevas dificultades que habrán de gestionarse si se desea aprovechar al máximo el potencial que ofrece la automatización. ■

¿CÓMO HEMOS LLEGADO HASTA AQUÍ?

El proceso de cambio tecnológico en la producción agrícola no es nuevo. La historia demuestra que la humanidad se ha esforzado constantemente por reducir el trabajo en la agricultura desarrollando herramientas ingeniosas y aprovechando el poder del fuego, el viento, el agua y los animales. Alrededor del año 4000 a. C., los agricultores de Mesopotamia utilizaban arados tirados por bueyes[2], y los molinos de agua aparecieron en China alrededor del año 1000 a. C.[3]. El cambio tecnológico se ha acelerado durante los dos últimos siglos, impulsado por el descubrimiento de la energía de vapor (con la aparición de trilladoras y arados de vapor a mediados del siglo XIX), y se vio posteriormente reforzado por el surgimiento de tractores, cosechadoras y máquinas de elaboración que funcionan con combustible fósil, así como por las nuevas tecnologías de conservación de alimentos, entre otras[4, 5]. Estos cambios han permitido a las sociedades de todo el mundo reducir paulatinamente el trabajo pesado de la producción agrícola y liberar a los productores agrícolas de la gran fatiga física que entraña la agricultura. En consecuencia, la producción agrícola primaria requiere ahora menos mano de obra, se libera a trabajadores para el empleo en otros sectores, como la industria y los servicios, los niños tienen libertad para ir a la escuela y las mujeres pueden dedicarse a oportunidades de empleo no agrícola o a actividades domésticas. Esto ha ido acompañado de enormes avances en otras actividades o insumos agrícolas, como las semillas, los fertilizantes y el riego, avances que condujeron a la revolución verde y permitieron la expansión de la producción de alimentos, incluso con menores insumos de mano de obra y una expansión limitada de las tierras agrícolas[6].

Este proceso de aumento de la productividad agrícola y de reasignación de la mano de obra a otros sectores distintos de la agricultura suele denominarse transformación agrícola.

A medida que las economías se desarrollan, las tecnologías que ahorran mano de obra empujan a los trabajadores a abandonar las explotaciones agrícolas, mientras que las actividades rentables del sector no agrícola los atraen simultáneamente hacia la industria y los servicios[7, 8, 9]. La proporción de la población que trabaja en la agricultura disminuye, por lo tanto, a medida que avanza la transformación agrícola. Con anterioridad a la Revolución Industrial, la mayoría de la población mundial vivía en zonas rurales y sus medios de subsistencia dependían de la producción agrícola primaria. Este ya no es el caso en los países que han experimentado una profunda transformación agrícola. En los Estados Unidos de América, por ejemplo, solo el 1,4 % de la población activa estaba empleada en la agricultura en 2020[10]. En otros países de ingresos altos, también hay una proporción muy pequeña de la población empleada directamente en las explotaciones agrícolas.

Este proceso de transformación agrícola no se produce de forma aislada, sino que implica la transformación de toda la economía. De hecho, el suministro de alimentos suficientes, inocuos y nutritivos para poblaciones cada vez más numerosas y urbanizadas requiere inversiones no solo en la producción agrícola sino también en el transporte, el almacenamiento y la elaboración de alimentos, así como en otros tipos de infraestructura física y del mercado. Se requiere acceso a carreteras y transporte a fin de que los productores agrícolas puedan abastecerse de insumos agrícolas adecuados, incluido capital físico y humano, y tengan acceso a mercados lucrativos para sus productos.

El proceso de automatización de la agricultura tiene lugar actualmente en el contexto de la evolución de los sistemas agroalimentarios. De hecho, la automatización de la agricultura tiene implicaciones para los sistemas agroalimentarios más allá de la agricultura primaria y se ve afectada también por la evolución más allá de la producción primaria. La automatización de la producción primaria puede ser un motor de transformación de los sistemas agroalimentarios, sobre todo si crea nuevas oportunidades empresariales en las fases tanto anteriores como posteriores a la producción. Del mismo modo, la automatización en los sectores anteriores y posteriores tiene implicaciones para la automatización de la producción primaria.

Los efectos dependerán de la dinámica de los sistemas agroalimentarios, sus componentes y los vínculos bidireccionales entre ellos.

La asimilación de la tecnología también es un proceso gradual[11] que requiere práctica, pruebas y adaptación en diversas realidades contextuales, y sus repercusiones tardan en manifestarse. Por ejemplo, aunque el auge de los tractores mecanizados produjo sin dudas muchos beneficios, también tuvo efectos ambientales negativos —en cuanto a la deforestación, la pérdida de biodiversidad y el uso excesivo de combustibles fósiles— que no resultaron evidentes hasta varias décadas más tarde[12, 13]. Puede aplicarse un razonamiento similar a las tecnologías adoptadas en la revolución verde; sin duda, permitieron mejorar de forma sustancial el rendimiento, pero los costos ambientales a largo plazo han sido muy elevados en algunos lugares[13]. ■

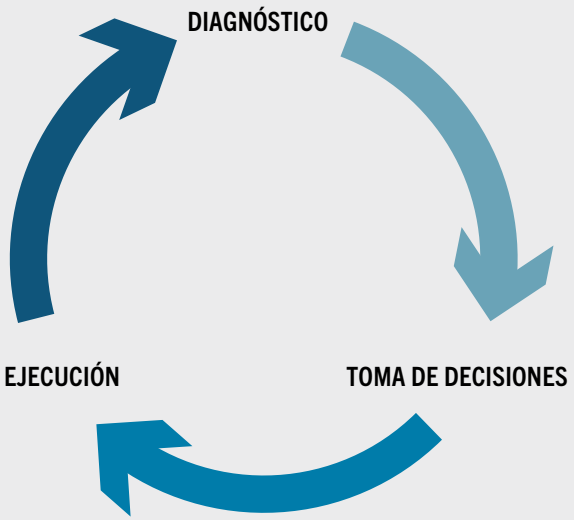
¿QUÉ ES LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA?

La automatización agrícola actual se encuentra al final de una larga evolución de la mecanización a lo largo de la historia de la agricultura. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define la mecanización como el uso de todo tipo de maquinaria y equipo, desde herramientas manuales sencillas y básicas hasta maquinaria más sofisticada y a motor, en las actividades agrícolas[14]. Con la mecanización, por lo tanto, se automatiza únicamente la parte de ejecución del trabajo agrícola, y el grado de automatización aumenta a medida que se pasa de herramientas manuales básicas a maquinaria motorizada.

Dos fases preceden siempre a la ejecución de cualquier actividad agrícola: el diagnóstico y la toma de decisiones. En la Figura 1 (pág. 5) se representan las tres fases como un proceso cíclico con retroalimentación continua entre ellas. La ejecución de cualquier actividad agrícola —desde la cosecha hasta el control de enfermedades y el riego— suele comenzar por el diagnóstico del problema en cuestión para determinar si son medidas precisas y, en su caso, cuáles. A modo de ejemplo, antes de regar, los productores deben saber si las plantas necesitan agua. Del mismo modo, los ganaderos deben conocer el estado de salud de los animales antes de recetar antibióticos. El diagnóstico puede basarse en la experiencia de los productores, pero también puede automatizarse mediante sensores monitoreados por los productores. Una vez realizado el diagnóstico, los productores deciden qué hay que hacer (por ejemplo, la cantidad de irrigación o antibióticos necesarios) y cuándo. Los productores agrícolas pueden tomar decisiones basándose en su experiencia y conocimientos, o bien las decisiones pueden automatizarse mediante controladores que envían señales basadas en la información recibida de los sensores en la fase de diagnóstico. En la tercera y última fase (ejecución), los agricultores pueden realizar las actividades agrícolas directamente, utilizando herramientas manuales o animales, o manejar diversas máquinas. Las tecnologías de automatización más avanzadas permiten automatizar completamente las tres fases. Los robots de recolección de frutas son un buen ejemplo. Estos robots realizan las tres fases de forma secuencial y automática, mientras que los productores agrícolas se limitan a monitorear los sensores y a mantener el equipo.

Cualquier tecnología que automatice al menos una de las tres fases puede clasificarse como una tecnología de automatización. La mecanización motorizada que utiliza potencia motriz[15] se centra esencialmente en la última de las tres fases: la ejecución. Automatiza actividades agrícolas como el arado, la siembra, la aplicación de fertilizantes, el ordeño, la alimentación, la cosecha y el riego, entre muchas otras. Para los fines de este informe, cualquier tecnología que brinde asistencia a los productores agrícolas en una o más de las tres fases de la Figura 1 se considera una tecnología de automatización. Esto incluye situaciones en las que, por ejemplo, los productores agrícolas utilizan sensores para hacer un seguimiento de las plantas y los animales, automatizando de ese modo la fase de diagnóstico, pero toman decisiones basadas en su propia experiencia sin la ayuda de equipos automatizados. En algunos casos, la fase de ejecución también puede incluir la detección (por ejemplo, la creación de mapas de rendimiento durante la cosecha), que luego se utiliza como información para la fase de diagnóstico (de ahí la representación cíclica que se ilustra en la Figura 1).

FIGURA 1 CICLO DE TRES FASES DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN



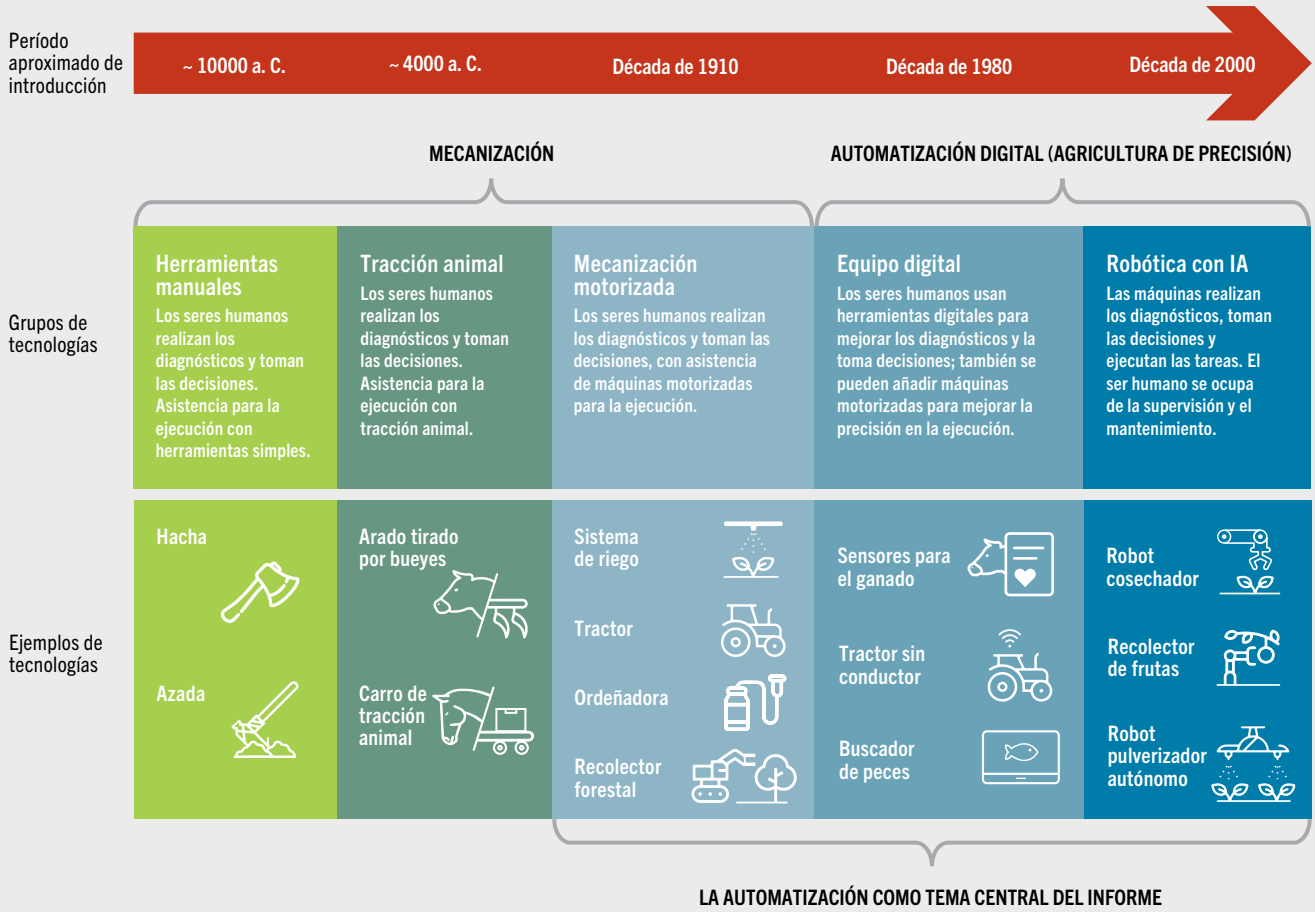
FUENTE: Elaboración de la FAO para este informe.

Con el auge de las tecnologías digitales y de equipo automatizado, como los sensores y los robots, que se basan en el aprendizaje automático y la IA, resulta posible automatizar el diagnóstico y la toma de decisiones. Las máquinas motorizadas se complementan o incluso se sustituyen cada vez más con nuevo equipo digital que automatiza el diagnóstico y la toma de decisiones. Por ejemplo, un tractor convencional puede convertirse en un vehículo automatizado capaz de sembrar un campo de forma autónoma[15]. Por lo tanto, mientras que la mecanización facilita y reduce el trabajo duro y repetitivo y alivia la escasez de mano de obra, las tecnologías de automatización digital mejoran aún más la productividad ya que permiten una ejecución más precisa de las actividades agrícolas y un uso más eficiente de los recursos e insumos. En consecuencia, la automatización digital puede conducir a mejoras de la sostenibilidad ambiental y a una mayor resiliencia frente a las perturbaciones y tensiones climáticas. Sin embargo, los posibles efectos sobre la mano de obra exigen una cuidadosa consideración, como se explica más adelante en el informe.

La Figura 2 (pág. 6) representa esta evolución tecnológica, ilustrando la progresión de las tecnologías agrícolas, con ejemplos de cada una de ellas, desde las que ayudan únicamente en la ejecución física de las actividades hasta aquellas que ayudan en el diagnóstico y la toma de decisiones. La evolución tecnológica puede resumirse a través de las siguientes categorías de tecnologías:

- **Herramientas manuales**: los seres humanos realizan el diagnóstico y toman las decisiones, mientras que la ejecución está asistida por herramientas sencillas, como hachas y azadas.
- **Tracción animal**: los seres humanos siguen realizando el diagnóstico y tomando las decisiones, pero las actividades agrícolas físicas son ejecutadas, o facilitadas, por animales que manejan maquinaria agrícola, como arados.
- **Mecanización motorizada**: los seres humanos siguen realizando el diagnóstico y tomando las decisiones, pero las actividades son ejecutadas

FIGURA 2 EVOLUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA



FUENTE: Elaboración de la FAO para este informe.

por maquinaria y equipo motorizados. Esta categoría marca un cambio en la fuente de energía utilizada en la explotación agrícola: pasa de ser interna (por ejemplo, músculo humano y animales) a ser externa (por ejemplo, combustibles fósiles y electricidad). Sin embargo, este cambio requiere una infraestructura específica para garantizar la disponibilidad continua de estas fuentes de energía.

- **Equipo digital**: un amplio abanico de instrumentos digitales ayuda al ser humano a mejorar el diagnóstico o la toma de decisiones, automatizando el trabajo mental o aumentando la precisión de la maquinaria motorizada.

- **Robótica con IA**: los seres humanos se apoyan en robots agrícolas que utilizan la IA para todas las funciones de diagnóstico, toma de decisiones y ejecución. Pueden ser estáticos (por ejemplo, robots de ordeño) o móviles (por ejemplo, robots recolectores de fruta). Los seres humanos supervisan los sensores y mantienen los robots. Esta categoría incluye las tecnologías de automatización más avanzadas, algunas de las cuales todavía no se aplican a gran escala o están aún en fase de desarrollo.

Lamentablemente, esta diversidad de herramientas y tecnologías ha contribuido a una falta de coherencia de las definiciones de la automatización agrícola en la bibliografía, lo que ha dificultado los esfuerzos

de recopilación de datos sobre la automatización[11]. Por ejemplo, algunos definen la automatización agrícola como la navegación autónoma de robots, sin intervención humana, que proporcionan información precisa para ayudar a llevar a cabo las actividades agrícolas[16]. Otros la definen como la realización de tareas de producción mediante dispositivos mecatrónicos móviles, autónomos y con capacidad para tomar decisiones[17]. Sin embargo, estas definiciones son muy restrictivas y no recogen todos los aspectos y formas de la automatización; un ejemplo de ello es el equipo estático, como las ordeñadoras robotizadas. Además, las definiciones excluyen no solo la mayor parte de la maquinaria motorizada que automatiza la ejecución de las actividades agrícolas, sino también los instrumentos digitales (por ejemplo, los sensores) que solo automatizan el diagnóstico.

En la Figura 2 se presenta una simplificación de la realidad histórica de la evolución de las tecnologías de automatización; puede haber superposiciones y zonas grises entre las categorías. Sin embargo, ayuda a esbozar el eje temático de este informe y a definir la automatización agrícola. El concepto de automatización agrícola se aplica a los tres recuadros sombreados en azul, que constituyen el tema central del informe. Sobre esta base, se propone la siguiente definición de automatización agrícola:

> el uso de maquinaria y equipo en las actividades agrícolas para mejorar el diagnóstico, la toma de decisiones o la ejecución, reduciendo el trabajo agrícola pesado o mejorando la puntualidad, y posiblemente la precisión, de las actividades agrícolas.

Según esta definición, la automatización de la agricultura incluye la agricultura de precisión, que es una estrategia de gestión con la que se reúnen, procesan y analizan datos para mejorar las decisiones de gestión (véase el Glosario).

A partir del primer recuadro sombreado en azul de la Figura 2, la mecanización motorizada incluye máquinas manejadas por seres humanos para realizar tareas como la labranza, el riego y el ordeño. Sin embargo, el ser humano realiza el diagnóstico basándose en su propia observación o en la medición de parámetros sencillos; a continuación, toma decisiones basadas en la experiencia (interna o externa), sus conocimientos y los recursos disponibles. Las dos últimas categorías de la Figura 2 abarcan la automatización digital. Incluyen una amplia variedad de instrumentos, equipo y programas informáticos que son, o pueden ser, multifuncionales e interdisciplinarios, lo que permite que la gestión de los recursos en todo el sistema sea altamente optimizada, individualizada, inteligente y prospectiva[18]. A medida que se desarrollan tecnologías de automatización digital (robótica con IA), las tres fases —diagnóstico, toma de decisiones y ejecución— pueden automatizarse, y el papel del ser humano se limita en gran medida a monitorear y mantener el equipo de automatización. Este es el caso del recolector de fruta, por ejemplo: cuando el brazo recolector recibe un mensaje del controlador, en función de la información de los sensores, procede a recoger la fruta.

La automatización puede abarcar cualquiera de las tres fases o una combinación de las tres fases conectadas. Por ejemplo, el diagnóstico puede ser realizado por sensores, mientras que la toma de decisiones y la ejecución dependen totalmente de seres humanos. Como alternativa, tanto el diagnóstico como la toma de decisiones pueden ser realizados mediante tecnologías digitales, mientras que la ejecución es realizada por seres humanos. Un ejemplo de un sistema totalmente automatizado en el que las tres fases están automatizadas es el robot pulverizador autónomo: el sistema obtiene primero datos sobre la fertilidad del suelo, luego decide la zona de operación y la dosis de aplicación y, por último, aplica el fertilizante en función de esa dosis variable. ■

¿POR QUÉ NECESITAMOS APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA? COMPRENSIÓN DE LOS PRINCIPALES FACTORES

La automatización agrícola forma parte de una transformación más amplia de los sistemas agroalimentarios. Ayuda a los productores agrícolas a mantener o ampliar la producción a medida que los trabajadores abandonan

la agricultura y se trasladan a sectores de la economía que ofrecen mejor remuneración. La automatización, además de reducir las necesidades de mano de obra en la agricultura, puede impulsar aún más la transformación de los sistemas agroalimentarios ya que genera oportunidades de empleo en otras etapas de esos sistemas. Históricamente, a medida que los países se desarrollan, puestos de trabajo más atractivos alejan a los trabajadores de la agricultura y las innovaciones que ahorran mano de obra aumentan la productividad agrícola, dado que reducen las necesidades de mano de obra por unidad de producción[7, 8, 9]. Como resultado de esta combinación de tendencias de la oferta y la demanda de mano de obra, la proporción de la población empleada en la agricultura ha disminuido con el tiempo, incluso en los países de ingresos bajos y medianos bajos (véase la Figura 3 en la pág. 9).

Esta transformación va acompañada de un aumento de las innovaciones, los cambios tecnológicos y las inversiones, todos ellos componentes críticos del desarrollo socioeconómico, y que afectan a los sistemas agroalimentarios más allá de la etapa primaria. Por ejemplo, a fin de suministrar alimentos suficientes, inocuos y nutritivos a una población cada vez más urbana y con mayor poder adquisitivo, se necesitan inversiones, no solo en agricultura sino también en transporte, almacenamiento y elaboración de alimentos e infraestructura. Por lo tanto, existen vínculos en un sentido y otro que conectan al sector agrícola con el sector no agrícola[20]. Como parte de esta transformación de los sistemas agroalimentarios, la automatización agrícola puede arrojar múltiples beneficios, que se examinan a continuación.

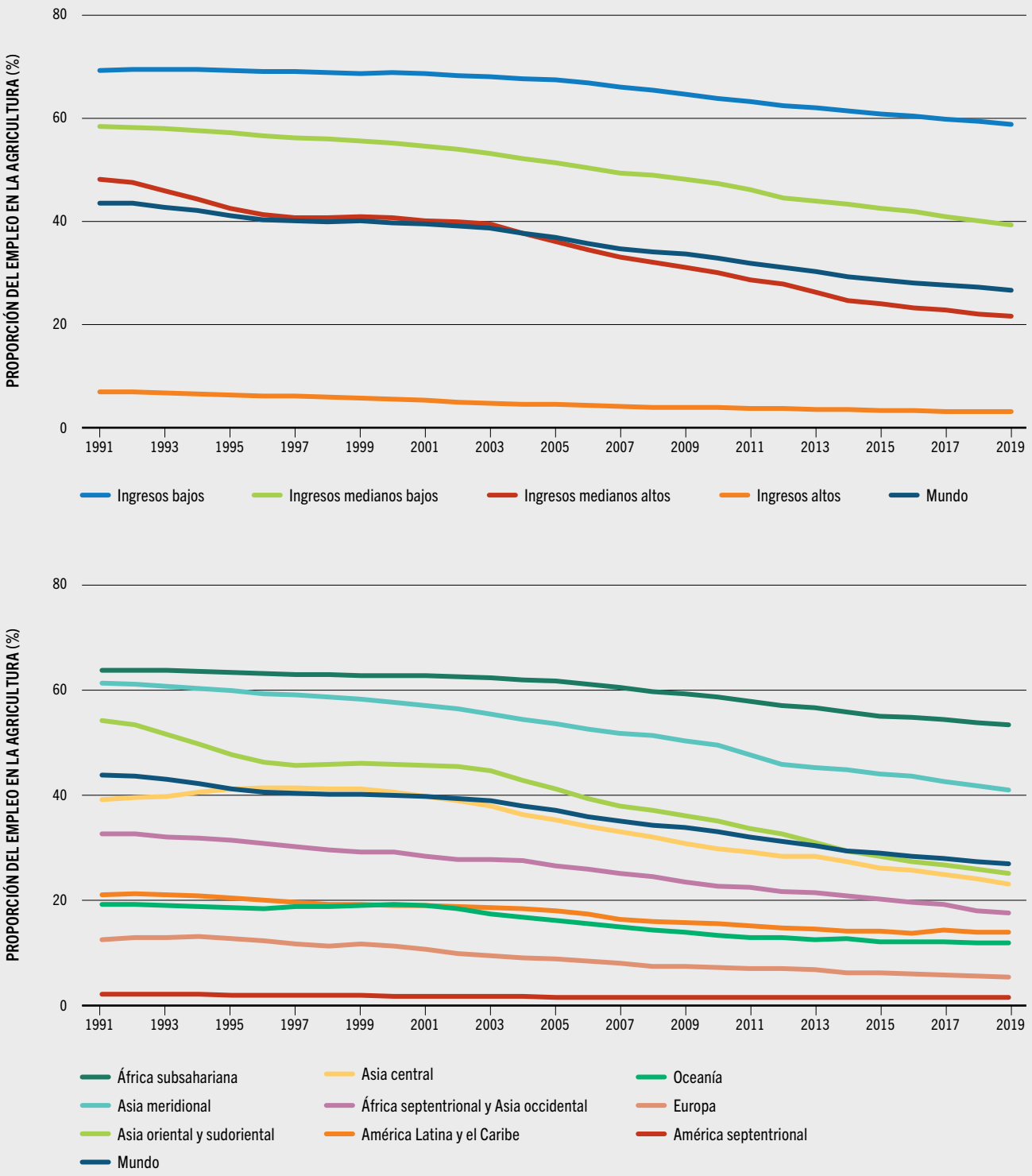
Oportunidades para los productores agrícolas

La automatización agrícola presenta muchas oportunidades, tanto para la producción primaria como para los sistemas agroalimentarios en general. Puede ayudar a aumentar la productividad y la rentabilidad de la tierra y el trabajo, por ejemplo, mediante una gestión más oportuna y cuidadosa de los cultivos y el ganado[21, 22, 23]. Esto, a su vez, contribuye a aumentar los ingresos[24], a reducir los riesgos, a incrementar la resiliencia y a mejorar la sostenibilidad ambiental. Con el avance de las tecnologías digitales, la automatización de la agricultura puede volverse neutral en cuanto a la escala; es decir, puede incluir soluciones de automatización para todas las escalas (productores grandes, medianos y pequeños) y, por lo tanto, puede ser accesible también para los pequeños productores. Esto puede ocurrir mediante el desarrollo de máquinas y equipo pequeños adaptados a las condiciones de las explotaciones y unidades de producción pequeñas, o mediante acuerdos de distribución de activos basados en plataformas digitales (véase el Capítulo 3).

La automatización agrícola también puede fomentar el empleo decente dado que posibilita condiciones de trabajo mejores y más seguras, así como un ingreso vital adecuado, y reduce la carga de trabajo de la agricultura, gran parte de la cual recae en miembros no remunerados de la familia, como las mujeres y los niños[25, 26]. Esto puede liberar tiempo para que los adultos se dediquen a otras actividades de adición de valor o a trabajos no agrícolas y realicen actividades de cuidado o preparación de alimentos[27], y para que los niños jueguen y asistan a la escuela[26, 28, 29]. Los datos sugieren que los beneficios que ofrece el ordeño mecanizado en cuanto al estilo de vida —liberar tiempo para que los productores realicen otros trabajos, pasen tiempo con su familia o disfruten de una jornada laboral más flexible— son los más valorados por los usuarios[30, 31]. Las repercusiones positivas relacionadas con la reducción del trabajo pesado pueden empoderar especialmente a las mujeres rurales, que ganan tiempo para emprender nuevas iniciativas productivas o para ampliar las actividades que desarrollan en los sistemas agroalimentarios. También ayuda a atraer a los jóvenes al sector.

Otra dimensión importante de la automatización de la agricultura es su potencial para generar oportunidades de emprendimiento rural. Por ejemplo, una de las principales limitaciones de la producción ecológica es el costo y la disponibilidad de la mano de obra. Aunque en muchos países hay una fuerte demanda de productos ecológicos, los consumidores son reacios a pagar mucho más por ellos. Los robots para el deshierbe, la cosecha selectiva y otras actividades en los campos podrían reducir en

FIGURA 3 PROPORCIÓN DEL EMPLEO EN LA AGRICULTURA RESPECTO DEL EMPLEO TOTAL POR GRUPO DE INGRESOS (ARRIBA) Y REGIÓN (ABAJO), 1991-2019



FUENTE: FAO, 2022[19].

gran medida el costo de la producción ecológica, creando así oportunidades para más productores.

Anteriormente, para ejecutar satisfactoriamente determinadas actividades de forma automatizada con maquinaria motorizada, era necesario adaptar la producción agrícola. Por ejemplo, cuando se adoptaron las cosechadoras de tomates en los Estados Unidos de América, se desarrolló una variedad de tomate que maduraba uniformemente en la planta y tenía una piel dura que no se rompía fácilmente al ser manipulada bruscamente por una máquina[32]. Los nuevos avances en las tecnologías de automatización digital pueden ofrecer soluciones para actividades agrícolas mucho más refinadas. Por ejemplo, los ingenieros buscan actualmente soluciones robóticas que permitan cosechar mecánicamente fresas, uno de los cultivos más delicados y que requieren más mano de obra.

Fuera de las explotaciones agrícolas, las tecnologías de elaboración, conservación, almacenamiento y transporte pueden ayudar a reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos, mejorar la inocuidad de los alimentos y facilitar la adición de valor[33], todos ellos aspectos necesarios para que los sistemas agroalimentarios sean eficientes y puedan ofrecer dietas saludables para todas las personas de forma sostenible. La automatización también puede posibilitar condiciones de trabajo más seguras para los trabajadores, por ejemplo, reduciendo los riesgos ocupacionales relacionados con el uso de plaguicidas.

Cómo cubrir el déficit de mano de obra

En relación con el empleo, la automatización de la agricultura ha sido aclamada como una solución a la urgente escasez de mano de obra rural, que se da sobre todo en los países de ingresos altos (véase la Figura 3). Las estadísticas muestran que 2,5 millones de trabajadores abandonaron la agricultura en la Unión Europea en los últimos 10 años, y se prevén nuevos descensos del 2 % anual hasta 2030[34]. El principal motivo es el escaso atractivo de la agricultura como carrera profesional (condiciones de trabajo duras, salarios bajos, falta de perspectivas, etc.). Los confinamientos y el distanciamiento social relacionados con la enfermedad por coronavirus (COVID-19) agravaron la escasez de mano de obra, y los acontecimientos políticos que condujeron a reglamentos y políticas de inmigración han restringido el acceso a mano de obra estacional e inmigrante.

Muchas empresas agrícolas, especialmente aquellas dedicadas a la producción de frutas y hortalizas, dependen de la mano de obra humana para ejecutar tareas como la recolección, el envasado y el tratamiento de enfermedades. Otros sectores, como la producción ganadera, también pueden requerir una importante fuerza de trabajo. Las soluciones de automatización podrían cubrir déficits importantes de mano de obra y permitir a los productores agrícolas adaptarse a las crisis repentinas que perturban los mercados de trabajo, lo que conduciría a mejorar la resiliencia. Al mismo tiempo, estas soluciones pueden contribuir al empleo decente, creando un gran número de empleos cualificados que proporcionen un ingreso vital adecuado y condiciones de trabajo razonables, que atraigan a trabajadores jóvenes cualificados[35]. Se precisan capacitación y desarrollo de la capacidad para lograr que la transición sea fluida e inclusiva (véanse los capítulos 4 y 5).

Dada la menor disponibilidad de mano de obra rural en todo el mundo a medida que las economías siguen transformándose (véase la Figura 3), el mantenimiento y la mejora de la productividad agrícola requerirán probablemente la automatización, al menos para realizar las tareas con un alto coeficiente de mano de obra. En muchas partes del mundo, la disminución de la oferta de mano de obra rural ha provocado un aumento de los salarios agrícolas, promoviendo una mayor adopción de tecnologías que ahorran mano de obra[3, 36].

Cambios en las modalidades de consumo

La globalización ha contribuido a cambiar los hábitos alimentarios, las preferencias alimenticias y la demanda de los consumidores, y también ha dado lugar a normas de inocuidad de los alimentos más estrictas[37]. Los consumidores, especialmente en los países de ingresos altos, se preocupan cada vez más por lo que comen y por la manera en que se producen, procesan y transportan los alimentos que consumen[38]. También existe una mayor preocupación por los diversos peligros para la salud derivados de las enfermedades de plantas y

animales o del uso excesivo de plaguicidas y otros productos químicos. Las tecnologías avanzadas de automatización digital pueden facilitar la detección oportuna de los puntos en que se producen brotes y permitir un tratamiento temprano y preciso, salvaguardando de ese modo la seguridad de los consumidores y limitando las pérdidas financieras de los productores. Esto es especialmente importante en la producción ganadera (alrededor del 60 % de las enfermedades infecciosas emergentes proceden de los animales), en la que los sistemas automatizados pueden desempeñar un papel eficaz en la prevención y el control de las zoonosis[39]. Las tecnologías de automatización digital también pueden conducir a una reducción del uso de plaguicidas y productos químicos en los cultivos, dado que las plagas y enfermedades se tratan con mayor precisión, asegurando una protección eficaz de las plantas con riesgos mínimos para la salud. Estas tecnologías, gracias a su extraordinaria precisión y a su capacidad para seguir los procedimientos de inocuidad de los alimentos de forma normalizada, pueden prevenir y controlar las plagas y enfermedades mejor que el ser humano, lo que se traduce en importantes mejoras en la inocuidad de los alimentos. No solo matan los patógenos y bloquean las vías de transmisión con mayor eficacia, sino que también reducen al mínimo el uso de productos químicos[40].

La creciente preocupación de los consumidores por la calidad, el sabor y la frescura de los alimentos incentiva aún más la inversión en tecnologías de automatización digital (por ejemplo, sensores y sistemas cartográficos) que ayudan a controlar las condiciones de temperatura y humedad. La rápida evolución de las preferencias y necesidades de los consumidores es, por lo tanto, un factor fundamental de la implementación de la automatización de la agricultura[41].

Sostenibilidad ambiental y bienestar animal

La automatización agrícola es esencial para el futuro de los sistemas agroalimentarios, dada la creciente preocupación por temas ambientales y éticos que rodea a la producción y el consumo de alimentos. Las tecnologías de automatización digital, en particular, pueden producir muchos beneficios. Los enjambres de pequeños robots autónomos (véase el Glosario) podrían reducir la compactación del suelo y la contaminación de los ríos, facilitando la agricultura de conservación que, a su vez, mejora la conservación de las tierras y el suelo, la biodiversidad para la alimentación y la agricultura y los servicios ecosistémicos dentro de los sistemas agrícolas[42]. Las tecnologías de automatización digital también pueden optimizar el uso de recursos naturales como el agua, por ejemplo, mediante el riego automatizado. En el sector de los frutos blandos, los robots autónomos podrían reducir el uso de fungicidas y energía, además de disminuir las emisiones de carbono si se alimentan con energía solar. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta el proceso de construcción de robots y otras tecnologías utilizadas en la agricultura de precisión, que consume mucha energía, a la hora de medir las huellas de carbono[43].

La automatización agrícola puede ayudar a abordar algunas de las dificultades relacionadas con el cambio climático y facilitar así los esfuerzos de adaptación. Este es el caso, en particular, de las tecnologías de automatización digital: mediante su aplicación (por ejemplo, en la agricultura de precisión) puede mejorarse la eficiencia en el uso de los recursos ante las limitaciones cada vez mayores de los productores agrícolas. Además, cuando se aplican a la detección y a la alerta temprana, pueden ayudar a hacer frente a la incertidumbre y a la imprevisibilidad de las condiciones meteorológicas relacionadas con la aceleración del cambio climático.

A medida que aumenta el tamaño de los rebaños, con un menor bienestar de los animales, el manejo del ganado se torna cada vez más difícil[44]. En este contexto, las nuevas tecnologías de automatización, como la ganadería de precisión, pueden ayudar a los ganaderos a supervisar y controlar la productividad de los animales, el impacto ambiental y los parámetros de sanidad y bienestar de forma continua, automatizada y en tiempo real[45]. Una serie de sistemas que utilizan tecnologías como sensores, cámaras o micrófonos pueden detectar anomalías y alertar directamente a los ganaderos, permitiéndoles intervenir en una fase temprana. Si bien el potencial de estas tecnologías es prometedor, su uso plantea problemas éticos, debido a sus posibles repercusiones en la relación entre seres humanos y animales —una cuestión crítica, ya que puede influir tanto en el bienestar como en la

productividad de los animales—, en particular, la cosificación de estos, y el concepto de cuidado y la identidad de los ganaderos como cuidadores de animales[46, 47]. Al evaluar las distintas tecnologías, es necesario tener en cuenta tanto los beneficios como los problemas éticos.

El grado en que la automatización digital puede contribuir a una agricultura más eficiente, productiva, inclusiva, resiliente y sostenible depende en gran medida de los progresos que se logren para superar los obstáculos para su adopción. Para ello, se requieren tanto un entorno propicio como soluciones adecuadas que se adapten a las necesidades y condiciones locales. ■

DIFICULTADES QUE PLANTEA EL PROGRESO DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

Al igual que todo avance tecnológico, la automatización agrícola puede tener consecuencias sociales y ambientales negativas. Por lo tanto, si bien se prometen los beneficios mencionados, es posible que estos no se produzcan automáticamente y dependan de una gestión adecuada. Los factores estructurales de la agricultura y de la economía en general pueden obstaculizar la adopción inclusiva y sostenible de la automatización agrícola. La fragmentación de las tierras, por ejemplo, es una grave limitación en muchas regiones y puede hacer que la automatización agrícola sea económicamente inviable. La falta de infraestructura adecuada, como carreteras, conectividad y electricidad, también puede condicionar la adopción y excluir a los productores que trabajan en zonas más desfavorecidas y remotas. En determinadas condiciones, la automatización agrícola puede desplazar la mano de obra rural y tener consecuencias negativas para el medio ambiente, como la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad. Estas dificultades se presentan en las secciones siguientes y se examinan más detalladamente en los capítulos 2 y 4.

Desigualdad en cuanto a la capacidad

Es posible que los beneficios que promete la automatización agrícola no se distribuyan de forma equitativa entre los productores y otras partes interesadas, exacerbando las desigualdades sociales y creando nuevas desigualdades al favorecer a actores ya poderosos en la producción de alimentos[48, 49]. Este puede ser el caso, en particular, si las empresas tecnológicas —que ya son grandes y tienen un poder de mercado considerable— retienen y poseen los datos, que pueden utilizar de maneras que no se ajustan a las políticas de protección de datos, lo que conduce a la creación de monopolios de datos[50]. Las desigualdades también pueden verse exacerbadas si los productores más grandes, más ricos y con más instrucción tienen mayor capacidad (por ejemplo, fondos, infraestructura rural, competencias) para invertir en nuevas tecnologías o para reciclarse y adquirir nuevas competencias. De hecho, muchos agricultores pueden carecer de la capacidad básica para manejar las tecnologías de automatización digital o entender su funcionamiento. Un buen profesional agrícola no es necesariamente un experto en tecnologías digitales, y lo mismo ocurre con los agentes de extensión y los proveedores de servicios. La creación de capacidad y la adaptación de la agricultura son esenciales para la adopción de equipo automatizado y su correcta utilización; los agricultores pueden aprovechar todo el potencial de la automatización únicamente si cuentan con la capacidad necesaria[15].

En este sentido, las mujeres suelen estar más marginadas que los hombres en cuanto a las oportunidades de instrucción[18] y tienen menor acceso a financiación[51]. Los hombres suelen hacerse cargo de la compra y la venta de los cultivos y poseer y manejar los nuevos equipos, reduciendo el control de las mujeres sobre los ingresos producidos y relegándolas a las tareas que requieren más mano de obra, como el deshierbe y el trasplante[52]. Asimismo, los jóvenes rurales, especialmente las mujeres, enfrentan importantes obstáculos para obtener educación y capacitación de calidad, así como para acceder a las tierras, el crédito o los mercados[53].

Perturbaciones del mercado laboral

Según datos comprobados recientes de otros sectores, la automatización puede aumentar la

demanda de puestos de trabajo mejor remunerados que requieren educación secundaria, en los que los seres humanos tienen una ventaja comparativa sobre las máquinas (por ejemplo, gestión y análisis de datos), pero reducir la demanda de puestos de trabajo que implican tareas rutinarias (por ejemplo, la siembra y la cosecha)[54, 55]. A medida que los países se desarrollan, las cifras del empleo total en la agricultura disminuyen; sin embargo, todavía hay aproximadamente entre 300 y 500 millones de trabajadores asalariados que dependen de trabajos agrícolas[56]. En muchos países, la proporción de la mano de obra en la agricultura sigue siendo elevada —por ejemplo, en Burundi (86 %), Somalia (80 %), Malawi (76 %), Chad (75 %), Níger (73 %) y Uganda (72 %)— y esto va a menudo acompañado de elevadas tasas de analfabetismo, pobreza y desigualdad de género.

En estos países, una reducción de las necesidades de mano de obra directa por unidad de producción puede crear desigualdades o agravar las ya existentes. Por este motivo, en algunos contextos, la automatización agrícola puede ser poco atractiva e inviable desde el punto de vista político. En última instancia, las repercusiones en la mano de obra y los salarios estarán determinadas por una serie de factores, como la capacidad para generar puestos de trabajo nuevos y más atractivos u opciones alternativas de empleo decente fuera del sector agrícola. También dependerán de si los efectos de escala —cuando los agricultores amplían la escala de su producción y aumentan sus ingresos— superan los efectos de sustitución cuando la mano de obra es expulsada del sector[57]. Sin embargo, con políticas y un entorno legislativo y reglamentario adecuados, la automatización agrícola puede crear oportunidades económicas, fomentar empleo decente que proporcione un ingreso vital adecuado y condiciones de trabajo razonables, así como atraer nuevamente a los jóvenes al sector agrícola.

Preocupaciones relacionadas con el medio ambiente

Existe la preocupación de que, si no se gestionan bien, algunos tipos de automatización agrícola, especialmente aquellos que dependen de maquinaria pesada y de gran tamaño, pueden poner en riesgo la sostenibilidad y la resiliencia del medio ambiente, ya que contribuyen a la deforestación, al monocultivo de tierras agrícolas, a la pérdida de biodiversidad, a la degradación de las tierras, a la compactación y erosión del suelo, a la acumulación de salinidad y al mal funcionamiento de los sistemas de drenaje[58]. Aunque estas preocupaciones deben considerarse con seriedad, muchas pueden evitarse o reducirse al mínimo con políticas y legislación adecuadas. Además, determinados avances recientes en la maquinaria y el equipo de automatización —especialmente el equipo pequeño basado en la IA— pueden invertir algunos de los efectos negativos en el medio ambiente de la maquinaria de automatización antigua (véase el Capítulo 3).

Las posibles oportunidades, dificultades y consecuencias de la automatización agrícola dependen de la tecnología específica que se utilice y de su diseño, así como del grado en que se ajuste a las condiciones locales y se adapte a la realidad local. Además, el nivel de desarrollo socioeconómico, junto con las limitaciones institucionales y políticas, determina la combinación de tecnologías adecuadas que probablemente se adopten. En consecuencia, los efectos —positivos y negativos— de la automatización de la agricultura dependen en gran medida del contexto. Es importante evaluar si las condiciones ambientales, sociales y políticas son las adecuadas en cada país o región antes de proponer soluciones de automatización concretas. No todas las tecnologías de automatización se adaptan a todos los contextos, y puede ser necesario considerar versiones adaptadas. ■

CONVERTIR LOS RETOS EN OPORTUNIDADES

Para que pueda aprovecharse todo su potencial, las tecnologías de automatización agrícola deben ser accesibles para todos, sobre todo para los pequeños productores agrícolas de los países de ingresos bajos, donde las herramientas manuales y la tracción animal siguen siendo de uso común, lo que perjudica a la productividad agrícola y afecta negativamente a los medios de vida. En otras palabras, el proceso de automatización debe ser neutral en cuanto a la escala. En circunstancias favorables, puede ser posible incluso dar un salto en la evolución tecnológica, pasando directamente de la agricultura de baja tecnología basada en el trabajo manual o la tracción de los animales de tiro

a la automatización de la agricultura. Esto puede lograrse mediante tecnologías que son neutrales en cuanto a la escala por su propio diseño, mediante arreglos institucionales innovadores (por ejemplo, cooperativas y asociaciones) o mediante mecanismos de mercado que permitan a los pequeños productores agrícolas superar las limitaciones de escala. Por ejemplo, puede ponerse a disposición de los agricultores locales equipo agrícola caro y complejo a través de proveedores de servicios de alquiler, que a menudo son productores que han invertido en animales de tiro o tractores y equipo similares.

Los instrumentos digitales también son muy prometedores para los servicios de alquiler. Pueden crear nuevos modelos empresariales para la adopción de tecnologías de automatización por parte de los pequeños productores agrícolas. Uno de estos planes es "Uber para tractores"; es similar a la aplicación de taxis Uber, y permite a los productores acceder a servicios de alquiler de tractores. La robótica y la IA se basan en tecnologías digitales; por lo tanto, los países deben impulsar un mayor acceso a las tecnologías digitales, promoviendo la infraestructura esencial, marcos jurídicos adecuados y los conocimientos y aptitudes necesarios.

A tal fin, tanto los productores agrícolas como los gobiernos deben reconocer primero los beneficios económicos, sociales y ambientales de la difusión y adopción de las tecnologías digitales. Posteriormente, resulta esencial garantizar la disponibilidad, la inclusión, la accesibilidad y la adaptabilidad a las condiciones locales, a fin de llegar a un amplio abanico de posibles beneficiarios, evitando que se amplíen las brechas tecnológicas que ponen en desventaja a los grupos vulnerables (por ejemplo, las mujeres) y a los territorios remotos. En 2018, la FAO y la Comisión de la Unión Africana presentaron el Marco para la mecanización agrícola sostenible en África, que ofrece un conjunto de elementos prioritarios que los países pueden considerar al elaborar sus estrategias para la mecanización agrícola sostenible[59]. Según este marco, la mecanización debe incorporarse a lo largo de toda la cadena de valor agrícola, ser impulsada por el sector privado, ser compatible con el medio ambiente y ser climáticamente inteligente, además de ser económicamente viable y asequible, especialmente para los pequeños agricultores, que constituyen el grueso de los agricultores africanos. También es fundamental que se dirija a las mujeres y a los jóvenes, concretamente para hacer de la agricultura una opción más atractiva para el empleo decente y el espíritu empresarial.

Por lo tanto, a la hora de fomentar la adopción de la automatización, es importante centrarse en tecnologías adaptadas a las condiciones locales y a las necesidades específicas de los productores; una tecnología simplemente extraída de un contexto puede no resolver problemas tangibles en un contexto diferente. A este respecto, diversos estudios demuestran que los propios agricultores pueden liderar la innovación. Por ejemplo, en Myanmar, gracias a la adopción de técnicas de impresión en 3D está mejorando la eficiencia agrícola y se está empoderando a los trabajadores de las zonas rurales más pobres, ya que les permite participar de forma individual y creativa en la producción de materiales agrícolas, piezas de maquinaria agrícola y herramientas[60]. A medida que se reconoce cada vez más a los productores agrícolas como líderes de la innovación en el desarrollo tecnológico, la terminología y los enfoques pertinentes han evolucionado para incorporar el pensamiento sistémico en la innovación, haciendo hincapié en la implicación de las partes interesadas, incluidos los agricultores y los asesores agrónomos, a diferentes niveles. Es necesario centrarse en el intercambio de conocimientos, la colaboración y la participación, así como en la producción conjunta de ideas y soluciones por parte de agentes públicos y privados[61].

Las soluciones de automatización deben tener en cuenta los sistemas de innovación agrícola específicos de cada país y región; un enfoque único para su adopción en todo el mundo no dará resultado. Es necesario actuar con cautela cuando se busca aplicar una solución comprobada en un entorno nuevo o en una situación diferente. El contexto de aplicación es de fundamental importancia. ■

¿EN QUÉ SE CENTRA EL INFORME?

En el presente informe se examina el papel de la automatización en la producción agrícola primaria (cultivos, ganadería, actividad forestal, pesca y acuicultura). En lo que respecta a los sistemas agroalimentarios más amplios, también se aborda la automatización en las etapas posteriores de la cadena de valor cercanas a la producción primaria, como la manipulación posterior a la cosecha y la elaboración en la explotación; sin embargo, la atención se centra en la etapa primaria. El alcance se limita a la producción primaria y a las etapas iniciales de la cadena de valor, basándose en dos consideraciones. En primer lugar, la automatización de la producción primaria y de otras actividades en la explotación agrícola es fundamental para alcanzar varios ODS relacionados con la mejora de la seguridad alimentaria y la nutrición, la mitigación de la pobreza (rural) y la mejora de la sostenibilidad ambiental. Ante las crecientes perturbaciones y tensiones, la automatización agrícola también puede contribuir a crear medios de vida rurales resilientes. Además, puede contribuir a lograr condiciones de trabajo más seguras para los productores y trabajadores agrícolas. En segundo lugar, aunque en el informe se reconoce que la automatización agrícola no se produce de forma aislada con respecto a procesos de transformación similares en otros componentes de los sistemas agroalimentarios, un análisis en profundidad de los factores y las repercusiones de la automatización más allá de la producción primaria sería demasiado complejo y difícil para una sola edición de este informe.

Por lo tanto, el informe se centra en investigar de qué manera la automatización de la agricultura y las primeras etapas de la cadena de suministro de alimentos puede apoyar el aumento sostenible e inclusivo de la productividad en la agricultura y los sistemas agroalimentarios en general y contribuir a la consecución de los ODS. En particular, en el informe se examina cómo abordar los obstáculos para la adopción y lograr que los cambios a los que da lugar la automatización sean más inclusivos y estén en consonancia con los objetivos de reducción de la pobreza, mejora de la seguridad alimentaria y la nutrición y sostenibilidad ambiental.

En el informe se abordan las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los factores que impulsan y los obstáculos que impiden la adopción de la automatización agrícola, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos bajos?
- ¿Cuáles son los aumentos de eficiencia que ayudan a demostrar que la automatización tiene sentido?
- ¿Cómo puede adaptarse la automatización a las necesidades de los diversos pequeños productores, en particular las mujeres y los jóvenes?
- ¿Cuáles son las repercusiones probables de la automatización en el trabajo, el empleo decente y la inclusión?
- ¿Cómo puede la automatización facilitar la sostenibilidad del medio ambiente y la resiliencia frente a perturbaciones y tensiones?

El informe se basa en los datos de 27 estudios de casos que abarcan tecnologías a lo largo del espectro de automatización que se presenta en la Figura 2 (pág. 6), a diferentes escalas de producción (pequeña, mediana, grande) y en diferentes sectores (cultivos, ganado, acuicultura, agroforestería). Los estudios de casos se centran en proveedores de servicios de diferentes tipos, como empresas privadas, organizaciones sin fines de lucro y asociaciones de productores de todas las regiones del mundo. En el Cuadro 1 se ofrece un resumen de la cobertura de los estudios de casos en cuanto a los tipos de tecnologías utilizadas, la escala de los productores destinatarios y su sistema de producción. En el Anexo 1 se incluye una descripción resumida de cada estudio de casos, y en los dos estudios técnicos encargados para este informe se ofrece una descripción más detallada[62, 63]. El informe también se basa en otros cuatro documentos de referencia en los que se sintetizan las pruebas derivadas de la bibliografía y los datos disponibles[20, 64, 65, 66]. En relación con las áreas no incluidas en los documentos y estudios de casos encargados a estos efectos, como la actividad forestal o la mecanización a pequeña escala, el informe se basa en casos presentados en la bibliografía, así como en datos de estudios, a saber, la base de datos del Sistema de información sobre medios de vida rurales (RuLIS) de la FAO y el Estudio de medición de los niveles de vida (EMNV) del Banco Mundial.

CUADRO 1 NÚMERO DE ESTUDIOS DE CASOS POR TAMAÑO DEL PRODUCTOR, NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN Y SECTOR

CONTINUO DE AUTOMATIZACIÓN	TAMAÑO DE LA EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA		
	Pequeña escala	Mediana escala	Gran escala
Mecanización motorizada	Cultivos (3) Ganadería (1)	Cultivos (2) Ganadería (1)	Cultivos (1) Ganadería (1)
Equipo digital	Agroforestería (1) Acuicultura (2) Cultivos (11) Ganadería (4)	Acuicultura (2) Cultivos (9) Ganadería (3)	Cultivos (12) Ganadería (2)
Robótica con IA	Acuicultura (1) Cultivos (1)	Acuicultura (1) Cultivos (4) Ganadería (2)	Cultivos (5) Ganadería (2)

Agroforestería · Acuicultura · Cultivos · Ganadería

NOTAS: Los números entre paréntesis indican el número de estudios de casos que abarcan un sector y un tamaño de producción determinados. Un estudio de casos puede abarcar más de una dimensión; por ese motivo, la suma de los números entre paréntesis es mayor de 27. No se halló ningún caso en el que los pequeños agricultores utilizaran robótica con inteligencia artificial (IA); sin embargo, en un documento de antecedentes específico se examina el potencial de la tecnología para los pequeños agricultores[65].
FUENTE: Elaboración de la FAO para este informe.

El desglose de los casos prácticos refleja las principales dificultades y oportunidades y las posibles consecuencias de la adopción de la automatización en diferentes contextos. Estas tienen que ver, entre otras cosas, con lo siguiente: i) los costos (precio de compra o gastos operacionales) de la implementación, que pueden hacer que no sea rentable para algunos; ii) los conocimientos, la capacidad y las aptitudes, por ejemplo, de los productores (que pueden carecer de alfabetización digital o no saber cómo manejar algunos dispositivos automatizados) o los jóvenes y otras partes interesadas; iii) la disponibilidad de la infraestructura de gestión de datos y de tecnología de la información (TI) necesaria para adquirir, procesar y compartir datos; iv) la facilidad de acceso a mantenimiento técnico y servicio para reparar el equipo y proporcionar apoyo de mantenimiento; v) la salud y la seguridad (ya que la automatización puede reducir en gran medida el trabajo pesado, pero también puede aumentar las amenazas a la ciberseguridad y aumentar el riesgo de accidentes de trabajo); vi) las posibles mejoras y dificultades en cuanto a la sostenibilidad y el medio ambiente, incluidas aquellas relacionadas con el uso de la energía, y vii) el papel de la cultura y la tradición, que pueden facilitar o dificultar la adopción.

El resto del informe está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se ofrece una visión general de las tecnologías de automatización agrícola, se examinan las tendencias de adopción y sus factores y cómo difieren entre las regiones. Se analiza de qué manera las tecnologías de automatización digital están complementando o sustituyendo a la maquinaria motorizada más antigua, y también se examina el potencial de las soluciones digitales para la agricultura no mecanizada. En el Capítulo 3 se examinan los argumentos a favor de las tecnologías de automatización agrícola, arrojando luz sobre las dificultades que enfrentan los productores y los proveedores de servicios. Se estudia el papel de las políticas, la legislación y las inversiones en la conformación de los incentivos privados, y se explora el modo de superar los obstáculos para la adopción, adaptar las soluciones de automatización a las necesidades locales y aprovechar el equipo digital para mejorar la sostenibilidad ambiental. El Capítulo 4 se centra en las repercusiones, positivas y negativas, de la automatización agrícola sobre el empleo decente y la demanda de mano de obra, con especial atención a grupos vulnerables como las mujeres y los jóvenes. El Capítulo 5 concluye el informe con un plan detallado sobre las políticas, la legislación y las inversiones que son necesarias con miras a abordar los obstáculos para la adopción y velar por que la automatización de la agricultura contribuya a sistemas agroalimentarios eficientes, productivos, sostenibles, resilientes e inclusivos. En él se examinan también las posibles compensaciones que pueden surgir entre estos diferentes objetivos y se evalúa la manera en que los países deben priorizar sus medidas en función de su nivel de desarrollo económico, sus instituciones y los objetivos de los encargados de formular sus políticas. ■

FEDERACIÓN DE RUSIA
Robots alimentando a las vacas.
©ANDREY-SHA74/ Shutterstock.com

CAPÍTULO 2
COMPRENDER EL PASADO Y MIRAR HACIA EL FUTURO DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

MENSAJES PRINCIPALES

➔ La mecanización motorizada es una forma importante de automatización de la producción agrícola y un componente fundamental de la transformación agrícola en todo el mundo, aunque su adopción ha sido desigual y particularmente limitada en el África subsahariana.

➔ La mejora del acceso de los pequeños productores agrícolas —en particular mujeres, jóvenes y otros grupos marginados— a opciones de mecanización sostenible exige innovaciones tecnológicas e institucionales, como los mercados de servicios de mecanización facilitados por plataformas digitales.

➔ El uso y la variedad crecientes de las tecnologías digitales tienen el potencial de transformar la agricultura incluso en los países de ingresos bajos y medianos, sobre todo a medida que estas tecnologías pasan a ser más accesibles.

➔ Los factores que impulsan su adopción varían según la tecnología y el contexto. Por ejemplo, los principales incentivos para la introducción de robots de ordeño son una mayor flexibilidad de los horarios de trabajo y una mejor calidad de vida; en el caso de las tecnologías de automatización de cultivos, con su adopción se persigue principalmente una mayor rentabilidad, mientras que en el caso de la actividad forestal, una consideración importante es el logro de condiciones de trabajo más seguras.

➔ Ya hay una variedad de soluciones tecnológicas disponibles para países en diferentes etapas de desarrollo, y más que se están elaborando. Mediante políticas y legislación adecuadas, los gobiernos pueden promover soluciones adaptadas al contexto y a las necesidades específicos de los distintos productores.

➔ En particular, los pequeños productores agrícolas necesitan tener acceso a tecnologías de automatización digital asequibles y adecuadas para poder adoptar estas tecnologías y cosechar sus beneficios.

En el pasado, y durante varios siglos, el músculo humano y los animales fueron la principal fuente de energía en la agricultura. Hasta hace poco, la automatización de la agricultura consistía en gran medida en sustituir los animales de tiro y la mano de obra humana por equipo motorizado en múltiples actividades agrícolas, como la preparación de la tierra, el deshierbe, la cosecha, el riego, el ordeño y la alimentación de los animales, y las actividades de manipulación en la explotación, como la trilla y la molienda.

Recientemente, las tecnologías de automatización digital (véase la Figura 2 en la pág. 6) se han abierto camino en la agricultura mediante diversas aplicaciones, a veces incorporadas a la maquinaria agrícola existente, a veces por separado. En ambos casos, estas tecnologías pueden mejorar el diagnóstico y la toma de decisiones de los productores agrícolas. Cuando se incorporan a las máquinas agrícolas, las actividades agrícolas pueden realizarse con mayor precisión, lo

que permite mejorar aún más la eficiencia y la productividad.

Por lo tanto, estas tecnologías ofrecen posibilidades de transformar los medios de vida rurales y el paisaje agrícola relacionado, lo que incluye la producción agropecuaria, la acuicultura y la actividad forestal. En la producción de cultivos, pueden mejorar la productividad de insumos como las semillas, los fertilizantes y el agua. En la producción ganadera y acuícola, pueden reducir el trabajo pesado, aumentar la puntualidad de las actividades y mejorar la eficiencia de los insumos, como los piensos. En todos los sectores de la agricultura, especialmente en la actividad forestal, la maquinaria puede mejorar las condiciones de trabajo y proporcionar un entorno más seguro para los trabajadores.

En este capítulo se examinan las tendencias de las tecnologías de automatización en todo el mundo, analizando las diferencias entre países y regiones y los factores que han determinado estas diferencias. Debido a la escasez de datos, el análisis se basa en gran medida en estudios de casos de la bibliografía y en dos documentos de referencia preparados para este informe[1, 2]. (Véase en el Anexo 1 una descripción exhaustiva de los 27 estudios de casos encargados para este informe). Se sigue una perspectiva histórica, desde la introducción de la mecanización motorizada y su difusión entre los países de ingresos altos hasta su posterior transferencia a algunos países de ingresos bajos y medianos. Se analizan los factores determinantes de su adopción y los obstáculos que la dificultan, así como la manera en que estos explican las diferencias en cuanto a la adopción en las distintas regiones. También se arroja luz sobre algunas de las desventajas producidas por la automatización, como el posible impacto ambiental negativo de la maquinaria motorizada. Se analiza de qué manera las tecnologías digitales están transformando el uso de la maquinaria agrícola y se examina el potencial de las soluciones digitales para la agricultura no mecanizada. Por último, en el capítulo se describe el estado de las tecnologías de automatización digital en todo el mundo y su potencial para sustituir a la mecanización motorizada tradicional e invertir algunos de sus efectos negativos. ■

TENDENCIAS Y FACTORES DE LA MECANIZACIÓN MOTORIZADA EN EL MUNDO

Las tasas de adopción varían considerablemente entre las diferentes regiones

La mecanización motorizada ha aumentado considerablemente en todo el mundo. Los datos muestran que la adopción a gran escala comenzó en los Estados Unidos de América, donde los tractores se convirtieron en la principal fuente de energía agrícola, sustituyendo a unos 24 millones de animales de tiro entre 1910 y 1960[3]. Con la excepción del Reino Unido, donde los tractores se empezaron a introducir en la década de 1930, la transformación de la agricultura en el Japón y en algunos países europeos (Alemania, Dinamarca, España, Francia y la ex Yugoslavia) se retrasó hasta aproximadamente 1955, tras lo cual la mecanización motorizada se produjo muy rápidamente, sustituyendo totalmente a la tracción animal[4]. El uso de tractores como fuerza motriz agrícola se convirtió en una de las modernizaciones más influyentes del siglo XX, ya que permitió, e incluso desencadenó, innovaciones en otras máquinas y equipo agrícolas, como trilladoras, cosechadoras y una amplia variedad de aperos relacionados[5]. Esto alivió en gran medida el trabajo pesado asociado a la agricultura y permitió a los agricultores realizar las tareas de manera más oportuna. En una etapa posterior, muchos países de Asia y América Latina experimentaron un progreso considerable en la introducción de maquinaria motorizada[6]. África subsahariana, en cambio, es la única región en la que el progreso hacia la mecanización motorizada se ha estancado en los últimos decenios[7] a pesar de una adopción más rápida en algunos países africanos.

Al analizar las tendencias en la introducción de maquinaria agrícola, la escasez de datos es una limitación bien reconocida. La gran diversidad de maquinaria y equipo relacionados que se utilizan en la mecanización agrícola constituye una dificultad importante en cuanto a la recopilación de datos (véase en el Recuadro 1 la manera en que la FAO tiene previsto superar esta dificultad).

RECUADRO 1 SUPERAR LAS DIFICULTADES RELACIONADAS CON LOS DATOS PARA INFORMAR SOBRE EL USO DE LA MAQUINARIA AGRÍCOLA

Hasta 2009, FAOSTAT informaba periódicamente sobre el uso y el comercio (volúmenes y valores) de maquinaria y equipo agrícolas. A partir de 1961, se publicaron series estadísticas sobre un número relativamente reducido de rubros, entre los que se encontraban el total de tractores agrícolas, cosechadoras y trilladoras, máquinas de ordeño, máquinas para la preparación del suelo y maquinaria agrícola.

La principal fuente del conjunto de datos era un cuestionario anual que se enviaba a las contrapartes nacionales y abarcaba tanto el uso como el comercio. Algunos de los datos recogidos a través de los cuestionarios se obtenían de los censos agropecuarios nacionales —que suelen realizarse cada 10 años— y se actualizaban, en la medida de lo posible, con anuarios y otras fuentes ministeriales y portales de datos en el período entre censos. La mayoría de los países comunicaban datos sobre el comercio, sin especificar las unidades de maquinaria utilizadas; esto suscitó preocupación en relación con los datos y la necesidad de mejorar tanto la calidad como el nivel de detalle del conjunto de datos.

A principios de la década de 2010, la FAO revisó el cuestionario a fin de pedir a los países que ofrecieran información más detallada, especialmente en cuanto al tipo de maquinaria. Esto se complementó con las cantidades comercializadas y valores obtenidos de la base de datos Comtrade de las Naciones Unidas; las lagunas de datos restantes se subsanaron utilizando una serie de fuentes secundarias, tales como estudios de casos de países.

Sin embargo, el cuestionario revisado no arrojó la tasa de respuesta esperada. Solo unos pocos países pudieron proporcionar detalles adicionales, y la fiabilidad de la información externa general resultó ser limitada. En consecuencia, se dejó de administrar el cuestionario revisado y actualmente solo se dispone de datos hasta 2009 (recopilados en 2011). Como resultado, se sabe muy poco sobre la evolución de la introducción de maquinaria y equipo agrícolas en los últimos 10 años. Se trata de un importante déficit de nuestros conocimientos acerca de la evolución de los sistemas agrícolas.

La División de Estadística de la FAO ha iniciado el proceso de actualización de la base de datos sobre maquinaria combinando diferentes fuentes de datos. La metodología está todavía en desarrollo y, en comparación con la práctica anterior, se basa más en datos de encuestas, junto con los censos agrícolas. En los próximos años, es probable que se recojan datos de encuestas en el marco de una serie de proyectos en los que participa la FAO, como el Programa de la Encuesta agrícola y rural integrada (AGRISurvey) y la Iniciativa 50x2030 destinada a subsanar la falta de datos en la agricultura. Estos proyectos están orientados a proporcionar asistencia técnica y promover la recopilación de datos en la agricultura sobre una serie de temas, tocando las variables socioeconómicas y ambientales, siguiendo un enfoque modular simple que abarca los períodos entre censos. Uno de los módulos propuestos abarca los datos sobre la disponibilidad y el uso de maquinaria.

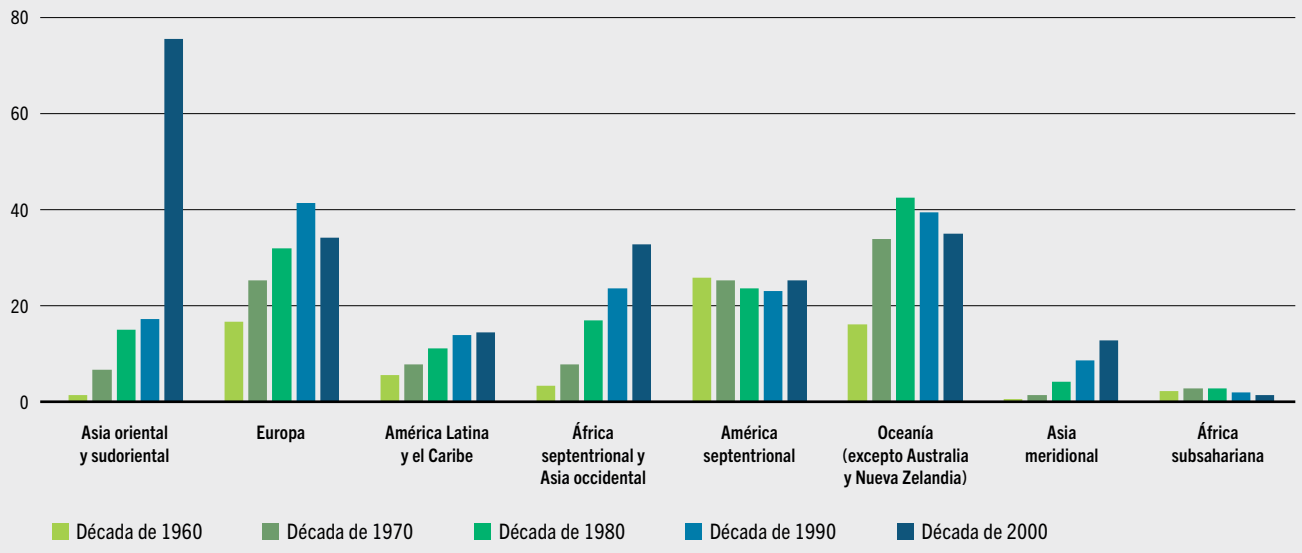
Además, los microdatos de los censos agropecuarios se publican cada vez de forma más sistemática. Para los períodos entre censos, se dispone de datos sobre el uso y las existencias de maquinaria procedentes de una serie de encuestas, como la encuesta de hogares que promueve el Banco Mundial (el Estudio de medición del nivel de vida) y otras encuestas nacionales similares. En la base de datos del Sistema de información sobre medios de vida rurales (RuLIS) de la FAO se recoge una serie de indicadores armonizados y microdatos procedentes de esas encuestas, lo que constituye otra fuente de datos sobre el uso de maquinaria.

El conjunto de datos actualizado incluirá la cantidad de maquinaria y equipo en uso y producidos; y el volumen de maquinaria importada y exportada (y los valores comerciales relativos).

La FAO tiene previsto evaluar todas las posibles fuentes fiables mediante la recopilación, el procesamiento y el desarrollo de un conjunto de datos normalizados para 2023. A más largo plazo, el dominio de datos sobre maquinaria se actualizará con los datos recogidos en el cuestionario revisado que se distribuirá a los países.

La maquinaria puede clasificarse generalmente en dos grupos: i) maquinaria a motor, como tractores, bombas de agua y cosechadoras, y ii) maquinaria auxiliar sin motor, pero que se combina con una máquina a motor (por ejemplo, los aperos de los tractores, como arados y sembradoras, y los sistemas de riego). En general, se recopilan datos sobre la maquinaria a motor, aunque los datos son escasos incluso para esta categoría debido a la gran variación de las condiciones agroecológicas y agrarias entre los países. Las diferentes zonas agroclimáticas, las condiciones del suelo, la topografía y la orientación de la producción requieren el uso de diferentes tipos de maquinaria

FIGURA 4 TRACTORES EN USO POR CADA 1 000 HECTÁREAS DE TIERRA CULTIVABLE



NOTAS: "Tractores" se refiere a los tractores de ruedas, de oruga y de cadenas utilizados en la agricultura. Se consideró un cuarto tipo de tractor (el motocultor) para un subconjunto de países en la década de 2000. Se han tenido en cuenta únicamente los países que han proporcionado datos de forma sistemática entre 1961 y 2009 (108 países en total). Se ha omitido Asia central por falta de datos. Véase en el Anexo 2 el conjunto completo de países, entre los que se incluyen los 33 países para los que se consideró el cuarto tipo (el motocultor) desde la década de 2000.
FUENTE: FAO, 2021[9].

y equipo. Por ejemplo, los tractores pueden tener diferentes tamaños y atributos (por ejemplo, cuatro o dos ruedas). Asimismo, los distintos sistemas de producción ganadera y acuícola pueden requerir tipos de maquinaria muy diferentes, por ejemplo, desde sistemas de alimentación hasta ordeñadoras en el caso de la producción ganadera.

Sobre la base de los datos disponibles, y reconociendo que estos son incompletos y no están actualizados, la Figura 4 (pág. 22) ilustra el progreso de la mecanización en todas las regiones del mundo entre 1961 y 2009. Cabe señalar que el indicador (número de tractores en uso por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable) no tiene en cuenta ni el tamaño de los tractores ni otros tipos de equipo. Sin embargo, el uso de este indicador como aproximación de la mecanización global puede justificarse, en parte, por la falta de disponibilidad de otros datos, y también por el hecho de que los tractores son actualmente la principal fuente de energía para numerosas actividades agrícolas, como la preparación de la tierra, la siembra, la aplicación de fertilizantes y la pulverización de productos químicos. Además de transporte, los tractores también pueden proporcionar energía para el bombeo de agua para el riego, así como para las ordeñadoras.

Las estadísticas disponibles sobre el número de tractores por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable (véase la Figura 4) ponen de manifiesto el progreso regional desigual hacia la mecanización. Mientras que los países de ingresos altos (América septentrional, Europa y Oceanía) ya estaban muy mecanizados en la década de 1960, las regiones donde dominan países de ingresos bajos y medianos estaban menos mecanizadas. En Europa, se observó un descenso en el uso de tractores entre las décadas de 1990 y 2000, siendo la Federación de Rusia el país que experimentó el mayor descenso (más del 50 %), probablemente debido a la transición política y económica del país durante ese período. Sin embargo, otros países,

como Albania, Alemania, Dinamarca, Irlanda y los Países Bajos, también experimentaron un descenso importante, aunque las razones subyacentes no están claras. Posiblemente, a medida que los tractores evolucionan y las explotaciones y terrenos agrícolas se concentran más, aumenta el número de hectáreas (ha) atendidas con una sola máquina.

En Asia y África septentrional, se produjo una rápida mecanización a partir de la década de 1960. Por ejemplo, en Asia oriental y sudoriental y en Asia meridional, el número de tractores por cada 1 000 hectáreas se multiplicó por 56 y 36, respectivamente, pasando de un total combinado de 2,7 millones de tractores en la década de 1960 a 20,3 millones de unidades en la década de 2000. Sin embargo, parte del crecimiento exponencial que se observó en Asia oriental y sudoriental en la década de 2000 puede atribuirse a la adición de un cuarto tipo de tractor (el motocultor) al análisis de la medición, para países como China, Myanmar y Filipinas; esta adición aumentó en gran medida el número total de tractores. En África septentrional y en Asia occidental, en el mismo período, las unidades se multiplicaron por 10 (pasaron de 3 a 33 unidades por 1 000 ha). América Latina y el Caribe también experimentaron un importante crecimiento, ya que el número de tractores por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable casi se triplicó, pasando de cinco tractores en la década de 1960 a 14 en la década de 2000. África subsahariana fue la única región que no experimentó un progreso notable en la mecanización agrícola. En esta región, el número de tractores en uso aumentó muy lentamente, alcanzando solo 2,1 millones en la década de 1980 (o 2,8 tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable), antes de descender a 700 000 (o 1,3 tractores por cada 1 000 ha) en la década de 2000. El bajo nivel de mecanización de la región queda confirmado por un reciente estudio que examinó la mecanización agrícola en 11 países y descubrió que las herramientas manuales livianas son el principal tipo de equipo utilizado. El estudio indica que solo el 18 % de los hogares de la muestra tienen acceso a maquinaria accionada por tractor, mientras que el resto de los hogares utilizan herramientas manuales simples (48 %) o equipo de tracción animal (33 %)[8].

En el caso de Asia y África septentrional, datos comprobados indican que el uso ya generalizado de la tracción animal en la década de 1960 facilitó el posterior avance hacia la mecanización motorizada. El proceso se consolidó aún más con la intensificación agrícola de la revolución verde, y luego con el aumento de los salarios rurales debido a la industrialización y la transformación estructural[6]. Se observaron patrones similares en América Latina y el Caribe, donde fueron los actores privados quienes impulsaron la mecanización agrícola. Sin embargo, los gobiernos también desempeñaron un papel fundamental, creando un entorno propicio para la mecanización, por ejemplo, a través de programas públicos en la Argentina, Costa Rica, el Ecuador y el Perú que otorgaban acceso a crédito a tasas de interés bajas y proporcionaban exenciones fiscales[10, 11]. Además, varios países eximieron a la maquinaria agrícola de derechos de importación (por ejemplo, el Perú)[10].

La aparición de sectores de fabricación de maquinaria agrícola robustos en algunos países de Asia (China y la India) y de América Latina y el Caribe (el Brasil, México y, en cierta medida, la Argentina) ha llevado a la diversificación con maquinaria exportada a nivel mundial[11]. Esto dio lugar a una reducción de los costos de adquisición de equipo de pequeña escala, como tractores de dos ruedas (especialmente en Asia) y tractores de cuatro ruedas, y de otra maquinaria, como bombas de pozos tubulares poco profundos, trilladoras y molinos de granos[12, 13, 14]. También hay datos que indican que el aumento de los mercados de alquiler de maquinaria ha contribuido a ampliar la mecanización agrícola ya que permite a los pequeños productores agrícolas acceder a maquinaria agrícola a un costo asequible[6].

En el África subsahariana, en las décadas de 1960 y 1970, se pusieron en marcha iniciativas para promover la mecanización, mediante el suministro de maquinaria subvencionada a los agricultores, la gestión de explotaciones estatales y en bloque y la creación de centros públicos de alquiler, a menudo con el apoyo de donantes[15, 16]. Esas iniciativas resultaron costosas y en su mayoría fracasaron debido a la escasa infraestructura, las inversiones inadecuadas en el desarrollo de conocimientos y aptitudes, la escasa capacidad de mantenimiento, la falta de acceso a combustible y piezas de repuesto, la ausencia de una demanda real de mecanización y problemas de gobernanza, como búsqueda

de ganancias y corrupción[6, 16]. En el África subsahariana, y en otras regiones donde la mecanización sigue siendo limitada, parece darse una falta de apoyo del sector público para crear un entorno propicio a través de la promoción del desarrollo de conocimientos y aptitudes, el acceso a financiación e infraestructura rural, entre otras cosas[11]. El establecimiento de servicios de alquiler sostenibles desde el punto de vista comercial debería ser una de las prioridades fundamentales de cualquier estrategia de mecanización agrícola sostenible en la región (véase el Recuadro 2 en la pág. 25).

Los datos sobre la mecanización sin tractor son aún más limitados, pero los datos disponibles indican que incluso en el África subsahariana algunas actividades estacionarias, como los molinos mecánicos para la molienda con un alto uso de energía, están mecanizadas desde hace tiempo[16]. En todo el mundo, la mecanización sigue siendo limitada para una serie de actividades que incluyen la cosecha y el deshierbe. Además, aunque las cosechadoras-trilladoras y las trilladoras estacionarias están en auge en varios países, solo pueden utilizarse para cosechar cereales. Con muy pocas excepciones, la producción de frutas y hortalizas está escasamente mecanizada en todo el mundo[6].

Los promedios regionales ocultan importantes diferencias intrarregionales e incluso nacionales

Aunque la difusión media de los tractores ha sido mayor en algunas regiones que en otras, también puede haber una importante variabilidad dentro de una misma región debido a disparidades en cuanto a la transformación estructural y agrícola y el cambio tecnológico. Por ejemplo, mientras que en el Japón se registró una rápida difusión de los tractores en la década de 1960, otros países de la región (por ejemplo, en Tailandia) no experimentaron un desarrollo similar hasta las décadas de 19902000[9]. En China, por otra parte, la difusión del uso de tractores comenzó en las décadas de 1970 y 1980, mientras que en Bangladesh, la India, Myanmar y Sri Lanka se estimó recientemente que hasta el 90 % de las tierras de cultivo (utilizadas en su mayoría para la producción de arroz) se preparan con maquinaria motorizada[18, 19, 20, 21]. Las condiciones topográficas también han limitado la mecanización o han hecho que su adopción sea desigual en algunos países asiáticos[6, 14]. Por ejemplo, en Nepal, solo el 23 % de los productores agrícolas utilizan tractores y motocultivadores en las zonas montañosas del país, mientras que este porcentaje alcanza el 46 % en la zona más llana de Terai. En América Latina y el Caribe, existe una importante variabilidad entre las explotaciones de gran y pequeña escala; las explotaciones de gran escala están mucho más mecanizadas que aquellas de pequeña escala debido a que estas últimas se encuentran, al menos en parte, en zonas remotas y montañosas[10, 11, 22, 23].

Incluso en las subregiones menos mecanizadas del África subsahariana, los niveles de adopción son desiguales entre los países y dentro de ellos. Por ejemplo, en el año 2000, en Botswana y Sudáfrica había ocho y cinco tractores, respectivamente, por cada 1 000 hectáreas de tierra cultivable, mientras que en países como Madagascar, Malí y Senegal no superaban las 0,4 unidades. En Ghana, se calcula que, de media, un tercio de los hogares agrícolas utilizan tractores (principalmente para la labranza), pero la proporción varía desde solo el 2 % en las zonas forestales hasta el 88 % en la sabana[6]. En la República Unida de Tanzanía, los niveles de mecanización son más altos en las regiones de cultivo comercial[24]. En Nigeria, mientras que el 7 % de los productores utilizan tractores, otro 25 % utiliza tracción animal propia o alquilada para la preparación de la tierra[25]. En Etiopía, solo alrededor del 1 % de las parcelas agrícolas están mecanizadas con tractores, principalmente en los sistemas de trigo-cebada de fácil mecanización, que también están dominados por grandes productores y han presenciado la aparición de mercados de servicios para la combinación con trigo.

Qué nos dicen los (limitados) datos disponibles sobre la mecanización de la ganadería y la acuicultura

Los datos sobre la introducción de maquinaria para la producción ganadera y acuícola son muy escasos, muy irregulares o inexistentes. Lo mismo ocurre con los datos relativos a la actividad forestal. El análisis de los limitados datos disponibles muestra que la maquinaria ganadera (por ejemplo, las ordeñadoras) se concentra en los países de ingresos altos.

»

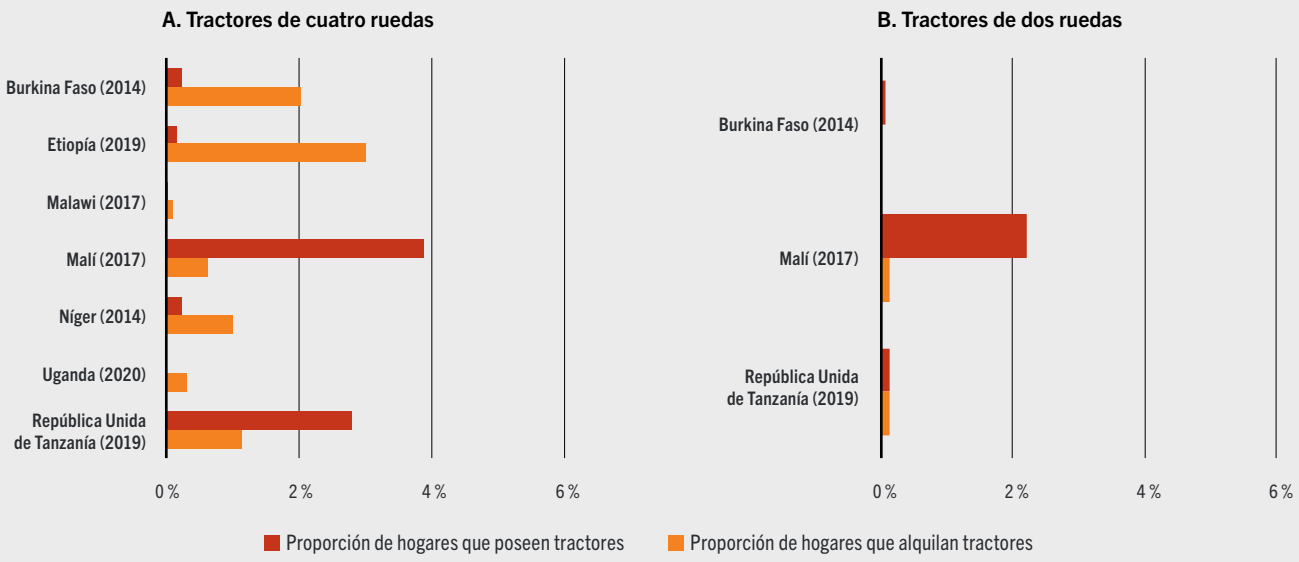
RECUADRO 2 COMPRENDER LA MECANIZACIÓN EN EL ÁFRICA SUBSAHARIANA

En el África subsahariana sigue predominando la agricultura basada en la energía humana y animal, lo que limita la productividad. El tractor es uno de los tipos de maquinaria agrícola más difundidos (con diversos niveles de éxito) en los últimos siete decenios[15]. Sin embargo, los tractores siguen siendo caros e inasequibles para la mayoría de los agricultores. Por lo tanto, los mecanismos de alquiler sostenibles resultan fundamentales para que los agricultores —en particular los pequeños productores— puedan acceder a la mecanización. En la región existen servicios de alquiler de tractores, tanto tradicionales (de cuatro ruedas) como, más recientemente y en menor medida, motocultivadores (es decir, tractores de dos ruedas). En contraste con la imagen negativa de los servicios de alquiler de tractores gestionados por el gobierno, hay miles de personas en toda la región que poseen tractores y pueden prestar servicios de alquiler de tractores a los agricultores. Un ejemplo concreto es TROTRO Tractor, de Ghana (véase el Recuadro 3 en la pág. 27).

La figura ofrece una instantánea del uso actual —ya sea tractores propios o de alquiler— de tractores de cuatro ruedas (izquierda) y de dos ruedas (derecha) en determinados países de África subsahariana para los que se dispone de datos del proyecto Estudio de medición de los niveles de vida - Encuestas Integradas sobre Agricultura (LSMS-ISA).

La propiedad de tractores en los hogares sigue siendo muy baja, incluso en el caso de los tractores de dos ruedas, que suelen ser más baratos. La disponibilidad de servicios de alquiler de tractores solo aumenta ligeramente el acceso a los tractores de cuatro ruedas. La escasa aceptación de los tractores de dos ruedas, junto con un mercado de alquiler casi inexistente, pone de manifiesto que los proveedores aún no han establecido franquicias locales plenamente operativas y sostenibles para las cadenas de suministro de estas máquinas y piezas de repuesto[15]. El establecimiento de servicios de alquiler comercialmente sostenibles (a través de la propiedad privada o cooperativa) es una alta prioridad en cualquier estrategia de mecanización agrícola sostenible en la región.

FIGURA PROPORCIÓN DE HOGARES AGRÍCOLAS CON ACCESO A TRACTORES, EN UNA SELECCIÓN DE PAÍSES



FUENTE: Banco Mundial, 2022[17].

» Por otro lado, en los países de ingresos bajos y medianos, aunque están presentes, es más probable que este equipo se utilice en unidades de producción a gran escala. Sin embargo, dada la escasez e incoherencia de los datos, es difícil apreciar un panorama preciso en diversos contextos. Además, no está claro en qué consiste exactamente una ordeñadora, ni cuántas vacas son atendidas por cada máquina. A medida que la tecnología evoluciona, el número de vacas ordeñadas por una máquina aumenta y, por tanto, el número de máquinas puede disminuir. El caso de Dinamarca es un buen ejemplo: es un gran país productor de leche en el que se ha registrado un descenso en la utilización de ordeñadoras, por lo que es posible que se haya producido una sustitución tecnológica hacia métodos más avanzados no contemplados en las estadísticas[9]. Sin embargo, los datos anecdóticos de un estudio de casos (Lely) apuntan a la consolidación de las granjas lecheras en Europa septentrional como la causa subyacente de la disminución del número de ordeñadoras resultante de la sustitución tecnológica y de las mayores economías de escala[2]. ■

LA REVOLUCIÓN DIGITAL Y SU POTENCIAL PARA TRANSFORMAR EL USO DE LA MECANIZACIÓN MOTORIZADA Y LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

A menudo se da por sentado que está comenzando una cuarta revolución agrícola, en la que las tecnologías digitales desempeñarán un papel fundamental en la transformación de la producción agrícola —que comprende los cultivos, la ganadería, la acuicultura y la actividad forestal— en aras de una mayor eficiencia y sostenibilidad. Estas tecnologías incluyen la IA, los drones, la robótica, los sensores y los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS), así como otros instrumentos digitales que ayudan a automatizar el diagnóstico, la toma de decisiones y la ejecución de diversas actividades agrícolas, permitiendo una mayor precisión y eficiencia[2]. Algunas de estas tecnologías ya están disponibles en el mercado, mientras que otras están prácticamente listas para el mercado[26].

Varias hipótesis sobre la agricultura en los próximos años y decenios apuntan a un probable aumento del uso de diferentes tecnologías digitales y de la automatización[27, 28]. En los últimos años, puede observarse una gran proliferación de dispositivos portátiles (por ejemplo, teléfonos móviles y teléfonos inteligentes, sensores, dispositivos del internet de las cosas [IdC]), que es en gran medida el resultado de la mejora del acceso a las redes móviles y la ampliación de la cobertura de Internet, incluso en las regiones más remotas del mundo. Por ejemplo, en 2020, el 69 % de la población de América Latina y el Caribe, el 64 % de población de Asia y el Pacífico y el 45 % de la población del África subsahariana había adquirido un teléfono inteligente, y se prevé que estas cifras aumenten hasta el 81 %, el 79 % y el 67 %, respectivamente, para 2025[29]. Este es el resultado de las enormes inversiones en infraestructura realizadas tanto por los gobiernos como por el sector privado. Por ejemplo, Google está invirtiendo en el primer cable de Internet submarino a través de su programa Equiano[30].

A continuación, se presenta y analiza el potencial de estas tecnologías para transformar el panorama de la mecanización motorizada y de las actividades agrícolas en general.

Las tecnologías digitales están transformando la maquinaria agrícola convencional

Los encargados de formular las políticas y las organizaciones internacionales ven cada vez más la digitalización como un factor de cambio en el sector agrícola. Un aspecto central de la mayoría de las tecnologías digitales es la posibilidad de recopilar e intercambiar datos para apoyar la toma de decisiones de los productores agrícolas u otras partes interesadas y, en última instancia, para mejorar la eficacia y la eficiencia[31, 32].
En los últimos años, estas tecnologías y servicios digitales han atraído gran atención de donantes, centros de investigación y organismos de desarrollo[29, 33, 34, 35]. Se incorporan cada vez más a la maquinaria motorizada, con posibilidades de transformar su uso: las actividades agrícolas se realizan con más eficiencia y precisión, y el

RECUADRO 3 INSTRUMENTOS DIGITALES PARA MEJORAR EL ACCESO A LOS SERVICIOS DE MECANIZACIÓN

Los instrumentos digitales basados en el modelo de taxi Uber están en auge y prometen reducir los costos de transacción de los servicios de tractores. TROTRO Tractor, en Ghana, y Tun Yat, en Myanmar, alquilan maquinaria y comparten servicios a través de una plataforma digital y servicios de telefonía móvil. Estos instrumentos demuestran un verdadero potencial para la mecanización agrícola inclusiva.

TROTRO Tractor pone en contacto a los pequeños productores con la maquinaria agrícola que necesitan, principalmente tractores, y con los propietarios de esas máquinas, a través de una plataforma digital a la que se accede mediante aplicaciones para teléfonos inteligentes, así como a través del servicio suplementario de datos no estructurados (USSD) para los usuarios que no poseen un teléfono inteligente. Actualmente, TROTRO Tractor cuenta con 75 000 agricultores registrados en Benín, Ghana, Nigeria, Togo, Zambia y Zimbabwe. Se basa en relaciones tanto de empresa a cliente como de empresa a empresa, y retiene un porcentaje de comisión sobre el costo del servicio.

Además de tractores (que ofrecen cualquier tipo de servicio, desde la labranza hasta la grada, y desde la plantación hasta la siembra y la pulverización) y cosechadoras, la plataforma TROTRO Tractor también pone en contacto a los productores con propietarios de drones que ofrecen sus servicios de cartografía y pulverización de herbicidas. La demanda de cartografía con drones es cada vez mayor, ya que los agricultores aprecian la importancia de la tenencia de la tierra y comprenden que contar con datos precisos sobre las tierras pueden ser fundamentales a la hora de solicitar servicios financieros a los bancos o las aseguradoras.

Tun Yat ofrece servicios similares de tractores a través de una aplicación para teléfonos inteligentes, dirigida específicamente a pequeños y medianos agricultores, con especial atención a las mujeres (que representan el 30 % de los clientes) y a los jóvenes (con un 25-30 % de clientes menores de 30 años). Tun Yat posee cinco tractores y cinco cosechadoras y ofrece varios servicios de mecanización y de emparejamiento a más de 20 000 clientes. Los servicios incluyen labranza, preparación de la tierra, siembra, cosechadoras para la recolección con diferentes cabezales para diferentes tipos de cultivo (por ejemplo, frijoles mung o maíz) y recolección (por ejemplo, sésamo o cacahuetes). La mayoría de los clientes son pequeños productores con terrenos de menos de 2 ha, que necesitan especialmente servicios de mecanización fiables y asequibles.

El modelo empresarial de Tun Yat se basa en la diversificación, con servicios que incluyen la reventa de insumos (por ejemplo, fertilizantes), el corretaje de créditos y la nivelación asistida por láser para ayudar a los agricultores de las zonas expuestas a inundaciones que necesitan nivelar las parcelas agrícolas y desarrollar el sistema de drenaje. También ofrece a grupos de agricultores la compra directa de la materia prima, con la que luego se elaboran aperitivos que se venden en tiendas de conveniencia.

Para resumir, el modelo empresarial tipo Uber es ventajoso tanto para los agricultores que no poseen tractores como para los propietarios de equipo; estos pueden maximizar, seguir de cerca y planificar el uso de la maquinaria y el consumo de combustible, así como ofrecer tarifas competitivas a una base de clientes más amplia.

FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[2].

acceso a la maquinaria agrícola se amplía a nuevas regiones o grupos socioeconómicos, como los pequeños productores.

Muchas de estas tecnologías se basan en aplicaciones manejadas por un teléfono inteligente o a través de un servicio de llamadas o de mensajería. Los servicios de activos compartidos son una subcategoría de los servicios digitales, con un importante potencial para ampliar el acceso a la mecanización motorizada, conectando a los propietarios de equipo (por ejemplo, tractores o drones), y a veces también a los operadores, con los productores agrícolas que necesitan ese equipo. Los productores agrícolas pagan al propietario por hora o por superficie atendida, con un porcentaje o una tarifa fija para el intermediario. El ejemplo más conocido de servicio de activos compartidos es Hello Tractor (que realiza actividades en siete países africanos, así como en Bangladesh, la India y el Pakistán)[1]. Véanse en el Recuadro 3 dos casos de éxito de algunos países africanos y de Myanmar.

La principal ventaja de estos servicios de activos compartidos es la mejora de la relación costo-beneficio: los agricultores acceden al equipo

que necesitan sin tener que comprarlo, mientras que las tarifas que pagan hacen que el equipo sea más rentable para el propietario. Estos servicios de activos son especialmente importantes en el África subsahariana, donde la propiedad es extremadamente limitada (véase el Recuadro 2 en la pág. 25).

Otro grupo de servicios digitales son las soluciones de monitoreo de equipo, es decir, aplicaciones sencillas que automatizan el funcionamiento de equipo como bombas de riego[36, 37], o dispositivos GNSS para seguir los movimientos de equipo o animales, por ejemplo. Este tipo de servicios se consideran las primeras soluciones de agricultura inteligente surgidas para los países de ingresos bajos y medianos[38]. Entre los servicios más avanzados se encuentran las soluciones del IdC que se utilizan, por ejemplo, para monitorear y, en ocasiones, automatizar (parcialmente) las decisiones relativas al cuidado de los cultivos, el ganado o los peces, con el fin de mejorar el diagnóstico, la toma de decisiones y la ejecución. Esto, a su vez, conduce a una mayor precisión, a más eficiencia y a un aumento de la productividad, a la vez que reduce el trabajo pesado. Puede citarse un ejemplo concreto del uso del IdC para la agricultura de precisión en China, donde apoya un sistema integrado de teledetección automática, alerta temprana y riego por microaspersión para la producción de té; se detectan los cambios en las condiciones ambientales, se emiten alertas oportunas y se activa el riego automáticamente, del modo y en el momento necesario, evitando así daños debidos al calor, el frío o la sequía[39].

La transformación mediante tecnologías digitales del uso de maquinaria motorizada, como tractores y equipo de cosecha, es algo limitada, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos bajos[1, 2]. Por otro lado, los modelos organizativos para el uso de maquinaria motorizada están experimentando cambios importantes. Los productores de los países de ingresos bajos y medianos se centran cada vez más en la propiedad compartida de las máquinas, en lugar de la propiedad individual. El uso compartido de activos ha existido durante mucho tiempo, pero con un éxito limitado debido, por ejemplo, a la desconfianza entre los agricultores, los operadores y los propietarios de las máquinas, y a problemas relacionados con el mantenimiento de estas. Más recientemente, las soluciones del IdC y GNSS, aunque todavía son muy limitadas entre los pequeños productores, están siendo ampliamente adoptadas por los proveedores de servicios (tales como aquellos mencionados en el Recuadro 3). Al facilitar el control de la maquinaria, aumentan la transparencia y la confianza entre los proveedores de servicios y los usuarios. Tal vez el cambio más importante sea la incorporación de equipo de mecanización tradicional con dispositivos del IdC (por ejemplo, una combinación de equipo de cosecha motorizado de un servicio de alquiler, datos de GNSS y un operador capacitado para conducir un tractor), lo que puede dar lugar a un uso más eficaz de las máquinas, así como a mayores rendimientos[1].

El potencial de las tecnologías digitales para la agricultura de precisión no mecanizada

En la sección anterior se ha descrito de qué manera las tecnologías digitales pueden transformar el panorama de la maquinaria agrícola, haciendo que la mecanización sea más precisa y más accesible. Sin embargo, la adopción de la mecanización agrícola motorizada sigue siendo limitada en muchos países de ingresos bajos y medianos, especialmente en el África subsahariana.
Cada vez se investiga más sobre la agricultura de precisión para la producción no mecanizada, y su adopción va en aumento[40, 41, 42]. Hace tiempo que se desarrollaron metodologías para la aplicación manual de fertilizantes en sitios específicos (por ejemplo, la tecnología de dosis variable [TDV] para el abonado del arroz[43]), mientras que el escáner manual de suelo AgroCares está disponible en varios países de ingresos bajos de África y Asia[44]. Las explotaciones no mecanizadas de Asia y África están introduciendo servicios de vehículos aéreos no tripulados (también conocidos como drones), mientras que los GNSS pueden usarse en explotaciones no mecanizadas para cartografiar los límites de los campos y determinar la tenencia de la tierra[45].

Sin embargo, se carece de información sobre los niveles de adopción; no resulta claro cuántos productores agrícolas utilizan realmente las tecnologías digitales[46]. Los resultados de dos estudios técnicos encargados para este informe[1, 2] indican que, sobre el terreno, los

RECUADRO 4 INSTRUMENTOS DIGITALES NO VINCULADOS A LA MECANIZACIÓN: SOLUCIONES NO INCORPORADAS

Las soluciones digitales no incorporadas (véase el Glosario) no están vinculadas a la mecanización. Se trata principalmente de soluciones basadas en *software* que no dependen del uso de maquinaria agrícola. En cambio, requieren recursos de *hardware* limitados, generalmente un teléfono inteligente, una tableta, una herramienta de *software* (por ejemplo, aplicaciones de asesoramiento), un programa informático de administración de explotaciones agropecuarias o una plataforma en línea. Esto las diferencia de las soluciones digitales incorporadas, en las que los instrumentos digitales se combinan con maquinaria para interactuar con el entorno.

Las soluciones no incorporadas pueden incluir la teledetección, aunque esta se limita a datos para apoyar la toma de decisiones y la exploración. Se utilizan cada vez más en todo el globo, como se ilustra a continuación con ejemplos de diferentes partes del mundo. La empresa sudafricana Aerobotics está presente en 18 países y ofrece soluciones no incorporadas con un sistema de aeronaves no tripuladas (SAT) y teledetección (TD) para apoyar la toma de decisiones de los productores de frutas y nueces. Las tecnologías permiten la detección temprana de plagas y enfermedades, el control oportuno de las necesidades de agua, fertilizantes y nutrientes y facilitan la gestión de los rendimientos.

En Marruecos, SOWIT ofrece soluciones no incorporadas que utilizan teledetección, SAT para la captura de imágenes y aprendizaje automático centrado en bases de datos de campo o meteorológicos. Las tecnologías pueden aplicarse a los frutales, los cereales y la colza, e informan a los agricultores de las necesidades de riego y fertilización, estiman el rendimiento, controlan el contenido de materia seca del forraje y realizan inspecciones de las parcelas.

En Nepal, Seed Innovations ofrece una aplicación de Android para que los agricultores utilicen análisis basados en satélites, GNSS e IA para monitorear el rendimiento de los cultivos —lo que incluye la determinación de carencias o excedentes de agua y nutrientes, y de las amenazas de plagas y enfermedades— y acceder a información agronómica e intercambiarla.

TraSeable Solutions, que tiene su casa matriz en Fiji, cuenta con unos 2 000 clientes de pago en siete pequeños Estados insulares en desarrollo del Pacífico. La empresa ofrece dos soluciones principales. La primera es una aplicación móvil que informa a los agricultores sobre el sector agrícola, registra y gestiona datos de las explotaciones, y hace un seguimiento de los recursos, el inventario, las ventas y los gastos. La aplicación también ayuda a crear vínculos de mercado entre las partes interesadas de la cadena de valor agrícola. La segunda se centra en la pesca, concretamente en el atún. Conlleva el etiquetado y seguimiento de cada atún a lo largo de la cadena de valor, desde el desembarque hasta la distribución. Esta solución también ayuda a gestionar las flotas proporcionando información sobre la tripulación y sobre los gastos de funcionamiento y mantenimiento. Además, suministra detalles sobre la captura de atún, con información sobre las mareas, hojas de registro de capturas, análisis de los caladeros y servicios de información.

En el Perú, Coopecan ofrece servicios digitales a lo largo de toda la cadena de valor de la fibra de alpaca. Varias tecnologías ofrecen soluciones digitales para el manejo de pastos (imágenes desde un satélite), la sanidad animal (etiquetas para animales) y el procesamiento de la fibra y las ventas de exportación (tecnología de cadena de bloques), entre otras cosas. Además, se ofrece asistencia técnica a los criadores que necesiten apoyo para el manejo de los rebaños (por ejemplo, en lo que respecta a la situación sanitaria de los animales) o para el manejo de los pastos naturales (cada vez más degradados debido al pastoreo excesivo). Estos servicios se complementan con creación de capacidad para utilizar las soluciones, y un sistema de rastreabilidad que certifica la producción en cuanto al bienestar de los animales, calidad de la fibra y responsabilidad ambiental y social, lo que conduce a mejores condiciones de trabajo, una remuneración justa y la mejora del bienestar de los animales.

Por último, Agrinapsis, presente en Bolivia (Estado Plurinacional de), Costa Rica, el Ecuador, Guatemala y México, es una plataforma de redes sociales especializada en agricultura. Su gestión está a cargo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura y facilita el intercambio de conocimientos comunes entre los pequeños productores. La información producida colectivamente es verificada y calificada por todos sus clientes y un equipo técnico la revisa y mejora si se la señala como dudosa o de mala calidad. Agrinapsis facilita el comercio electrónico dirigido a los pequeños productores, que pueden vender sus productos o comprar insumos que respondan a las preocupaciones ambientales.

FUENTES: McCampbell, 2022[1]; Ceccarelli *et al.*, 2022[2].

pequeños productores agrícolas y los pastores de todo el mundo utilizan cada vez más diversos instrumentos digitales y tecnologías de teledetección y cartografía (véase el Recuadro 4). Los teléfonos inteligentes, con diversos sensores y cámaras de alta resolución incorporados, son actualmente los aparatos más accesibles para todos en los países de ingresos bajos y medianos. En combinación con las aplicaciones integradas en los teléfonos inteligentes y las interfaces adecuadas, ya pueden ofrecer innovaciones muy útiles y apropiadas para el contexto de los países de ingresos bajos y medianos y de la agricultura a pequeña escala, y tienen posibilidades de suponer una verdadera diferencia. Un ejemplo es GoMicro: a través de una lente microscópica acoplada a la cámara de un teléfono, en combinación con IA, apoya el diagnóstico rápido de plagas y

enfermedades[47] y ayuda a un control de calidad y clasificación eficientes y precisos de productos agrícolas como cereales y granos, pescado, frutas y hortalizas[1]. Existen otras soluciones digitales que incluyen datos de satélites o de drones (por ejemplo, sobre rendimientos, condiciones del suelo y sanidad vegetal) analizados por un algoritmo; los resultados pueden utilizarse para validar los datos compartidos por los productores agrícolas (basándose en las observaciones y la experiencia) o para brindar asesoramiento a los productores[1].

Los encargados de formular las políticas y las organizaciones internacionales deben prestar atención a las soluciones digitales. Es preciso seguir investigando para adaptarlos a las necesidades de los pequeños productores de los países de ingresos bajos y medianos, especialmente en aquellos menos mecanizados, como en el África subsahariana[1]. La investigación y la experiencia indican que facilitan el manejo sitioespecífico de cultivos, lo que a su vez puede mejorar el rendimiento y reducir el uso de insumos en las explotaciones no mecanizadas. Sin embargo, cabe señalar dos limitaciones. En primer lugar, las tecnologías digitales pueden ser demasiado caras para los pequeños productores, dados los costos actuales del equipo. Por ejemplo, los sensores de nitrógeno manuales tienen un precio de entre 300 y 600 USD, lo que resulta excesivo para un pequeño agricultor que solo desea utilizar el sensor unas pocas veces al año[48], mientras que el escáner AgroCares, más sofisticado, que proporciona información sobre una gama más amplia de nutrientes del suelo, se vende por más de 3 000 USD. En segundo lugar, los productores deben aprender a utilizar las tecnologías; sin los conocimientos necesarios, una aplicación incorrecta puede dar lugar a resultados no deseados, como un mayor uso de insumos.

Todavía hay lugares, principalmente en el África subsahariana, donde los teléfonos inteligentes están fuera del alcance de los pequeños productores y de las poblaciones rurales[1, 2]. Datos de 2020 también revelan una importante brecha entre las zonas rurales y urbanas en cuanto al acceso a Internet en los países en desarrollo: el 65 % de la población de las zonas urbanas tiene acceso, frente a solo el 28 % en las zonas rurales[49]. Los datos indican que el alto costo es un factor fundamental que obstaculiza la adopción de estas tecnologías por los pequeños productores, a pesar del importante potencial de mejora de la productividad. Esto sugiere que el acceso a las tecnologías digitales por los pequeños productores, subvencionado por los donantes y de bajo costo, puede no ser viable.

Por lo tanto, se necesitan más esfuerzos —y esfuerzos diferentes— para que estos instrumentos sean más accesibles. Los proveedores de servicios de activos compartidos, mencionados anteriormente, son una solución y ya ofrecen una variedad de máquinas adecuadas para las explotaciones agrícolas tanto de pequeña como de gran escala. Sin embargo, el bajo nivel de alfabetización digital entre los productores agrícolas también puede ser un factor importante en la lenta introducción de los instrumentos digitales. Por ello, en muchos países africanos, se utilizan mensajes de texto SMS, sistemas de respuesta vocal interactiva (IVR) y el servicio suplementario de datos no estructurados (USSD) para la comunicación con los pequeños productores. Por ejemplo, ICT4BXW y Justdiggit —que realizan actividades en el África subsahariana— adoptaron inicialmente tecnologías avanzadas como los teléfonos inteligentes, pero luego decidieron utilizar medios más sencillos (SMS, USSD e IVR) debido a la escasa penetración de los teléfonos inteligentes y al bajo nivel de alfabetización digital en la región[1].

Mientras los agricultores tengan una escasa alfabetización digital, es necesario proporcionarles apoyo técnico intensivo y continuo, así como información sobre las tecnologías digitales. Aunque los teléfonos móviles básicos resultan ahora accesibles para casi todas las personas, los teléfonos inteligentes siguen siendo limitados en el África subsahariana. Por lo tanto, los teléfonos deben utilizarse en combinación con servicios de asesoramiento basados en inteligencia satelital y ajustados a las necesidades de los productores (por ejemplo, sobre fuentes de agua y tierras de pastoreo para los criadores de ganado y pastores, y sobre brotes de enfermedades para los productores de banano)[1]. ■

EL ESTADO DE LAS TECNOLOGÍAS DE AUTOMATIZACIÓN DIGITAL Y LA ROBÓTICA EN LA AGRICULTURA

En las secciones anteriores de este capítulo se presentaron las tendencias y los factores de la mecanización agrícola motorizada, y se analizó el papel de las tecnologías digitales en la transformación de la agricultura en cuanto a su potencial para mejorar la agricultura de precisión y ampliar el acceso inclusivo a maquinaria agrícola. En esta sección se examinan con más detalle el estado actual de las tecnologías de automatización digital de la agricultura y los principales factores para su adopción, sobre la base de los datos disponibles.

El uso continuo de una tecnología es el mejor indicador de que ha sido beneficiosa al menos para algunos productores y empresas agrícolas[48]. La bibliografía sobre la evolución de la automatización digital de la agricultura permite conocer sus beneficios, dificultades y tendencias de adopción. En resumen, la adopción de la tecnología de automatización digital de la agricultura se ha visto impulsada por dos motores principales: el aumento de la demanda de alimentos ante la disminución de los recursos naturales y la evolución de otros sectores de la economía, que impulsan la innovación en el sector agrícola[48].

Para comprender las tendencias de las tecnologías de automatización digital de la agricultura, es necesario cotejar información de diversas fuentes, ya que los datos son escasos (especialmente en los países de ingresos bajos y medianos) y, además, ningún país u organización recopila sistemáticamente datos sobre su uso. Un análisis individual tiene un valor limitado debido a la especificidad de la tecnología y del país en cuestión. Solo cuando la información se considera en su conjunto pueden observarse patrones. El Cuadro 2 presenta una selección de hitos de la automatización digital de la agricultura, con una lista de los primeros motores de cada tecnología. No resulta simple citar una fecha de introducción de cada tecnología en el nivel de los productores, por lo que las fechas, países y tecnologías citados en el cuadro son solo indicativas de los patrones generales en cuanto a la adopción; de hecho, ninguna tecnología sale del laboratorio o del estudio de diseño completamente desarrollada antes de pasar a la explotación. Por el contrario, la adopción de tecnología es un proceso iterativo; comienza con la investigación básica para mostrar una posible aplicación y luego convierte las ideas científicas en productos comerciales utilizables. Sobre la base de la Figura 2 (pág. 6) de este informe, la Figura 5 (pág. 33) presenta otros ejemplos de las tecnologías tratadas en este capítulo, organizadas por sistema de producción agrícola. Estas no reflejan, sino que complementan, las tecnologías citadas en el Cuadro 2.

Avances en la automatización de la producción ganadera

Como se ilustra en el Cuadro 2, algunas de las primeras tecnologías de automatización digital surgieron en el sector ganadero. La ganadería de precisión es posible gracias a la colocación de sensores en los animales o en el equipo de los establos para controlar el clima y monitorear la situación sanitaria, los movimientos y las necesidades de los animales, como en relación con la cría[67]. Se han desarrollado varias tecnologías de ganadería de precisión que facilitan el manejo de los animales individuales basándose en el marcado electrónico; la más difundida entre estas son los robots de ordeño, que permiten ordeñar las vacas sin intervención humana directa. La ordeñadora convencional utiliza una tecnología de vacío, pero necesita de un operador humano para colocarla y retirarla del animal. Por otro lado, el marcado electrónico automatiza el proceso, dado que permite que un robot de ordeño acceda a una base de datos con las coordenadas de las ubres de determinadas vacas[68]. Este sistema totalmente automatizado y adaptado a la producción animal tiene grandes perspectivas en cuanto a ahorro de costos y aumento de la productividad[69]. Sin embargo, los datos sobre los beneficios monetarios de los robots de ordeño muestran resultados variados: algunos estudios indicaron un efecto positivo[70, 71, 72], mientras que otros no encontraron ganancias financieras en comparación con los sistemas de ordeñadoras convencionales[71]. Por lo tanto, su introducción parecería estar impulsada no solo por consideraciones monetarias, sino también

CUADRO 2 SELECCIÓN DE HITOS EN LA AUTOMATIZACIÓN DIGITAL DE LA AGRICULTURA

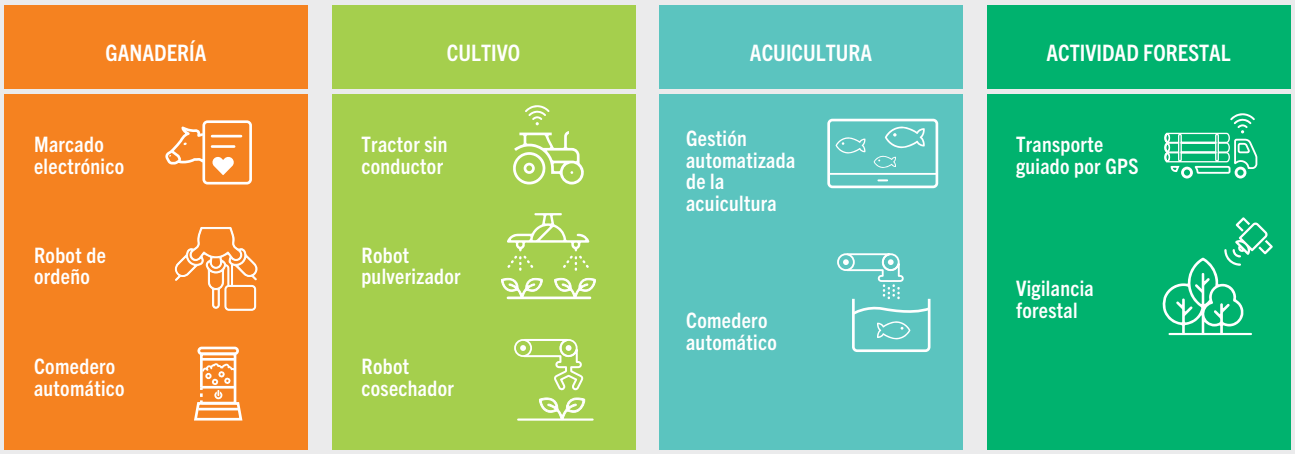
Año	Tecnología o actividad	Empresa u organización	País	Referencia
1974	ID electrónica para el ganado	Universidad del Estado de Montana	Estados Unidos de América	Hanton y Leach, 1974[50]
1983	Orden ejecutiva por la que se autorizó el uso civil del GPS	Gobierno de los Estados Unidos	Estados Unidos de América	Brustein, 2014[51] Rip y Hasik, 2002[52]
	Aplicación de fertilizantes y plaguicidas con drones	Yamaha	Japón	Sheets, 2018[53]
1987	Aplicación de fertilizantes con TDV controlada por ordenador	Soil Teq	Estados Unidos de América	Mulla y Khosla, 2016[54]
1992	Robot de ordeño	Lely	Países Bajos	Lely, 2022[55] Sharipov *et al.*, 2021[56]
1997	Equipo agrícola guiado mediante GNSS	Beeline	Australia	Rural Retailer, 2002[57]
	N-Sensor	Yara	Noruega	Reusch, 1997[58]
2006	Controladores de secciones de pluma de pulverizadora automatizada	Trimble	Estados Unidos de América	Trimble, 2006[59]
2009	Corte automático de hileras de siembra	Ag Leader	Estados Unidos de América	Ag Leader, 2022[60]
2011	Robot deshierbador	Ecorobotix Naïo Technologies	Suiza Francia	Ecorobotix, 2022[61] Naïo, 2022[62]
2013	Sistema de asistencia al operador de cosechadoras-trilladoras	Claas	Alemania	Claas, 2022[63]
2017	Primera producción de cultivos totalmente autónoma	Universidad Harper Adams	Reino Unido	Hands Free Hectare, 2018[64]
2018	Recolector de granos autónomo	Smart Ag	Estados Unidos de América	Smart Ag, 2018[65]
2022	Tractor de gran escala autónomo	John Deere	Estados Unidos de América	John Deere, 2022[66]

NOTAS: GPS: Sistema de Posicionamiento Mundial; TDV: tecnología de dosis variable; GNSS: sistema mundial de navegación por satélite.
FUENTE: Lowenberg-DeBoer, 2022[48].

sociales, como una mayor flexibilidad de los horarios de trabajo y una mejor calidad de vida, factores especialmente importantes en las granjas pequeñas y medianas. Sin embargo, más recientemente, las granjas lecheras más grandes (con más de 1 000 vacas) se han unido a las granjas medianas y han adoptado sistemas de ordeño robotizado debido a la escasez de mano de obra. Por lo tanto, la decisión de utilizar el ordeño robotizado puede basarse en consideraciones muy diferentes en las granjas lecheras más grandes[48]. En el Recuadro 5 se presentan ejemplos de automatización digital de la producción ganadera en África, Europa y América Latina y el Caribe.

El valor de las ventas mundiales de sistemas de ordeño automático ha aumentado de 1 200 millones de USD en 2016 a 1 600 millones de USD en 2019, lo que apunta a una demanda creciente, aunque está concentrada en los países de ingresos altos, con países como Alemania, los Países Bajos y el Reino Unido entre los primeros que los han adoptado[73, 74]. De hecho, aunque no se dispone de estadísticas sobre la introducción en las distintas regiones y países, los datos indican que su adopción se limita a los países de ingresos altos, principalmente en Europa septentrional[75]. La demanda está impulsada por la falta de mano de obra rural, junto con un cambio generacional.

FIGURA 5 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES Y ROBÓTICA CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL POR SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA



FUENTE: Elaboración de la FAO para este informe.

El Cuadro 2 (pág. 32) muestra que el primer sistema de ordeño automático disponible en el mercado se utilizó en los Países Bajos en 1992; desde entonces, se ha extendido a otros países[69]. La falta de datos sobre los países de ingresos bajos y medianos sugiere que la tecnología está casi ausente en esos países[48, 76].

Además de las máquinas de ordeño, también existen tecnologías para la alimentación automatizada de las vacas con distintas cantidades de concentrados en función de su producción de leche[77]. Lo mismo ocurre con las aves de corral, en cuyo caso los sistemas de alimentación se basan en el peso de las aves y el recuento de huevos, y el control informatizado de la ventilación se basa en la temperatura y la humedad[78]. Sin embargo, los datos y las pruebas sobre sus tendencias de introducción y sus factores son aún más escasos.

Avances en la automatización de la producción de cultivos

La automatización de la producción de cultivos implica el uso de muchas tecnologías de agricultura de precisión, tales como TDV, GNSS, robots, drones e IA. Estas pueden hacer precisa la recopilación de datos espaciales, basados en un sistema de información geográfica (SIG), utilizando información de modelos de simulación de cultivos para determinar la cantidad de insumos necesarios para maximizar el rendimiento y las ganancias[67]. Los sensores, entre los que se encuentran los sensores de proximidad (por ejemplo, para la medición del nitrógeno en el suelo) y los sensores de teledetección (por ejemplo, las imágenes por satélite), constituyen la base de estas aplicaciones. En función de la conectividad, los operadores pueden compartir estos datos con las partes interesadas a través de teléfonos inteligentes y aplicaciones de fácil utilización que presentan los datos de forma sencilla[35].

La adopción varía según el producto agrícola, el costo del capital, la escala de sueldos y otros factores económicos. En todo caso, la adopción por parte de los pequeños productores agrícolas es insignificante; esto se debe a que casi no hay investigaciones sobre su adaptación a la agricultura en pequeña escala y a que no es fácil transferir la tecnología de las actividades mecanizadas a aquellas no mecanizadas.

RECUADRO 5 AUTOMATIZACIÓN DIGITAL DE LA PRODUCCIÓN GANADERA: EJEMPLOS DE AMÉRICA LATINA, ÁFRICA Y EUROPA

La empresa Cattler se originó en la Argentina en 2019, pero desde entonces ha ampliado sus negocios a otros países, como el Paraguay y el Uruguay y, más recientemente, al Brasil y los Estados Unidos de América. Ofrece un sistema automatizado de gestión de explotaciones de ganado vacuno basado en información satelital y proporciona información y conocimientos para mejorar la gestión. La empresa se dirige a las explotaciones medianas más que a las explotaciones grandes. Según la empresa, uno de los principales motores de la adopción ha sido la necesidad de simplificar las actividades y lograr un rendimiento de la inversión.

En Burkina Faso y Malí, y pronto en el Níger, con el apoyo del Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo, GARBAL proporciona información de asesoramiento muy contextualizada sobre la producción ganadera y agrícola, así como sobre los mercados de forraje, leche y cereales. Las soluciones digitales ofrecidas, centradas específicamente en las mujeres y los jóvenes, ayudan a los pequeños productores y a los pastores afectados por el cambio climático en el Sahel a tomar decisiones relativas a las tierras de pastoreo, la migración de los rebaños, el tiempo y diversas prácticas agrícolas. Las soluciones se basan en imágenes de satélite, SMS de teléfonos móviles, el servicio suplementario de datos no estructurados (USSD) y un centro de llamadas con operadores locales que hablan los idiomas locales. El uso de teléfonos móviles logra que la solución sea muy accesible. Se impulsó, entre otras cosas, mediante asociaciones entre los sectores público y privado, subvenciones, colaboración con organizaciones locales de agricultores y pastores, y la unión de los conocimientos tradicionales y científicos. Las principales dificultades han sido la necesidad de soluciones muy específicas para cada contexto, las condiciones de seguridad en algunos países, los importantes requisitos de creación de capacidad, los problemas de conectividad y recepción de la red y los problemas de calidad de los datos.

Lely, una empresa familiar de los Países Bajos, ofrece soluciones de robótica y de *software* de gestión para granjas lecheras dirigidas a los productores de tamaño mediano y grande con más de 100 vacas, aunque no las ofrece hasta la fecha a las granjas más grandes. Las principales tecnologías adoptadas son robots de ordeño estacionarios, seguidos de robots de estiércol y robots de alimentación. Los robots segadores de hierba optimizan la producción de hierba, mientras que los próximos productos se centran en la reducción de las emisiones. Esto se complementa con un *software* de gestión para todas las actividades de la granja, que incluye información sobre el estado del bienestar de los animales. La tecnología propuesta puede resolver los problemas relacionados con la disponibilidad de mano de obra limitada, los reglamentos sobre emisiones y el bienestar de los animales. Los principales factores para la adopción son la eficiencia energética, la reducción del uso de productos químicos y la escasez de mano de obra.

FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[2].

Las tecnologías basadas en el GNSS y la TDV, combinadas con maquinaria motorizada, son las más utilizadas en la producción de cultivos para permitir el guiado automático y la aplicación de insumos sobre la marcha. Uno de los principales factores de la adopción de las tecnologías basadas en el GNSS es la capacidad que ofrecen durante la aplicación de insumos (por ejemplo, de fertilizante) para eliminar tanto los saltos accidentales como el solapamiento de plantas, lo que se traduce en un ahorro de insumos. Otros factores son la reducción de la fatiga del operador, la posibilidad de que los miembros de la familia trabajen más horas, la flexibilidad en la contratación de conductores (ya que no es necesario que estén altamente cualificados o que tengan experiencia) y los beneficios ambientales (dado que hay menos aplicaciones que se solapan), además de otras ventajas difíciles de cuantificar y más parecidas a los efectos secundarios de la adopción. El hecho de que los beneficios del guiado por el GNSS se aprecien rápidamente (por ejemplo, el ahorro de insumos por la reducción del solapamiento es casi inmediato) y sean visibles tanto para el agricultor como para sus vecinos (por ejemplo, las franjas de maleza debido a saltos de herbicida están mal vistas en la comunidad agrícola) también contribuyó a la adopción[48].

Las TDV reducen la aplicación de insumos y optimizan el rendimiento de los cultivos, lo que también aporta beneficios ambientales, especialmente si reducen la aplicación excesiva. Los datos sobre el aumento de la rentabilidad de los fertilizantes aplicados con TDV son muy variados[79, 80], lo que explica la modesta difusión en todo el mundo de los fertilizantes de TDV basados en mapas, y sobre todo cuando la rentabilidad es uniforme (por ejemplo, la aplicación de nitrógeno a la remolacha azucarera).

En la categoría de automatización más avanzada, los robots de cultivo autónomos comenzaron a utilizarse en el mercado muy recientemente. Se utilizan sobre todo en países de ingresos altos (por ejemplo, Francia) para el deshierbe de hortalizas orgánicas y remolacha azucarera[81]. Hands Free Hectare —un proyecto establecido en el Reino Unido en 2016 con la finalidad de desarrollar y mostrar la automatización agrícola— fue la primera demostración pública de máquinas de cultivo autónomas que participan en la producción y la cosecha de un cultivo comercial[64]. Desde entonces, los fabricantes han anunciado máquinas autónomas (véase el Cuadro 2 en la pág. 32), y más de 40 empresas emergentes las están desarrollando actualmente. Los robots de cultivo autónomos se asocian con el ahorro de mano de obra, la mejora de la sincronización de las actividades, la aplicación más precisa de los insumos y la reducción de la compactación del suelo, especialmente con los robots de enjambre, más pequeños. En un análisis de 18 casos se descubrió que los robots de cultivo autónomos utilizados para la cosecha, la siembra y el deshierbe eran económicamente viables en determinadas circunstancias[82].

En algunos países, las máquinas de cultivo autónomas requieren la supervisión humana en el lugar en todo momento, en cuyo caso puede ser más conveniente para el agricultor usar equipo convencional[83]. En un estudio, se concluyó que la supervisión a distancia (por ejemplo, desde la oficina de la explotación agrícola) es óptima solo si el funcionamiento autónomo no presenta problemas[84]. Se hizo hincapié en la necesidad de una mayor capacidad de IA a fin de que la máquina autónoma pueda resolver más problemas sin intervención humana. Del mismo modo, las restricciones de velocidad para las máquinas de cultivo autónomas, como aquellas que se aplican en los Estados Unidos de América, pueden hacer que no sean rentables[85].

Existen propuestas para desarrollar pequeñas máquinas de cultivo autónomas de bajo costo para las explotaciones agrícolas de pequeña y mediana escala como parte de la solución a la falta de mano de obra agrícola en los países de ingresos bajos y medianos, con posibles beneficios especialmente para los jóvenes rurales[86, 87, 88, 89]. Lamentablemente, no existen análisis de viabilidad para los países de ingresos bajos y medianos. Sin embargo, la bibliografía disponible indica que la introducción de robots autónomos en estos países ofrece los siguientes posibles beneficios: i) reducción de la necesidad de mano de obra humana cuando esta es escasa; ii) reducción de los costos y de las economías de escala, lo que garantiza la accesibilidad de las tecnologías para las explotaciones más pequeñas que utilizan mecanización convencional, y iii) capacidad para utilizar las tecnologías en campos de forma irregular de manera rentable, evitando la remodelación de los territorios rurales en grandes campos rectangulares (en los que la mecanización tradicional es más eficaz), un proceso que perturba a las comunidades.

Se utilizan drones para recopilar información y automatizar la aplicación de insumos, de forma similar a la TDV basada en mapas. Sin embargo, su uso suele estar sujeto a estrictos reglamentos debido a la preocupación por la aplicación excesiva de insumos, el flujo de plaguicidas y los peligros relacionados con la aviación[90, 91]. Por ejemplo, en el Reino Unido, se autoriza la aplicación de herbicidas con drones solo en lugares inaccesibles en condiciones limitadas. Suiza, por el contrario, permite una aplicación de fertilizantes con drones más flexible, lo que puede alentar a otros países europeos a seguir su ejemplo[83, 92]. Alrededor del 14 % de los proveedores agrícolas minoristas de los Estados Unidos proporcionaron servicios de aplicación de insumos con drones en 2021, y se prevé que ese porcentaje aumente al 29 % para 2024[92]. La aplicación de insumos con drones también es bastante común en algunos países de ingresos medianos, como el Brasil y China[93].

Algunos avances menos conocidos en materia de automatización: acuicultura, actividad forestal y producción de cultivos en un ambiente controlado

La automatización digital está en auge en el sector de la acuicultura como respuesta a la escasez de mano de obra y a los elevados sueldos. Se han adoptado ampliamente innovaciones que automatizan la alimentación y el seguimiento, a pesar de sus elevados costos de inversión, ya que reducen al mínimo la mano de obra y otros costos de producción variables y reducen las necesidades de mano de obra a unos pocos operadores altamente cualificados[94].

RECUADRO 6 NUEVAS TECNOLOGÍAS DE ACUICULTURA: EJEMPLOS DE LA INDIA Y MÉXICO

La acuicultura ya ha demostrado su papel fundamental en la seguridad alimentaria y la nutrición mundial, dado que constituye una de las mayores fuentes de proteína animal del mundo, con un crecimiento de la producción del 7,5 % anual desde 1970[95]. Dada la capacidad de la acuicultura para seguir creciendo, pero también la enormidad de los retos ambientales que enfrenta el sector a medida que intensifica la producción, se requieren nuevas estrategias para el desarrollo sostenible de la acuicultura. Estas estrategias deben aprovechar los avances técnicos, por ejemplo, en materia de alimentación, selección genética, bioseguridad y control de enfermedades e innovación digital. Esto puede, a su vez, aumentar la precisión, mejorar la toma de decisiones, facilitar el seguimiento autónomo y continuo de los peces y reducir la dependencia de la mano de obra, mejorando así la seguridad del personal y la sanidad y el bienestar de los peces, al tiempo que aumenta la productividad, el rendimiento y la sostenibilidad ambiental[96].

Aquaconnect, de la India, es un ejemplo de ello. Aunque la India es uno de los mayores productores acuícolas del mundo, ya que recolectó 7 millones de toneladas en 2018[95], la industria se caracteriza por una falta de transparencia y cadenas de valor ineficientes. Aquaconnect utiliza tecnologías de inteligencia artificial (IA) y teleobservación desde satélites para hacer un seguimiento del rendimiento de las explotaciones acuícolas y ofrecer a los camaroneros y acuicultores (en su mayoría, de pequeña y mediana escala) asesoramiento para aumentar la productividad. Esta solución se combina con una plataforma de múltiples canales que vende insumos agrícolas a precios asequibles. También sirve de puente entre los agricultores y las instituciones financieras y mejora los vínculos con el mercado. Estas soluciones están ayudando actualmente a más de 60 000 piscicultores y camaroneros de toda la India a aumentar la productividad, mejorar los vínculos con el mercado y el acceso al crédito formal y a los seguros[1]. Paralelamente, el Gobierno de la India ha destinado unos 3 000 millones de USD a la modernización de la agricultura, incluidas las cadenas de valor de la acuicultura y la pesca, y ha expresado su interés en apoyar iniciativas (por ejemplo, empresas emergentes) que apliquen tecnologías y promuevan la innovación.

Otro ambicioso proyecto que promete transformar la industria acuícola es Shrimpbox, la primera granja de camarones robotizada del mundo, desarrollada en Oaxaca (México) (véase el estudio de casos de Atarraya en el Anexo 1). La tecnología proporciona sistemas automatizados que pueden ser vigilados a distancia con un *software* con capacidad para aprender y tomar decisiones. Los sistemas se integran con el control biológico basado en métodos microbianos para reducir la acumulación de nitratos, prevenir enfermedades y ahorrar agua en la producción de camarones, lo que permite reducir considerablemente el consumo de agua, las necesidades de mano de obra, el riesgo de enfermedades y las pérdidas[2]. Según los creadores de esta tecnología, una piscifactoría robotizada puede producir en 0,5 ha tanto como una piscifactoría tradicional de 100 ha, utilizando solo el 5 % del agua y sin antibióticos[97]. Shrimpbox puede criar camarones en climas más fríos y sin acceso al mar. A su vez, esto significa que se pueden suministrar camarones frescos de alta calidad a regiones que hoy dependen de la importación de productos congelados.

Aquaconnect y Shrimpbox son solo dos ejemplos de nuevas tecnologías destinadas a hacer de la acuicultura un proceso más sostenible, inclusivo y eficiente. Sin embargo, la prioridad debería ser desarrollar más la acuicultura en África y en otras regiones donde el desarrollo tecnológico está rezagado y la inseguridad alimentaria y la malnutrición son más graves[95].

En el Recuadro 6 se muestran innovaciones acuícolas recientes en la India y México.

En la actividad forestal, muchas actividades de recolección de madera están ya muy automatizadas, y se utiliza maquinaria motorizada que se va actualizando con instrumentos digitales. Más recientemente, las tecnologías móviles, combinadas con la realidad virtual y técnicas de teledetección, están allanando el camino para el uso de máquinas automáticas avanzadas en los bosques. Las cosechadoras de madera y los autocargadores —máquinas avanzadas que se utilizan para el corte y el transporte de troncos— son actualmente uno de los principales objetivos de las iniciativas de automatización[98].

Las nuevas tecnologías digitales están cada vez más difundidas. En un análisis reciente se determinó que se estaba prestando gran atención a las innovaciones basadas en la teledetección para el seguimiento, la planificación y el manejo de los bosques, donde las técnicas de aprendizaje automático también desempeñan un papel importante en la recopilación, el procesamiento y el análisis de datos. Es probable que la introducción continua de instrumentos digitales plantee nuevas preguntas sobre los ecosistemas forestales como territorios dinámicos, sociales, ecológicos y tecnológicos. La investigación futura debería examinar más detenidamente la manera en que los investigadores, los administradores y las partes interesadas del sector forestal pueden anticiparse »

RECUADRO 7 EVOLUCIÓN DEL SECTOR FORESTAL: MECANIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DIGITAL

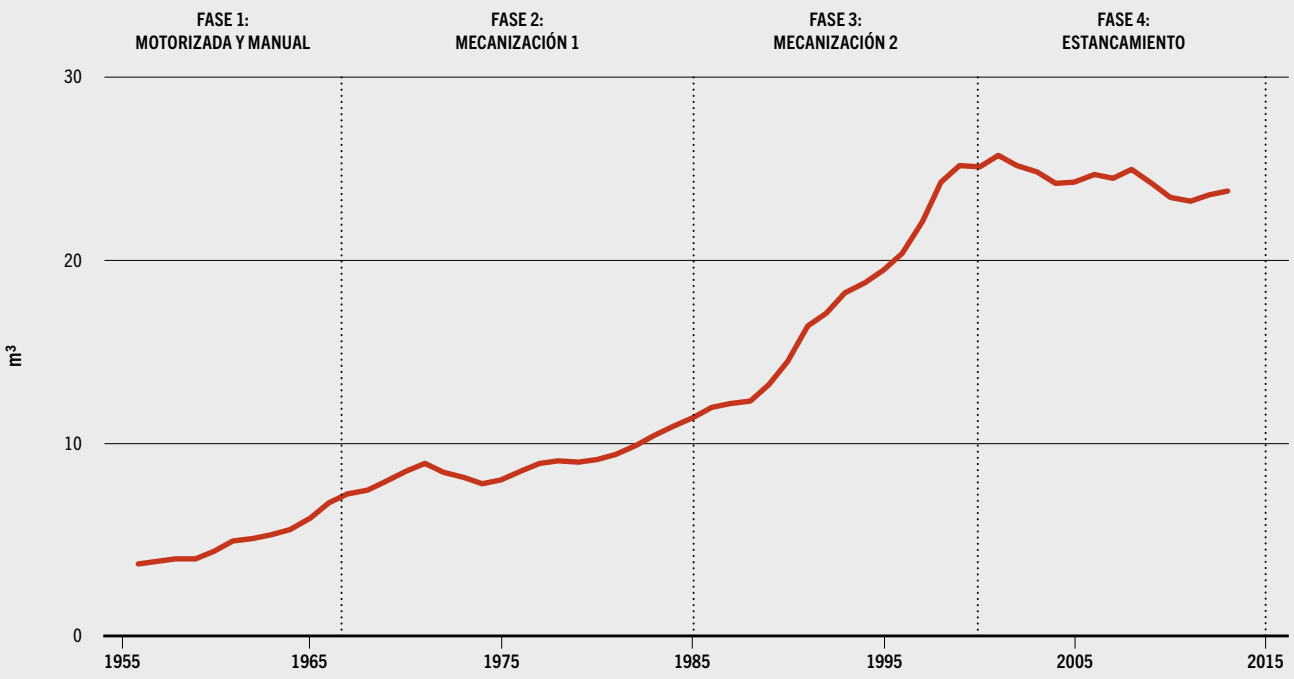
Históricamente, el trabajo en el sector forestal era un trabajo físico pesado y potencialmente peligroso, en especial en la fase de recolección de la madera. Los sistemas en los que se usaba poca tecnología requerían un equipo especial de tala formado por un leñador y un leñador de apoyo, con un grupo adicional de trabajadores para recortar las ramas. Luego, otro equipo especializado, integrado por un marcador, un trozador y dos o tres arrastradores, cortaba los árboles en troncos[100]. Debido a los exigentes requisitos de mano de obra y al peligro para los trabajadores, estos métodos de tala manual son mucho menos comunes en la actualidad.

En la década de 1950 se inició un proceso de modernización del sector maderero, que pasó de depender principalmente de la mano de obra a la mecanización y la automatización parcial. El aprovechamiento forestal puede dividirse en cuatro fases distintas: la tala de los árboles, la extracción del bosque, la clasificación y la carga en un depósito y el transporte al mercado. Las máquinas recolectoras actuales tienen capacidad para realizar múltiples actividades (tala, extracción, trozado y clasificación). Esta maquinaria ha permitido aumentar considerablemente la eficacia y mejorar las condiciones de trabajo. Las ventajas de la mecanización y la automatización digital incluyen la seguridad y la comodidad del operador de la máquina recolectora. En el proceso, la productividad de la mano de obra ha experimentado un aumento sustancial. En Suecia, la productividad por trabajador se multiplicó por seis entre 1960 y 2010 (véase la figura).

Incluso en estos sistemas de tala más mecanizados, la mano de obra suele representar entre el 30 % y el 40 % de los costos de explotación en los países europeos[102]. El entorno de trabajo ocasiona mucho estrés, ya que los operadores tienen que tomar muchas decisiones a un ritmo rápido, maniobrar maquinaria compleja e identificar diferencias en la calidad de los troncos, lo que limita el número de horas que pueden trabajar. Por lo tanto, una forma de aumentar la productividad es elevar el nivel de automatización. La introducción de equipo autónomo es incentivada por la productividad y los gastos de explotación. Aunque una máquina autónoma suele ser más lenta que un equipo manejado por un operador, puede resultar más rentable; las máquinas semiautónomas pueden permitir que un operador maneje varias máquinas al mismo tiempo.

La mayoría de las máquinas forestales modernas pueden convertirse fácilmente para su control a distancia a un costo relativamente bajo, y ya ofrecen muchas opciones de trabajo. Como se ha señalado, el funcionamiento de las máquinas suele ser más lento, y mucho más si la tarea es compleja, por lo que estas no se introducirán en las actividades forestales basándose únicamente en la mejora de la productividad. Sin embargo, podrían considerarse por otros motivos; por ejemplo, para salvaguardar la seguridad de los operadores, o si un operador a tiempo completo en el sitio está subempleado.

FIGURA MATERIAL DEJADO EN PIE POR DÍA DE TRABAJO EN LA INDUSTRIA FORESTAL SUECA, PROMEDIO TRIENAL MÓVIL



FUENTE: SkogForsk, como se informa en McKinsey and Company, 2020[101].

RECUADRO 7 (Continuación)

En la actualidad, no existen sistemas totalmente autónomos en la explotación de la madera. Sin embargo, se ha señalado que la extracción y el posterior transporte de tallos y troncos con sistemas guiados por GPS pueden ser las primeras actividades robóticas, y pronto se podrían llevar a cabo con una modesta inversión en investigación y desarrollo (I+D). La tala de plantaciones también puede llegar a ser económicamente viable a largo plazo, pero requerirá una importante inversión en I+D[103]. Por último, el transporte por carretera de los troncos recolectados es un aspecto de las actividades forestales en el que es necesario mejorar la productividad en la cadena de suministro de la madera. La tecnología de los camiones sin conductor evoluciona rápidamente, con la ventaja de que el transporte autónomo reduce las necesidades de mano de obra y, por lo tanto, los costos. En lo que respecta al movimiento de camiones fuera de las carreteras públicas, ya se utilizan vehículos autónomos en las actividades mineras, por lo que su expansión a la actividad forestal es una posibilidad real.

También se están desarrollando nuevos sistemas de recolección más favorables al medio ambiente. Una máquina recolectora de empuje puede ahora recolectar madera en terrenos forestales escarpados, sensibles o irregulares. Uno de los objetivos es limitar el impacto negativo en los suelos forestales mediante el contacto puntual con el suelo, sin dejar la huella continua que ocasionan las recolectoras de ruedas u orugas[103]. Aunque este tipo de sistemas aún está lejos de llegar al mercado, en Nueva Zelandia se utiliza una cosechadora forestal oscilante que no hace contacto con los suelos forestales. Funciona independientemente de las condiciones del terreno (inclinación, rugosidad, etc.) y se mantiene por encima del suelo y se desplaza de árbol en árbol utilizando los propios árboles como soporte, reduciendo así la alteración del suelo[104].

Estos avances favorables al medio ambiente pueden ser valiosos en los bosques donde el uso de la mecanización motorizada en la recolección puede causar compactación y erosión del suelo, así como pérdida de biodiversidad. Por último, si se tiene en cuenta que los beneficios que proporcionan los bosques van mucho más allá de la producción de madera —ya que incluyen captación de carbono, productos forestales no madereros, prevención de la erosión, purificación del agua y recreación— es importante evaluar de qué manera, mediante el uso de sensores, la automatización digital puede aumentar también el valor de estos beneficios. Un ejemplo importante es el seguimiento de la deforestación, concretamente de las actividades ilegales, mediante datos satelitales. La capacidad de seguimiento de la deforestación ha aumentado enormemente en cuanto a la granularidad de los datos, que ahora están disponibles a nivel mundial con una resolución de 5 m y con periodicidad mensual. Un ejemplo concreto en la cuenca del Amazonas fue la detección de la pérdida de bosques por la expansión de las plantaciones de palmas aceiteras hacia territorios indígenas en el Ecuador[105]. La disponibilidad de estos datos de forma gratuita y con cobertura mundial es un excelente ejemplo de la manera en que las soluciones digitales pueden utilizarse para diagnosticar problemas.

» y adaptarse a la incertidumbre tanto ambiental como tecnológica en el ecosistema forestal[99]. En el Recuadro 7 se presenta un resumen de la evolución del sector forestal en relación con la mecanización y el potencial de automatización digital.

Otro ámbito en el que la automatización digital ofrece posibilidades es la agricultura de ambiente controlado, que incluye la agricultura en invernaderos y la agricultura vertical. Los invernaderos son la forma más común de agricultura de ambiente controlado. Por su propia índole, pueden estar sujetos a vigilancia, control y optimización ambientales. Las innovaciones en materia de sensores e instrumentos de bajo costo y bajo consumo, dispositivos de comunicación, procesamiento de datos y aplicaciones móviles, junto con los avances tecnológicos en materia de diseño, modelos de simulación e ingeniería hortícola, han fomentado el paso de los invernaderos convencionales a ambientes controlados inteligentes[106]. Las empresas emergentes especializadas en agricultura de ambiente controlado, como Food Autonomy en Hungría, ioCrops en la República de Corea y UrbanaGrow en Chile, apuntan a un verdadero potencial en este ámbito[2].

Antes de emprender un desarrollo comercial a gran escala, es necesario realizar un análisis económico preciso, considerando los elevados gastos de puesta en marcha que conllevan la automatización de los invernaderos y la agricultura vertical[106]. Al igual que con todas las tecnologías que se presentan en este capítulo, el costo de una mayor automatización en relación con el aumento de la rentabilidad es clave y debería considerarse en futuros estudios para justificar niveles de automatización más elevados. ■

CONCLUSIONES

En este capítulo se han presentado las tendencias y se han examinado los factores de la mecanización motorizada en los sistemas de producción agrícola, así como las tecnologías de automatización digital más recientes. Se han resaltado las grandes disparidades en cuanto a la mecanización en todo el mundo: Asia y América Latina y el Caribe han mostrado un progreso considerable al respecto, impulsado por la evolución de los sistemas agrícolas, la transformación estructural y la urbanización, mientras que en el África subsahariana el progreso ha sido limitado. También se ha examinado cómo y dónde se ha utilizado con éxito la automatización digital en la agricultura y su potencial para transformar el uso de la maquinaria agrícola.

Cualquier debate sobre los beneficios de la mecanización y la automatización digital de la agricultura suele comenzar con el ahorro de mano de obra, pero pasa rápidamente a otras ventajas. En el caso de la mecanización motorizada, el beneficio más reconocido es la reducción del trabajo pesado, además de la puntualidad de las actividades ante la escasez y estacionalidad de la mano de obra agrícola. Aunque la mecanización se asocia a efectos positivos relacionados con la productividad del trabajo, la reducción de la pobreza, la seguridad alimentaria, la mejora de la nutrición y la salud y el bienestar, también suscita preocupaciones en relación con el desempleo[107], la pérdida de biodiversidad[108, 109], la degradación de las tierras[15, 110] y las crecientes disparidades entre las explotaciones agrícolas grandes y pequeñas[111, 112]. Estas preocupaciones parecen derivarse principalmente del predominio de la maquinaria motorizada a gran escala propulsada por grandes tractores de cuatro ruedas[7, 113, 114].

- En la bibliografía sobre la automatización digital, se afirma que puede revertir algunos de los problemas sociales y ambientales que plantea la mecanización motorizada mencionados anteriormente[48]. Algunos ejemplos de las ventajas son: operaciones de campo neutrales en cuanto a la escala (como resultado del uso de equipo más pequeño); precisión en la aplicación de los insumos; reducción de la compactación del suelo (dado que se usan pequeños robots de enjambre); capacidad de realizar operaciones de campo en lugares donde las tecnologías manuales o mecánicas se ven obstaculizadas (por ejemplo, suelos húmedos y laderas empinadas); agricultura rentable en campos pequeños y de forma irregular; y recopilación automatizada de datos sobre los cultivos y el ganado[54, 82, 115].
- En este capítulo se ha mostrado que ya existe una variedad de soluciones tecnológicas que pueden adoptarse en países en diferentes etapas de desarrollo. El reto que se plantea para los gobiernos es lograr una introducción inclusiva, facilitando el acceso para todos, incluidos los pequeños productores, las mujeres, los jóvenes y los grupos vulnerables, y asegurarse de que las soluciones tecnológicas disponibles se adapten al contexto y las necesidades específicos de los distintos productores.

Velar por una introducción inclusiva, con todas las dificultades que conlleva, permitirá a los países beneficiarse de las tecnologías de automatización digital y ayudará a impulsar la transformación de los sistemas agroalimentarios de forma equitativa y sostenible. Los casos que se presentan en este capítulo ilustran de qué manera los pequeños productores pueden obtener beneficios de los servicios de mecanización y de la automatización digital, al tiempo que reducen su huella ambiental. Sin embargo, existe un creciente número de datos que demuestran que las opciones en materia de políticas que elijan los gobiernos influirán en la dirección de estas tecnologías y en su adopción en diferentes países y por diferentes productores. Las opciones en materia de políticas determinan el acceso al crédito, la creación de capacidad y la información. Idealmente, los países deberían tratar de crear condiciones equitativas para las tecnologías innovadoras que sean pertinentes para los sistemas agroalimentarios locales. Esto permitirá que el sector privado adapte la oferta y la demanda de mecanización motorizada, automatización digital y robótica. En el próximo capítulo se presentarán los argumentos a favor de estas tecnologías y sus perspectivas en relación con la transformación de la agricultura. En particular, se examinará de qué manera la mecanización motorizada, a menudo combinada con soluciones digitales, puede seguir desempeñando un papel importante, especialmente para los pequeños productores de los países de ingresos bajos y medianos bajos, donde la adopción ha sido lenta. ■

SERBIA
Cosechadora autónoma en un campo.
©Scharfsinn/ Shutterstock.com

CAPÍTULO 3 ARGUMENTOS A FAVOR DE LA INVERSIÓN EN AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

MENSAJES PRINCIPALES

➔ El argumento a favor de la mecanización motorizada se basa en el potencial que esta tiene para reducir los costos de producción, ampliar e intensificar la producción y mejorar la productividad. Entre los principales obstáculos que impiden su adopción figuran el acceso inadecuado a servicios necesarios, por ejemplo, servicios de financiación y extensión —especialmente para grupos vulnerables, excluidos y marginados como los pequeños productores y las mujeres—; la ausencia de un entorno empresarial propicio; la falta de tecnologías adaptadas a la agricultura en pequeña escala, y las deficiencias de infraestructura.

➔ La mecanización motorizada aún puede ofrecer ventajas a muchos países de ingresos bajos y medianos donde su adopción ha sido lenta. Estos países deberían aprovechar la gran variedad de maquinaria disponible y sus múltiples usos posibles, adaptando la maquinaria a las necesidades locales, especialmente las de los pequeños productores que suelen trabajar en superficies pequeñas con terreno irregular.

➔ Las tecnologías digitales pueden potenciar la precisión y la oportunidad de las actividades agrícolas, aumentar la eficacia de los servicios de asesoramiento agrícola y abordar los problemas ambientales derivados de la mecanización llevada a cabo en el pasado, por ejemplo, la erosión del suelo, creando al mismo tiempo resiliencia a las perturbaciones y tensiones.

➔ Las tecnologías digitales posibilitan servicios de alquiler de maquinaria, en particular en países de ingresos bajos, y permiten el acceso a tecnologías a grupos que suelen quedar excluidos, como pequeños productores y mujeres productoras. Los agricultores jóvenes, en particular, son factores clave de la transformación de la agricultura familiar hacia la automatización agrícola.

➔ El argumento a favor de la adopción de tecnologías de automatización digital todavía es débil, especialmente en países de ingresos bajos y medianos bajos, debido a las deficiencias de conectividad y suministro eléctrico y las limitaciones de acceso a servicios (por ejemplo, financiación, seguros o educación). El problema es aún mayor en el caso de la robótica con inteligencia artificial (IA), cuya adopción se prevé que se acelerará principalmente entre los productores a gran escala en países de ingresos altos.

➔ Para aprovechar el potencial de las tecnologías de automatización digital es necesario abordar los factores que dificultan su adopción, como las deficiencias de infraestructura, el analfabetismo digital, los altos costos de las tecnologías y la falta de un entorno propicio, a la vez que se invierte en la realización de investigaciones y ensayos en todo el mundo para desarrollar tecnologías adecuadas al contexto.

En el Capítulo 2 se examinaron las tendencias y los factores de la automatización agrícola, en particular la mecanización motorizada y las tecnologías de automatización digital más recientes vinculadas con la agricultura de precisión. La mecanización motorizada se ha adoptado de forma generalizada en todo el mundo, aunque de manera desigual entre los distintos países y dentro de ellos. La mayoría de países del África subsahariana sigue yendo por detrás. Otras regiones han registrado desigualdades en el acceso a la mecanización, que es generalmente inferior para grupos vulnerables como los pequeños productores y las mujeres. El mundo se encuentra actualmente en la fase inicial de una oleada de automatización digital de la agricultura, mediante sensores, robots, la IA y otros instrumentos digitales para automatizar uno o más de los componentes de las labores agrícolas, a saber, el diagnóstico, la toma de decisiones y la ejecución. Aunque muchos países

han adoptado ampliamente la mecanización motorizada, los productores agrícolas y los agronegocios todavía están tratando de determinar qué tecnologías de automatización digital valen la pena y son adecuadas para ellos, teniendo en cuenta las condiciones locales y las tecnologías que utilizan actualmente. Uno de los principales obstáculos para la adopción es la aparente falta de beneficios derivados de esta inversión, debido a los elevados costos de adquisición u operacionales en comparación con los costos de mano de obra de los sistemas actuales. Otros factores que impiden la adopción son la falta de tecnologías adecuadas para la producción en pequeña escala, el acceso insuficiente a servicios de mantenimiento y reparación, el bajo nivel de alfabetización digital, la mala conectividad y el escepticismo hacia las innovaciones. En el presente capítulo se examina cómo inciden estos factores en los argumentos a favor de la automatización agrícola y la forma de mejorarla.

Los argumentos a favor de la inversión en tecnología agrícola se basan en los posibles beneficios para los productores agrícolas, así como para quienes participan en la producción, el suministro y el mantenimiento o la reparación de dicha tecnología. Se presupone que los agentes pertinentes, esto es, productores, distribuidores y proveedores de mantenimiento y servicios, adoptan decisiones racionales para maximizar sus beneficios y su bienestar. La inversión en tecnologías de automatización conlleva costos, que suelen aumentar si las tecnologías no están ampliamente disponibles a nivel local. Los productores y proveedores de tecnología solo aceptarán la automatización si los beneficios compensan estos costos.

En el caso de algunas tecnologías y en ciertas condiciones, los costos de inversión pueden superar los posibles beneficios, al menos a corto plazo, y esto puede desalentar la inversión, a pesar de las ventajosas perspectivas para la sociedad en general. Por tanto, es precisa la intervención pública para armonizar los beneficios privados con los intereses de la sociedad en su conjunto y, de este modo, mejorar los argumentos a favor. En este capítulo también se examinan los problemas (principalmente ambientales) relacionados con la mecanización motorizada y se considera cómo pueden afrontarse, al menos parcialmente, mediante nuevas tecnologías de automatización digital, incluidas las que aún están en proceso de desarrollo. Esto reviste especial importancia para algunos países de ingresos bajos y medianos bajos en los que la adopción de la mecanización motorizada ha sido lenta, pero se puede ahora implementar de forma potencialmente sostenible, eficiente e inclusiva.

Basándose en los estudios de casos encargados para el presente informe y la bibliografía general, en este capítulo se presentan y resumen datos relativos a los argumentos a favor de la mecanización motorizada y de las tecnologías de automatización digital. A continuación, se examina la forma en que las políticas y las inversiones pueden repercutir en los argumentos a favor y crear incentivos para la adopción de tecnologías de automatización. Por último, en el capítulo se analizan las trayectorias futuras de una amplia gama de tecnologías y se considera su potencial de transformar la agricultura y hacerla sostenible, a la luz de los diferentes desafíos locales que afrontan los productores. ■

LOS ARGUMENTOS A FAVOR DE LA MECANIZACIÓN MOTORIZADA CONFIRMAN SU CONSIDERABLE POTENCIAL EN MUCHOS CONTEXTOS

Existe amplia y abundante bibliografía sobre las ventajas que la mecanización ha aportado y puede seguir aportando al desarrollo agrícola y rural. Al permitir que los productores realicen las actividades agrícolas con mayor rapidez y eficacia, la mecanización puede dar lugar a la mejora de la productividad agrícola, el aumento de los ingresos, ahorros de mano de obra y costos y la reducción del trabajo pesado, entre otras cosas. Por ejemplo, el cambio de arados tirados por animales a motocultivadores en los sistemas de producción intensiva de arroz acuático en Asia dio lugar a importantes ahorros de costos en la mano de obra utilizada para la preparación de la

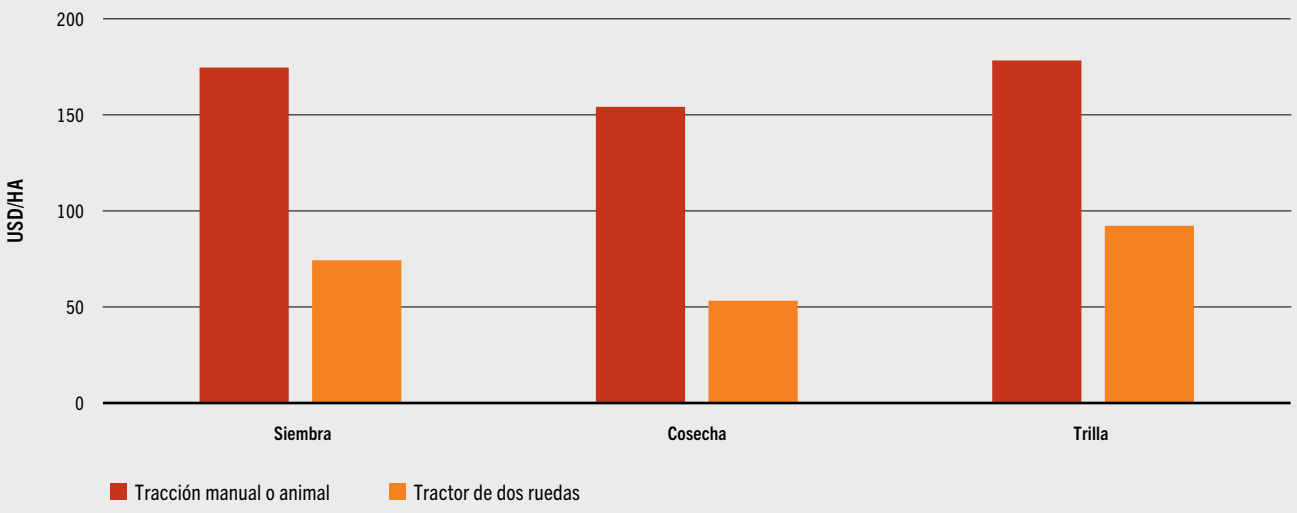
RECUADRO 8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS Y BENEFICIOS ENTRE LA TRACCIÓN MECANIZADA Y LA TRACCIÓN MANUAL O ANIMAL EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO: DATOS OBTENIDOS DE ETIOPÍA Y NEPAL

En Etiopía, los agricultores que utilizaron un tractor de dos ruedas en la producción de trigo redujeron los costos de las tareas básicas de siembra, cosecha y trilla en un 46 %, un 65 % y un 48 %, respectivamente, frente a las tecnologías tradicionales que emplean herramientas manuales o la tracción animal (véase la figura). Los costos de transporte también disminuyeron. El total de ingresos promedio aumentó de 1 964 USD para las prácticas tradicionales a 2 567 USD para las tareas mecanizadas. El costo total variable promedio para los sistemas agrícolas mecanizados y convencionales ascendió a 526 USD y 818 USD, respectivamente.

En consecuencia, el margen bruto de las tareas mecanizadas fue un 78 % más alto, llegando a los 2 041 USD. Estos resultados indican que la producción mecanizada de trigo es mucho más productiva y rentable que la producción no mecanizada.

Del mismo modo, en Nepal, la producción de trigo que utilizó mecanización motorizada —en particular una sembradora de fertilizantes, una segadora y una trilladora accionada por tractor— tuvo como resultado la reducción del total del costo de funcionamiento de la explotación en casi la mitad y el aumento del margen bruto en un 81 %, alcanzando los 514 USD (véase el cuadro en la pág. 44).

FIGURA COSTO DE LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO QUE UTILIZAN EQUIPOS MOTORIZADOS FRENTE A EQUIPOS NO MOTORIZADOS: EL CASO DE ETIOPÍA



FUENTE: Yahaya (en prensa)[15].

tierra. La intensidad de los cultivos de arroz y su productividad también se incrementaron gracias a la mecanización combinada de la preparación de la tierra y la trilla[1]. El empleo de pequeños molinos mecánicos para labores tediosas que requieren un uso muy intensivo de mano de obra, como descascarar el arroz o machacar el grano para obtener harina, rindió también importantes beneficios en cuanto a tiempo libre, sobre todo para las mujeres[1]. La mecanización ha ayudado a reducir los daños y pérdidas de cultivos, como se observó en la India, donde las cosechadoras combinadas disminuyeron las pérdidas de arroz e incrementaron el rendimiento en un 24 %[2]. Basándose en dos estudios de casos recientes, en el Recuadro 8 se proporcionan datos objetivos

RECUADRO 8 (Continuación)

CUADRO COSTO DE LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO QUE UTILIZAN EQUIPOS MOTORIZADOS FRENTE A EQUIPOS NO MOTORIZADOS: EL CASO DE NEPAL

Conceptos	Práctica manual Costo (USD/ha)	Práctica mecanizada Costo (USD/ha)
Estiércol	68	34
Semillas	71	71
Fertilizantes	87	87
Costo total de los insumos	**226**	**192**
Preparación de la tierra, siembra y fertilizado	85	25
Riego	36	11
Cosecha	102	48
Trilla	174	116
Costo total de las operaciones agrícolas	**396**	**200**
Transporte	13	13
Costo total variable	**635**	**405**
Producción de cereal	868	868
Producción de paja	51	51
Total de los ingresos	**919**	**919**
Margen bruto	**283**	**514**
Relación entre beneficios y costos	***1,45***	***2,27***

NOTA: 1 USD = 117,57 NPR (rupias nepalesas), a 6 de abril de 2021, según el tipo de cambio del Banco Rastra de Nepal.
FUENTE: FAO, 2022[16].

relativos a los argumentos a favor de la inversión en mecanización motorizada en Etiopía y Nepal.

Incluso en el África subsahariana, donde la mecanización no se ha adoptado de forma generalizada (véase el Capítulo 2), los datos indican que esta ha reportado grandes beneficios. En Côte d'Ivoire, el uso de tractores fomentó la aplicación de insumos modernos y una mejor gestión de cultivos, lo que aumentó la productividad de la tierra y de la mano de obra. En un estudio realizado en 11 países africanos se constató que el uso de tractores había incrementado el rendimiento del maíz en torno a 0,5 toneladas/ha[3]. En Etiopía y Ghana, los hogares que utilizaron tractores pudieron ampliar su producción al cultivar más terreno en lugar de tratar de incrementar los rendimientos[4, 5]. En Zambia, los hogares agrícolas que utilizaron tractores casi duplicaron sus ingresos al cultivar una parte mucho mayor de sus tierras y obtuvieron el doble de margen bruto por unidad de mano de obra agrícola que otros hogares[6]. A pesar de reducirse a la mitad la necesidad de mano de obra por hectárea, la demanda de contratación de mano de obra realmente aumentó para todas las actividades no mecanizadas a raíz de la expansión de la producción. El paso de mano de obra familiar a mano de obra contratada redujo también la carga para mujeres y niños,

RECUADRO 9 APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA PARA MEJORAR LA INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS

La introducción de tecnologías —desde la refrigeración para el almacenamiento y transporte de alimentos hasta las innovaciones en los procesos de deshidratación y ahumado— ha mejorado sumamente la conservación e inocuidad de los alimentos. Por ejemplo, en el sector ganadero, el sistema vertical de carriles que se utiliza para el faenado de las canales en los mataderos es un mecanismo simple pero efectivo para evitar la contaminación de la carne. La automatización de la recolección, selección y envasado de alimentos reduce enormemente los riesgos de transmisión de patógenos alimentarios de los trabajadores a los alimentos.
La selección mecánica de cacahuetes para rechazar granos con elevada infección fúngica ha logrado mejorar sumamente la salud pública. Sin embargo, es importante seguir prácticas adecuadas de saneamiento e higiene del equipo para evitar la transmisión de peligros alimentarios por las propias máquinas. Por ejemplo, la maquinaria empleada para recolectar cultivos puede introducir alérgenos en una cadena de suministro si no se limpia correctamente. Las máquinas también pueden introducir peligros para la inocuidad de los alimentos mediante fugas de aceite, fluidos hidráulicos, gases de escape y otros.

Los avances en materia de automatización digital ofrecen asimismo mejoras en la detección rápida de contaminantes en los alimentos, proporcionan mejores instrumentos para facilitar la investigación oportuna de brotes de enfermedades transmitidas por los alimentos y mejoran los sistemas de vigilancia y seguimiento.
La tecnología de teledetección en la agricultura de precisión permite la detección temprana de daños ocasionados por plagas y la aplicación selectiva y oportuna de productos agroquímicos, evitando así un uso excesivo. No obstante, los beneficios no son inevitables; por ejemplo, en algunos casos, la automatización puede aumentar los insumos de productos agroquímicos para llegar al objetivo deseado, lo que puede resultar perjudicial tanto para seres humanos como para el medio ambiente. Es asimismo importante asegurar un acceso equitativo a las tecnologías y abordar las cuestiones relativas a la privacidad y propiedad de los datos.

FUENTE: FAO, 2022[17].

lo que permitió que estos últimos asistieran a la escuela.

Así pues, los beneficios de la mecanización agrícola van mucho más allá del aumento de la productividad agrícola. La mecanización puede liberar mano de obra familiar y permitir a los hogares agrícolas dedicar menos tiempo a la agricultura para dedicarlo a otras actividades, como la preparación de alimentos —mejorando así la nutrición— o trabajos fuera de la explotación que mejoren sus medios de vida[7, 8, 9]. Además, puede contribuir a la creación de nuevos puestos de trabajo, como mecánicos para mantener y reparar el equipo. Pueden producirse efectos indirectos para la economía en general por el aumento de la demanda de bienes y servicios no agrícolas[10, 11]. La mecanización también puede mejorar la inocuidad de los alimentos mediante las tecnologías de conservación y almacenamiento, como por ejemplo secadores y almacenaje en frío, que pueden reducir la contaminación[12], siempre y cuando se lleve a cabo una implantación adecuada. En el Recuadro 9 se pone de relieve el papel de la automatización agrícola en la mejora de la inocuidad de los alimentos.

La mecanización también hace que la producción agrícola sea más resiliente. En particular, mejora la resiliencia ante perturbaciones climáticas, como las sequías, ya que permite que los agricultores completen las actividades agrícolas con más rapidez y tengan mayor flexibilidad para adaptar las labores al cambio de los regímenes meteorológicos. Por ejemplo, las bombas de riego pueden aumentar o estabilizar el rendimiento en los lugares en que la lluvia es impredecible y las sequías son frecuentes[1], como sucede sobre todo en el Cercano Oriente y África del Norte[13]. La mecanización también contribuye a crear resiliencia ante perturbaciones sanitarias que afectan a los trabajadores familiares o asalariados, las cuales por su parte pueden alterar gravemente la producción agrícola[14].

RECUADRO 10 MEJORAR LA RESILIENCIA DE LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES MEDIANTE MAQUINARIA DE PEQUEÑO TAMAÑO A MOTOR

En respuesta al ciclón de 2015 y la posterior sequía en 2016 en Rakhine (Myanmar), la FAO, conjuntamente con el Gobierno de Myanmar, puso en marcha un proyecto de un año (2016-17) financiado por el Gobierno del Japón. El objetivo del proyecto era mejorar la seguridad alimentaria de los hogares e incrementar la resiliencia de los pequeños productores en zonas propensas a los conflictos y los desastres naturales. Entre los componentes del proyecto, la FAO aumentó la disponibilidad de maquinaria agrícola pequeña como, por ejemplo, tractores de dos ruedas y bombas de agua. Las actividades de mecanización se llevaron a cabo en siete localidades y 73 aldeas afectadas por inundaciones y conflictos en Rakhine. En total, el proyecto distribuyó 55 tractores de dos ruedas y 94 bombas de agua y se impartió capacitación sobre el uso y mantenimiento de maquinaria pequeña. Además, 146 habitantes de las aleas recibieron capacitación como tractoristas.

Los resultados revelan importantes beneficios para los agricultores y la comunidad en general, pues se redujeron los costos de preparación de tierras (1,6 USD/ha) y se consiguieron importantes ahorros de tiempo (los tractores de dos ruedas eran siete veces más rápidos que los animales de tiro). La preparación oportuna de las tierras se tradujo además en un aumento de la resiliencia, ya que los agricultores mejoraron su capacidad de hacer frente a condiciones atmosféricas irregulares y la escasez de mano de obra, así como de responder a otros peligros. Otros beneficios en términos de mejora de ingresos y seguridad alimentaria se obtuvieron del cultivo de legumbres y hortalizas tanto para consumo en el hogar como para los mercados, gracias al empleo de bombas de agua instaladas para riego durante la estación seca.

Otra maquinaria pequeña como secadoras, trilladoras y sembradoras puede tener repercusiones positivas en la resiliencia de los pequeños productores y, al mismo tiempo, crear oportunidades de empleo rural y reducir la carga de trabajo. Sin embargo, la selección de una tecnología frente a otra debe depender del contexto local y una evaluación de las necesidades. Además, el apoyo técnico es fundamental, así como la disponibilidad de talleres y técnicos de reparación y mantenimiento en las aldeas o alrededores, a fin de mantener los servicios de mecanización. Por último, el proyecto concluyó que los resultados habrían mejorado considerablemente prestando más atención a las mujeres y los jóvenes.

FUENTE: FAO, 2019[24].

Adaptar soluciones de mecanización motorizada a las necesidades locales es fundamental para mejorar los argumentos a favor

Los datos presentados hasta ahora sugieren que continúa habiendo margen para la utilización de mecanización motorizada, especialmente allí donde la adopción hasta la fecha ha sido lenta o no se ha producido. Cabría la posibilidad de esquivar la etapa de mecanización y pasar directamente a la automatización digital y la robótica con IA, pero esto solo es realmente factible en algunos países de ingresos altos (véase el Capítulo 2); en contrapartida, existe una gran variedad de soluciones de mecanización motorizada disponibles para países de ingresos bajos e ingresos medianos bajos. Una gran parte de los argumentos a favor de la mecanización motorizada depende del contexto y de la maquinaria agrícola cuya introducción se considera. En el caso de grandes explotaciones agrícolas situadas en terrenos llanos, los productores agrícolas pueden utilizar maquinaria voluminosa como cosechadoras combinadas y tractores de cuatro ruedas. Sin embargo, los pequeños productores pueden beneficiarse en mayor medida de máquinas en pequeña escala como tractores pequeños de cuatro y dos ruedas, que son menos costosos y más respetuosos con la sostenibilidad ambiental[18]. Estas soluciones de maquinaria han demostrado ser un elemento clave para reducir las disparidades en materia de mecanización en Asia[2, 19, 20]. Se adaptan mejor a las explotaciones pequeñas, ya que pueden maniobrar alrededor de tocones y piedras, además de ser más fáciles de manejar, mantener y reparar, y ser más aptas para las operaciones de microfinanciación. Además, se pueden utilizar para tirar de los escarificadores y las sembradoras directas en favor de una agricultura de conservación mecanizada, contribuyendo así a mejorar la resiliencia al cambio climático[21, 22]. En el Recuadro 10 se ofrece un ejemplo concreto de los beneficios de la maquinaria en

RECUADRO 11 PLANTACIÓN MECANIZADA EN LECHOS ELEVADOS EN EGIPTO PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD Y EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA

La plantación mecanizada en lechos elevados es una forma eficaz de aumentar la productividad y el rendimiento de los cultivos, ahorrar los escasos recursos hídricos y reducir el anegamiento mediante un drenaje mejor. Cuando esta tecnología se aplicó a la producción de trigo en Egipto, se asoció a un incremento del 25 % de la productividad gracias al aumento del rendimiento, una reducción del 50 % de los gastos en semillas, una reducción del 25 % en el uso del agua y una disminución de los costos de mano de obra. En consecuencia, actualmente un programa de lechos elevados mecánicos forma parte de la campaña nacional de trigo de Egipto y se calcula que para 2023 se plantarán aproximadamente 800 000 ha de trigo con esta tecnología. Se estima además que, en un horizonte del proyecto a 15 años, los beneficios superarán los 4 000 millones de USD, que sobre todo recibirán más de un millón de productores de trigo egipcios. Entre otros beneficios cabe señalar la reducción de la dependencia de las importaciones de trigo (en más del 50 % para 2025) y el aumento de la productividad del agua en más de 200 000 ha de tierras con escasez hídrica.

Para obtener resultados positivos, es fundamental que esta tecnología se adapte a las condiciones locales y que los componentes precisos del paquete tecnológico varíen según el contexto específico. En Egipto, una evaluación a largo plazo tuvo como resultado la definición de un paquete tecnológico que comprendía lo siguiente: una variedad mejorada de trigo, con una densidad de siembra de 108 kg/ha; fechas de siembra en el período comprendido entre el 15 y el 30 de noviembre; el uso de un arado o sembradora mecanizados para la preparación de lechos y la plantación; la aplicación de fertilizantes nitrogenados a un ritmo de 168 kg/ha. Si se adapta correctamente, esta tecnología resulta especialmente atractiva para las explotaciones pequeñas y medianas. Es relativamente asequible, se puede aplicar fácilmente con pequeños tractores, es fácil de mantener con cultivos disponibles a nivel local y permite tanto el monocultivo (por ejemplo, trigo o arroz) como el cultivo múltiple para cultivos interespaciados (por ejemplo, maíz, remolacha azucarera, habas).

FUENTES: Alwang *et al.*, 2018[25]; Swelam, 2016[26].

pequeña escala para fomentar la resiliencia de los pequeños productores en Myanmar.

Las recientes innovaciones que ajustan la maquinaria motorizada a las necesidades locales van más allá de la simple adaptación del tamaño de la maquinaria para hacer frente a los desafíos locales. Los países del Cercano Oriente y África del Norte afrontan cada vez más situaciones de escasez de agua que limitan el crecimiento de la producción agrícola. En el Recuadro 11 se describe el caso de la plantación mecanizada en lechos elevados en Egipto —un ejemplo de sinergias innovadoras entre instrumentos de mecanización y prácticas sobre el terreno e insumos mejorados, que en su conjunto aumentan el rendimiento a la vez que permiten ahorrar los escasos recursos naturales—.

La mecanización agrícola ocupa actualmente un lugar destacado en los programas de políticas de muchos países de ingresos bajos, especialmente en el África subsahariana, donde no se le prestó atención durante un tiempo tras los anteriores fracasos de los programas de mecanización dirigidos por los Estados[23]. Se están manteniendo debates sobre la vía tecnológica que los gobiernos y los asociados en el desarrollo deberían apoyar, especialmente allí donde todavía no se ha introducido la automatización, como por ejemplo la mayor parte del África subsahariana y muchas zonas montañosas. No existe una solución universal, pero sí habrá una solución que se ajuste mejor a determinadas condiciones[18]. Las decisiones que se tomen para automatizar las actividades agrícolas deberían tener en cuenta las condiciones locales, incluidas las oportunidades y obstáculos, y la correspondiente demanda en el mercado de tecnologías de mecanización.

La importancia (continuada) de la fuerza manual y la tracción animal

A pesar de los beneficios de la mecanización motorizada, existen datos que demuestran que las tecnologías manuales y la tracción animal siguen desempeñando una función importante.

RECUADRO 12 AHORRO DE TIEMPO, ESFUERZO Y DINERO CON SEMBRADORAS DE TAMBOR EN LA REPÚBLICA DEMOCRÁTICA POPULAR LAO

En Sayabouly (República Democrática Popular Lao) se probó sobre el terreno una sembradora de tambor para apoyar la intensificación sostenible de la producción de arroz en un programa aplicado por el Gobierno y pequeños productores, con el apoyo de la FAO. Una sembradora de tambor es un instrumento manual utilizado para plantar semillas de arroz previamente germinadas. Resulta más atractivo que los métodos de plantación tradicionales de trasplante y siembra manuales. De hecho, reduce el tiempo dedicado a la plantación un 90 %, aumenta la productividad laboral un 40 %, reduce los costos de producción un 20 % y ahorra semillas en un porcentaje superior al 60 %. La sembradora de tambor es también una tecnología respetuosa con el medio ambiente, ya que no utiliza combustibles fósiles y es apropiada para enfoques agroecológicos, como los sistemas de piscicultura en arrozales. La sembradora de tambor aumenta la resiliencia de los agricultores al cambio climático, permitiéndoles realizar la plantación en tiempo oportuno con más flexibilidad para elegir el momento de siembra. Además, en caso de que un desastre natural destruya el arroz recién plantado, el agricultor puede repetir la siembra de forma fácil y rápida.

FUENTE: Flores Rojas, 2018[28].

La tracción animal puede ser una importante fuente de potencia para las explotaciones muy pequeñas y fragmentadas, sobre todo si hay pastos y agua disponibles y se pueden contener las enfermedades de los animales[18]. La tracción animal hace posible integrar la ganadería y los cultivos y optimizar el uso de recursos, por ejemplo mediante la utilización de estiércol para la producción agrícola y los residuos de cultivos para la alimentación de los animales. Para muchos productores supone también la mejor estrategia inmediata para hacer frente a la escasez de energía antes de llevar a cabo una transición a la mecanización motorizada[21, 27]. Para la mayoría de los pequeños productores africanos, la transición a la tracción animal supondría un verdadero avance[18].

Se puede aplicar un razonamiento similar a las herramientas manuales avanzadas, esto es, herramientas que se basan principalmente en la fuerza humana pero que están diseñadas con inteligencia para obtener máximos resultados con un esfuerzo mínimo. Estas herramientas son especialmente aptas para explotaciones agrícolas en las que la maquinaria es difícil de manejar. Ahorran mano de obra —dejando tiempo para el descanso u otras actividades que generan ingresos—, reducen los costos y el trabajo pesado y mejoran la resiliencia. En el Recuadro 12 (pág. 48) se ofrece un ejemplo concreto de los beneficios de este tipo de maquinaria y se examina la repercusión de la sembradora de tambor manual en la rentabilidad, la eficiencia, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia en Nepal y la República Democrática Popular Lao.

En resumen, el posible uso de animales de tiro y herramientas manuales avanzadas depende del contexto. Aunque tienen menos potencia que los tractores, pueden seguir ayudando a superar las limitaciones de mano de obra, obtener rendimientos más altos de los cultivos y permitir la expansión de tierras. En muchos casos, las herramientas manuales avanzadas y la tracción animal probablemente constituyan las mejores opciones para aumentar el suministro de energía. Un marco óptimo puede ayudar a los gobiernos y asociados en el desarrollo a entender mejor qué vías tecnológicas fomentar, junto con las instituciones e inversiones complementarias, teniendo en cuenta las condiciones agroecológicas y socioeconómicas presentes en los sistemas agrícolas de sus países. A medida que se desarrollen procesos de innovación relacionados con la mecanización agrícola en respuesta a estas condiciones cambiantes, estas vías deberán adaptarse y ajustarse. ■

INVESTIGAR LOS ARGUMENTOS A FAVOR DE LA AUTOMATIZACIÓN DIGITAL: ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS DE LOS ESTUDIOS DE CASOS

En la sección anterior se examinaron los argumentos a favor de la mecanización motorizada y se destacó su potencial de mejorar la resiliencia, la productividad y la eficiencia en el uso de los recursos, así como de reducir el trabajo pesado y la escasez de mano de obra. Se subrayó asimismo que, en algunas circunstancias, la potencia manual y de tiro pueden seguir generando avances. En esta sección se examinan los argumentos a favor de la inversión en tecnologías de automatización digital. La mejora de la productividad, la eficiencia en el uso de los recursos y el ahorro de mano de obra han sido factores clave de la adopción de estas tecnologías. Sin embargo, estas no dejan de tener costos y muchas requieren grandes inversiones iniciales y habilidades y conocimientos específicos para utilizarlas de forma eficaz. Los agricultores pueden asimismo mostrarse escépticos con respecto a la inversión en determinadas innovaciones si estas se apartan de las tradiciones y las normas culturales y sociales. En este caso, tal vez los gobiernos y los proveedores de servicios deban intervenir para transmitir los beneficios que cabe esperar de la inversión en estas tecnologías. Esto puede suponer la realización de ensayos, experimentos y análisis de costo-beneficio que generen la confianza necesaria.

Un reto importante al evaluar los argumentos a favor de las tecnologías de automatización digital en la agricultura es la escasez de información sobre su rentabilidad. A excepción de la mecanización motorizada, las tecnologías de automatización digital son nuevas y los datos sobre su adopción se encuentran repartidos y son inexactos (véase el Capítulo 2). De igual modo, la información sobre los beneficios económicos varía notablemente, dependiendo en cierta medida del nivel de adopción de las diversas tecnologías en la agricultura[29]. Por este motivo, el análisis aquí se basa principalmente en las conclusiones de dos estudios técnicos encargados para este informe[30, 31]. Estos estudios se basaron a su vez en 27 estudios de casos, que tomaron como base entrevistas con informantes clave de todo el mundo. Así pues, proporcionan datos principalmente cualitativos, basados en la experiencia de proveedores de servicios de automatización digital y también, aunque en menor medida, de representantes de productores agrícolas. Los 27 estudios de casos abarcan todas las regiones del mundo y sistemas de producción agrícola (cultivos, ganadería, acuicultura y agroforestería) y representan soluciones agrícolas novedosas, cuya escala todavía es ampliable o ya se ha ampliado, relacionadas con la mecanización motorizada y las tecnologías de automatización digital, que están dirigidas a explotaciones agrícolas en pequeña y gran escala. Los estudios de casos recogen la perspectiva de los proveedores de servicios, en lugar de la de los productores agrícolas, en calidad de usuarios finales (véase el Anexo 1 para consultar una breve descripción de cada estudio de casos y la metodología aplicada[a]).

Marco sobre la preparación para ampliar la escala de las tecnologías de automatización agrícola

Las tecnologías examinadas en los 27 estudios de casos realizados en todo el mundo presentan grandes variaciones en cuanto a su preparación de cara a la aplicación. En la Figura 6 (pág. 51) se muestran las cuatro etapas de preparación para ampliar la escala de cada tipo de tecnología. Las soluciones que se encuentran en la fase de madurez están relacionadas principalmente con la automatización de la ganadería y la digitalización de toda la explotación agrícola. El equipo y la maquinaria plenamente automatizados adaptados a la producción animal presentan excelentes perspectivas de reducción de costos y aumento de la productividad (véase el Recuadro 13).

Entre las tecnologías cuya escala se está ampliando, la Figura 6 muestra diversas categorías, incluidas soluciones digitales no incorporadas (véase el Glosario), sistemas de aeronaves no tripuladas (SAT, comúnmente conocidas como drones) y teledetección, soluciones de mecanización con

a Puede consultarse una descripción más detallada en McCampbell, 2022[30] y Ceccarelli *et al.*, 2022[31].

RECUADRO 13 LA EVOLUCIÓN DE LOS ARGUMENTOS A FAVOR DE LOS SISTEMAS DE ORDEÑO ROBOTIZADO

La adopción de tecnologías de automatización de la ganadería va en aumento, sobre todo los sistemas de ordeño robotizado en países de ingresos altos[32]. Pueden obtenerse beneficios económicos derivados del ahorro de mano de obra, que se estiman entre un 18 % y un 30 %[33], y el aumento de la producción de leche, de un 10 % a un 15 % por vaca[33, 34, 35]. Los datos indican que las explotaciones lecheras pequeñas y medianas, esto es, de 100 a 300 vacas, fueron las primeras en adoptar el ordeño robotizado, incorporado por agricultores más jóvenes que se vieron atraídos por unas condiciones laborales mejores y más flexibles (por ejemplo, condiciones que no requieren ordeñar los animales dos o tres veces al día). Los argumentos a favor de los robots de ordeño se basan más en la flexibilidad de los horarios de trabajo y una mejor calidad de vida para las explotaciones más pequeñas que en los beneficios meramente económicos. Sin embargo, existen datos más recientes que demuestran que las granjas lecheras de mayor tamaño, esto es, con más de 1 000 vacas, están adoptando sistemas de ordeño robotizados en respuesta a la escasez de mano de obra[29]. Los costos iniciales de las ordeñadoras robotizadas hacen que estas no resulten viables para las granjas muy pequeñas, situadas principalmente en países de ingresos bajos y medianos donde, por otro lado, esta tecnología puede resultar atractiva para explotaciones ganaderas comerciales con cabañas relativamente más grandes.

sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS), tecnologías de dosis variable (TDV) y soluciones para cultivos bajo protección. La amplia bibliografía, recopilada desde la década de 1990 y que apoya los argumentos a favor de las tecnologías que utilizan GNSS[36], facilitó su adopción. Sin embargo, no sucedió así con las TDV, pues los datos empíricos relativos a su rentabilidad son dispares (véase el Capítulo 2)[29].

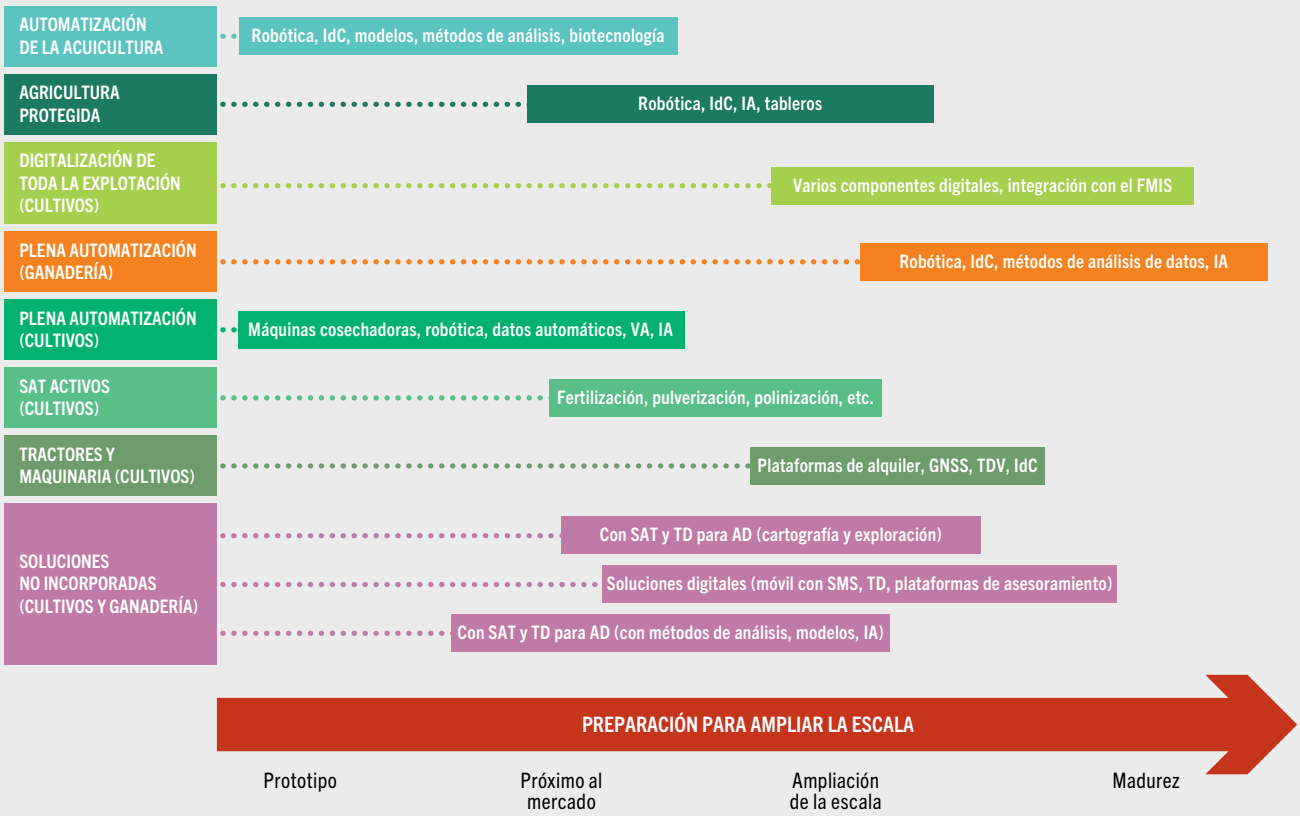
Entre las soluciones que todavía se encuentran en las etapas "próximo al mercado" o "prototipo" figuran principalmente la automatización avanzada y la robótica tanto para la agricultura en campos como para la agricultura bajo protección, así como la acuicultura, además de SAT para teledetección y aplicación de insumos. Algunas tecnologías ya han demostrado ser rentables y están reemplazando el trabajo manual en países de ingresos altos, realizando una serie de tareas que van desde el riego, la exploración de plagas, la cosecha y el deshierbe hasta la selección y recolección de la fruta; en cambio, no hay pruebas de su adopción en países de ingresos bajos y medianos.

Muchas de las soluciones se encuentran todavía en las primeras etapas de desarrollo y comercialización y sus argumentos a favor aún no se han conseguido determinar. De los 27 estudios de casos, algunos se encuentran todavía en la etapa "prototipo" (GRoboMac y Seed Innovations), mientras que otros proponen soluciones en la etapa "próxima al mercado" (por ejemplo, Atarraya, Food Autonomy, GRoboMac, Harvest CROO Robotics, Hortikey, UrbanaGrow). Hay varios casos en los que las soluciones están en la etapa de "ampliación de la escala" (por ejemplo, Aerobotics, Cattler, Cropin, ioCrops, SeeTree, SOWIT, TROTRO Tractor, Tun Yat) o "madurez" (Lely, ZLTO, ABACO, Egistic e Igara Tea). Véase el Anexo 1 para obtener más detalles sobre la etapa de preparación para ampliar la escala de cada tecnología.

Un examen más detallado de los resultados de los estudios de casos

Desde la perspectiva de los proveedores de servicios, una de las conclusiones más importantes obtenidas de los estudios de casos es que solo 10 de los 27 negocios parecen ser rentables y sostenibles desde un punto de vista financiero. Estos se encuentran en la etapa de madurez (véase la Figura 6), establecidos principalmente en países de ingresos altos y medianos altos y prestando servicio a productores a gran escala, aunque hay excepciones (por ejemplo, un negocio de té en Uganda que está dirigido a pequeños productores de té). El hecho de que la mayoría de negocios operen en países de ingresos altos, pese a que en ocasiones su origen está en países de ingresos medianos altos, como es el caso de Aerobotics en Sudáfrica, Atarraya en México y Cattler en la Argentina,

FIGURA 6 PREPARACIÓN PARA AMPLIAR LA ESCALA DE TECNOLOGÍAS DE AUTOMATIZACIÓN DIGITAL A LO LARGO DEL ESPECTRO



NOTAS: SAT: sistema de aeronaves no tripuladas; IdC: internet de las cosas; IA: inteligencia artificial; FMIS: sistema de gestión de la información sobre explotaciones agropecuarias; VA: visión artificial; GNSS: sistema mundial de navegación por satélite; TDV: tecnología de dosis variable; TD: teledetección; AD: apoyo a la toma de decisiones. La preparación para ampliar la escala se divide en cuatro etapas: i) prototipo: el concepto se ha ensayado y demostrado en pruebas limitadas; ii) próximo al mercado: la solución funciona en condiciones reales de producción y el proveedor de servicios está investigando un modelo de negocio, o más de uno, para llegar a los clientes; iii) ampliación de la escala: varios usuarios o clientes finales han adoptado la solución y hay un modelo de negocio rentable (o más de uno), y iv) madurez: la solución cuenta con una base de clientes específica, hay un modelo de negocio rentable (o más de uno) y la demanda está creciendo.
FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[31].

parece indicar que los argumentos a favor de la inversión en estas tecnologías son más sólidos en los países de ingresos altos.

Desde la perspectiva de los usuarios, más de un tercio de los estudios de casos sugerían que los agricultores se beneficiaban de estas soluciones a través del aumento de la productividad y la eficiencia, así como nuevas oportunidades de mercado. Por ejemplo, en Uganda una solución digital dirigida a mejorar la productividad y la eficiencia del té (Igara Tea) ha hecho posible que 7 000 agricultores aumenten la producción un 57 % en cinco años. Una empresa de servicios de arrendamiento en Myanmar (Tun Yat) declara que cada agricultor que utiliza sus servicios genera aproximadamente 240 USD más al año, lo que se debe fundamentalmente a la mayor calidad de la trilla y una mejor manipulación con menos pérdidas de cultivos posteriores a la

RECUADRO 14 LA REPERCUSIÓN DE UN PULVERIZADOR DIGITAL PARA CULTIVOS HORTÍCOLAS EN LA UNIÓN EUROPEA: DATOS OBTENIDOS DE POLONIA Y HUNGRÍA

La Unión Europea ha invertido 20 millones de EUR en SmartAgriHubs, que tiene como objetivo digitalizar la agricultura europea. Parte de este proyecto es la Smart Orchard Spray Application (aplicación con pulverizadores inteligentes para cultivos hortícolas), diseñada para aprovechar tecnologías de pulverización inteligentes que incorporan dispositivos de internet de las cosas (IdC) para optimizar la eficiencia y la calidad del tratamiento en huertos. Los pulverizadores con IdC pueden reducir de forma significativa el uso de productos de protección planta. La integración de la nube de la Smart Orchard Spray Application en los actuales procesos de los agricultores y las soluciones de *software* aumenta aún más la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad de la producción de alimentos. Al posibilitar la rastreabilidad, puede mejorar también la inocuidad de los alimentos y los niveles de calidad. Cada año, los productores pueden ahorrar 517 EUR/ha en combustible y reducir los costos de los plaguicidas un 25 %, así como aumentar los ingresos gracias a la mejora de la toma de decisiones.

FUENTE: IoF, 2019[37].

cosecha[31]. En otros tres casos —uno centrado en la ganadería (GARBAL), otro en servicios de alquiler de mecanización para producción de cultivos (TROTRO Tractor) y un tercero en árboles frutales (SeeTree)—, aunque las pruebas de su sostenibilidad financiera son todavía insuficientes, el hecho de que los agricultores estén pagando ya por las soluciones sugiere que hay un argumento a favor de la inversión en ellas. En los casos en que se carece de información sobre los argumentos a favor, el número de usuarios o inversiones que atrae una solución puede ser una indicación de su sostenibilidad financiera. Por ejemplo, en cinco casos, los proveedores de servicios comunican el número de productores que utilizan sus servicios (Aerobotics, Cattler, Egistic, Lely, SOWIT) y en dos casos informan de las inversiones que la compañía ha atraído (Atarraya y Harvest CROO Robotics).

El desarrollo de muchas de estas tecnologías sigue estando en las etapas preliminares y los argumentos a favor aún no se han determinado. Se necesitan más datos objetivos derivados del análisis de costos y beneficios para entender mejor cómo adaptar las tecnologías a determinadas condiciones (véase un ejemplo europeo en el Recuadro 14).

La información recopilada hasta la fecha permite entender algunos de los factores que determinan la adopción de la automatización digital y los obstáculos que la dificultan. En primer lugar, el aumento de la tasa de adopción de una solución sugiere no solo que la tecnología puede realizar satisfactoriamente las actividades agrícolas, sino también que los agricultores saben manejarla. En un estudio de casos sobre la digitalización de la agricultura y la ganadería (ZLTO) se muestra cómo los productores agrícolas suelen tener poco tiempo para familiarizarse con soluciones nuevas, especialmente si no están integradas en la maquinaria; en cambio, si la maquinaria agrícola nueva está ya provista de dispositivos GNSS, la adopción de esta tecnología, para un posicionamiento más preciso de la máquina durante las operaciones, se ve facilitada[31].

Uno de los principales motivos por los que los productores agrícolas tienen problemas para emplear tecnologías de automatización digital es el alto índice de analfabetismo digital y la falta de concienciación sobre el potencial de estas soluciones. Además, existe reticencia al cambio, que generalmente se asocia al envejecimiento de la población agrícola. Estos factores aparecen en estudios de casos de todo el mundo (Abaco en Europa; ioCrops en la República de Corea; Seed Innovations en Nepal; SeeTree en las Américas, Europa y Sudáfrica; TraSeable Solutions en Fiji y otros países en el Pacífico, y Tun Yat en Myanmar) y no se limitan a países de ingresos bajos o medianos. Por este motivo, se considera que el cambio generacional favorece la adopción de estas tecnologías y que los agricultores jóvenes

RECUADRO 15 LA COVID-19 AVIVÓ EL INTERÉS EN LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES: DATOS OBTENIDOS DE DOS ESTUDIOS DE CASOS

De los 27 estudios de casos preparados para el presente informe, en dos se destacó el papel de la pandemia de la COVID-19 como factor especialmente importante de la adopción. TROTRO Tractor, que opera en varios países del África subsahariana, mencionó la pandemia con un importante factor que impulsó la aceptación de sus servicios. Su plataforma permitía la producción de cultivos a pesar de las restricciones de desplazamiento y un sistema de cupones electrónico facilitó la adopción.

TraSeable, que ofrece una aplicación móvil con instrumentos digitales sencillos que permiten a los agricultores del Pacífico mantenerse al corriente de la actualidad en el sector de la agricultura, también se refirió a la pandemia de la COVID-19 como un factor que favoreció la adopción. La aplicación se presentó en 2020 y, según la persona entrevistada, el notable aumento de las descargas se debió en parte a las limitaciones del contacto directo para controlar la pandemia de la COVID-19.

FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[31].

son esenciales para dirigir una explotación familiar hacia la digitalización y la automatización avanzada. Los datos obtenidos de tres estudios de casos en la República de Corea (ioCrops) y los Estados Unidos de América (Atarraya y Cattler) sugieren que los agricultores jóvenes se ven más atraídos por las innovaciones. La creación de capacidad es, por tanto, fundamental para impulsar la adopción.

Otro factor determinante de la adopción, o un obstáculo que la dificulta, es la actitud ante el riesgo. Dos estudios de casos (Aerobotics y Cattler) indican que, en general, los productores a gran escala sudafricanos y argentinos, respectivamente, son más dinámicos y están más abiertos a adoptar soluciones de automatización digital que sus homólogos en los Estados Unidos de América. Ello se debe fundamentalmente a que estos últimos se sienten menos expuestos a los riegos del mercado, mientras que los primeros han de ser más competitivos en el mercado internacional. De hecho, el dinamismo y la disposición a asumir riesgos de los productores argentinos y sudafricanos vienen probablemente determinados por la exposición a la competencia internacional, que conduce a una mayor adopción de tecnologías.

Otros factores, que también se mencionan en el Capítulo 2, son la escasez de mano de obra (en particular estacional, como indicaron GRoboMac, Igara Tea, SOWIT y TROTRO Tractor), condiciones de trabajo más seguras y la reducción del trabajo pesado (véase los casos de Lely y SOWIT). Una observación interesante formulada por TROTRO Tractor es que la escasez de mano de obra es un fuerte incentivo para la adopción de estas tecnologías por las agricultoras, que tienen más dificultades para encontrar trabajadores que sus homólogos masculinos. Por otro lado, las mujeres suelen realizar las labores más tarde, pues acceden a la maquinaria solo después de que sus homólogos masculinos han acabado de usarla. Soluciones como TROTRO Tractor permiten a las mujeres acceder al equipo independientemente de su uso por parte de los hombres[30]. Otra conclusión interesante fue que la pandemia de la COVID-19 se consideró un factor determinante en dos casos, puesto que la necesidad de evitar o reducir el contacto físico aumentó el valor de las soluciones digitales (véase el Recuadro 15). ■

MÁS ALLÁ DE LOS ARGUMENTOS A FAVOR: EL PAPEL DE LAS INVERSIONES, LAS POLÍTICAS Y LA LEGISLACIÓN

En las secciones anteriores se examinaron los datos empíricos relativos a los argumenos a favor de las tecnologías de automatización agrícola. Se mostró que la mecanización motorizada había aportado, en general, notables beneficios a los productores agrícolas y, al adaptarse a las necesidades locales, podía también generar beneficios en materia de sostenibilidad mediante el aumento de la eficiencia en el uso de los recursos y el ahorro de los escasos recursos. También se pusieron de relieve, pese a los escasos datos, importantes enseñanzas que fomentan una mejor comprensión de los argumentos a favor de las tecnologías de automatización digital. El principal mensaje es que los argumentos a favor siguen siendo débiles o inmaduros por varios motivos, que van desde la reticencia de los agricultores a asumir riesgos, pues las tecnologías son todavía nuevas, hasta la falta de la alfabetización digital necesaria para su manejo.

En esta sección se da un paso adelante en el análisis y se va más allá de los argumentos a favor, analizando los factores estructurales (por ejemplo, políticas, legislación, inversiones públicas) que configuran los incentivos para los productores agrícolas y los proveedores de tecnologías de automatización y les animan a asumir el riesgo de adoptarlas. En África, por ejemplo, donde el nivel de adopción ha sido más bajo que en otras regiones, la demanda de mecanización motorizada en la agricultura es ya elevada y sigue aumentando. Sin embargo, la falta de conocimientos y habilidades en cuanto al manejo y mantenimiento de maquinaria, unido a los reglamentos comerciales, las políticas aduaneras y las malas infraestructuras, frenan la adopción[19]. La deficiencia de las infraestructuras en muchos países africanos también impide el acceso a los mercados urbanos y eleva los precios de los servicios de mecanización[38], sobre todo para los pequeños productores que tienen parcelas reducidas y fragmentadas[9], lo que reduce el incentivo para invertir en tecnologías[19, 39]. La mejora de la infraestructura de transporte y las redes viales disminuye los costos para los productores relacionados con el acceso a tecnologías, piezas de repuesto, reparaciones y combustible y facilita la aparición de mercados de prestación de servicios[40]. Mediante la mejora del suministro de electricidad y energías renovables, los gobiernos también pueden apoyar la adopción de tecnologías de mecanización motorizada como bombas alimentadas por energía solar para riego y maquinaria para los procesos de elaboración y conservación[19, 41, 42].

De igual modo, las malas infraestructuras dificultan la adopción de tecnologías de automatización digital, especialmente en los países de ingresos bajos[30, 31]. La escasez o ausencia de conectividad y otras infraestructuras propicias, en particular infraestructura eléctrica y de datos, se presentan sistemáticamente como obstáculos en la mayoría de países de ingresos bajos y medianos, incluido en algunos de los estudios de casos anteriormente señalados (por ejemplo, Atarraya en México y GARBAL en África occidental). Las poblaciones rurales se encuentran por lo general en situación de desventaja en cuanto al acceso a Internet y telefonía inteligente y, por consiguiente, tienen un acceso limitado a servicios valiosos. En cambio, si se llevan a cabo estas inversiones, se produce un aumento de la adopción, tal como se demuestra en dos estudios de casos (TraSeable en Fiji y Tun Yat en Myanmar), en los que se muestra la rapidez con la que la entrada de la telefonía móvil ha creado un entorno favorable para la adopción de soluciones de automatización digital[31].

La tenencia de la tierra es importante para la adopción de tecnologías, ya que puede afectar al acceso a la financiación así como determinar la postura de los productores de cara a asumir riesgos. La mecanización agrícola tiende a ser adoptada primero por las grandes explotaciones, que se caracterizan por tener mejor seguridad de la tenencia, más facilidad de acceso a créditos, servicios de extensión y mercados y capacidad para asumir riesgos[43]. Se han reunido datos de todo el mundo que demuestran que las grandes explotaciones agrícolas suelen mecanizarse antes que las pequeñas[4, 44, 45, 46]. Sin embargo, el

tamaño reducido de las explotaciones no tiene que suponer un obstáculo para la adopción si existe la posibilidad de desarrollar soluciones tecnológicas e institucionales diseñadas para la mecanización en pequeñas explotaciones. Por ejemplo, los servicios de mecanización migratoria, esto es, servicios de arrendamiento que recorren grandes distancias, a veces en distintas zonas ecológicas y a través de las fronteras nacionales, para atender la demanda en diferentes lugares, gozan de aceptación en muchos países de Asia y algunos de África, si bien se ven dificultados, una vez más, por las malas infraestructuras y los problemas fronterizos en muchos países africanos[4, 19, 47, 48].

En la bibliografía disponible y los 27 estudios de casos encargados para el presente informe[30, 31], la legislación suele considerarse un factor de limitación, que genera restricciones y entraña una pesada burocracia. Esto afecta a la difusión y adopción de varias soluciones, tales como drones, sensores y estaciones meteorológicas, en países de ingresos bajos y medianos. Lo mismo ocurre en el caso de algunos países de ingresos medianos altos y altos, como reflejan las restricciones a permisos de vuelo en la Unión Europea y Sudáfrica (mencionado por Aerobotics), restricciones de velocidad para máquinas autónomas en los Estados Unidos de América[31, 49] y restricciones a las importaciones de drones y dispositivos del IdC (mencionado por Igara Tea en Uganda y SOWIT en África septentrional y Asia occidental). La legislación repercute también en la adopción de tecnologías de automatización digital en determinados sectores, como la producción de cultivos bajo protección y la acuicultura. Existe la percepción general de que el cultivo protegido y la piscicultura no son naturales y, por tanto, no se ven favorecidos por las políticas públicas sectoriales. Por ejemplo, la legislación de la Unión Europea no clasifica como orgánica la producción de alimentos exenta de productos químicos en la agricultura protegida[31].

Otros factores importantes que limitan la adopción de tecnologías digitales son la ausencia de políticas y legislación sobre el intercambio de datos y las infraestructuras conexas (mencionado por GARBAL en África occidental) y la falta de suficientes políticas públicas, legislación e incentivos en apoyo de las innovaciones (mencionado por SOWIT en África septentrional) y asociaciones entre los sectores público y privado (mencionado por Egistic en Kazajstán). Por otro lado, en un caso (Atarraya en México), la falta de reglamentos se describió como algo positivo pues, según los entrevistados, estos generarían una burocracia ineficaz.

En otros contextos, la legislación se menciona como un factor que impulsa la adopción. En la República de Corea, por ejemplo, los datos derivados del estudio de casos de ioCrops muestran cómo la inversión pública en sistemas agrícolas de alta tecnología, en forma de ensayos, demostraciones y fomento de la capacidad, facilita la difusión de la automatización digital agrícola. En Nepal, las pólizas de seguro públicas favorecen la ampliación de la escala de las soluciones digitales y de automatización (véase el estudio de casos de Seed Innovations).

Los gobiernos, a través de inversiones, políticas y legislación, pueden desempeñar un importante papel a la hora de crear y facilitar un entorno propicio para las innovaciones y velar por que las tecnologías estén disponibles y accesibles para todos y cumplan objetivos socialmente deseables, como la inclusión y la sostenibilidad ambiental. En muchos contextos, las políticas, la legislación y las inversiones públicas son necesarias para hacer frente a limitaciones que exceden el control de los agentes privados. Esta cuestión se trata con más detalle en el Capítulo 5. ■

TRAYECTORIAS FUTURAS DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA: CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ADOPCIÓN INCLUSIVA Y LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

En esta sección se examinan posibles trayectorias futuras de las tecnologías de automatización agrícola con respecto a diferentes tipos de países y explotaciones agrícolas, a la luz de los factores

estructurales que pueden influir en la difusión y adopción de estas tecnologías. Se examinan las posibilidades de hacer que la agricultura mecanizada sea más sostenible. Los beneficios de la mecanización motorizada han tenido algunos efectos negativos para el medio ambiente, entre otros, la expansión de las tierras de cultivo a expensas de los bosques o pastos de las tierras de la sabana[50]. Por otra parte, se examina el potencial de automatización de la producción agrícola en pequeña escala y algunas de las implicaciones económicas y sociales de futuras trayectorias de automatización.

Perspectivas de que la agricultura muy mecanizada llegue a ser más sostenible

En los países de ingresos altos, pero también en muchas explotaciones agrícolas comerciales en países de ingresos bajos y medianos, la agricultura está ya muy mecanizada, en parte como consecuencia de la escasez o temporalidad de la mano de obra agrícola. En el caso de economías de escala, se utiliza sobre todo maquinaria voluminosa. Sin embargo, los datos muestran cómo esta ha provocado erosión del suelo, deforestación, aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y pérdida de biodiversidad[51]. En muchos países, los proveedores de servicios suelen emplear maquinaria de gran tamaño y dan sobre todo servicio a aquellos agricultores que han eliminado los árboles y tocones de sus parcelas[40, 52], pero la retirada de árboles de las explotaciones agrícolas y la alteración de los modelos de cultivos debido a la mecanización pueden contribuir a la erosión del suelo[7]. Además, la erosión y la degradación de los suelos causada por la maquinaria pesada de gran tamaño provocan también la disminución del rendimiento[38, 53]. El uso de tractores grandes ha cambiado sustancialmente la imagen de los paisajes rurales, ya que en muchos casos los productores amplían y reforman las parcelas, provocando la pérdida de diversidad de las tierras de cultivo y biodiversidad para la alimentación y la agricultura[50, 52]. La mecanización motorizada se relaciona con la disminución de la diversidad de cultivos al favorecer cambios de producción hacia cultivos más fáciles de mecanizar, como el trigo, el maíz y el arroz[4]. Lamentablemente, muchas veces los agricultores no adoptan prácticas de mejora de la biodiversidad, como la agricultura de conservación, cultivos intercalados y rotaciones, porque requieren mucha mano de obra[54]. La mecanización suele dar lugar a una mayor especialización y menor diversificación de los productos, lo que puede disminuir la resiliencia[55].

Para afrontar estos desafíos, las innovaciones en mecanización motorizada se pueden adaptar a maquinaria más pequeña y ligera que puede reducir la compactación del suelo y mitigar los efectos negativos para el medio ambiente. Una automatización apropiada a la escala y adaptada a las condiciones locales puede desempeñar una importante función en la reducción de esos efectos. Los robots autónomos pueden ayudar a reducir el uso de productos químicos y energía, así como las emisiones de GEI, si se alimentan de energías renovables[56]. La investigación técnica y agronómica aplicada puede contribuir a analizar las soluciones de mecanización que mejor se adapten a las condiciones agroecológicas locales. Los gobiernos pueden asimismo aplicar políticas para fomentar el acceso a maquinaria y equipo que hayan demostrado ser más respetuosos con el medio ambiente[38, 40].

La agricultura de conservación puede reducir la erosión del suelo, mediante la utilización de escarificadores o plantadoras de siembra directa en sustitución de los arados. Estas prácticas de alteración mínima del suelo, junto con la rotación de cultivos y la cobertura permanente del suelo, pueden disminuir la erosión de los suelos hasta un 99 %[57]. La agricultura de conservación parece ser el camino a seguir para la agricultura, pero se necesitan soluciones adaptadas a nivel local para evitar algunos de los desafíos que se plantean[58]. En este contexto, en mayo de 2019, el Centro de Mecanización Agrícola Sostenible —una institución regional de la Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico— y asociados en Camboya organizaron conjuntamente actividades de capacitación regionales sobre mecanización apropiada para la agricultura de conservación[59].

La transición a energías renovables es importante no solo desde una perspectiva ambiental, sino también económica. Los estudios de casos de TROTRO Tractor en Ghana y Tun Yat en Myanmar señalan el aumento y la inestabilidad de los precios de los combustibles como importantes obstáculos

RECUADRO 16 RESOLVER LA ESCASEZ DE MANO DE OBRA EN LOS CAMPOS DE FRESA MEDIANTE ROBOTS RECOLECTORES

Las cosechadoras automatizadas pueden recolectar, examinar, limpiar y envasar de forma autónoma los cultivos. Harvest CROO Robotics se desarrolló en los Estados Unidos de América para solucionar el problema de escasez de mano de obra en la industria de producción de la fresa mediante una cosechadora robótica. Cada cosechadora tiene 16 robots que trabajan de manera independiente, los cuales se desplazan por la explotación agrícola, examinan la calidad y madurez de las fresas y proceden luego a recolectarlas, limpiarlas y envasarlas. Así pues, esta tecnología sustituye por completo la mano de obra en los procesos de diagnóstico, la toma de decisiones y la realización de esta tarea.

Harvest CROO Robotics es una de las pocas soluciones conocidas de recolección de la fresa que están actualmente disponibles en los Estados Unidos de América. Ha atraído fondos de inversión de aproximadamente el 70 % de los productores de fresa nacionales, normalmente a gran escala, en respuesta a las preocupaciones relacionadas con la carencia y los costos de mano de obra. Se adopta un sistema de pago paulatino, en el que los pagos de los productores guardan relación con el volumen cosechado.

Una vez que se amplíe la escala de la tecnología, el objetivo es tener una flota de cosechadoras que se puedan controlar a distancia desde un centro de operaciones; además de recolectar, examinar, limpiar y envasar, también será posible recopilar datos que se compartirán con otros productores.

FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[31].

que dificultan la adopción (véase el Anexo 1). Además, las energías renovables ofrecen nuevas posibilidades de impulsar la automatización a lo largo de la cadena de valor y pueden resultar especialmente atractivas para zonas rurales remotas[60]. No obstante, no todas las actividades se gestionan de forma eficaz utilizando las fuentes de energía renovable actualmente disponibles. Por ejemplo, la electricidad no es adecuada para la preparación de tierras de consumo intensivo de energía. Deben llevarse a cabo investigaciones para estudiar qué soluciones de energía renovable sin conexión a la red eléctrica pueden alimentar de la manera más eficaz cada tipo de maquinaria a lo largo de la cadena de valor[51].

En el Capítulo 2 se mostró que la escasez de mano de obra, así como la necesidad de aumentar la eficacia y la resiliencia a las perturbaciones y tensiones climáticas, estaban impulsando la adopción de tecnologías de automatización digital y robótica con IA en explotaciones agrícolas muy mecanizadas. Los indicios apuntan a beneficios ambientales derivados de estas tecnologías y pueden resultar útiles para orientar innovaciones futuras; sin embargo, en vista de los datos limitados y el hecho de que muchas soluciones se encuentran todavía en las primeras etapas de desarrollo y comercialización (véase la Figura 6 en la pág. 51), no es posible generalizar sobre los posibles beneficios. A medida que estas tecnologías sigan desarrollándose y se adopten de forma más generalizada en todo el mundo, incluso a través del uso compartido o servicios de arrendamiento, su adopción podría ampliarse a los agricultores en menor escala[31].

En países de ingresos altos, los robots están reemplazando el trabajo manual en tareas que van desde el riego, la exploración de plagas, la cosecha y el deshierbe hasta la selección y recolección de la fruta. Por ejemplo, en un estudio de casos (Harvest CROO Robotics), el proveedor de servicios señaló que el 70 % de los productores de fresa en los Estados Unidos de América ya había invertido en su proyecto para desarrollar robots de recolección de fresas (véase el Recuadro 16). Las tecnologías robóticas pueden conducir a la obtención de beneficios para el medio ambiente si reducen o eliminan el uso de plaguicidas y herbicidas. Los robots de cultivo autónomos ahorran mano de obra, mejoran la sincronización de las actividades, optimizan las cantidades de insumos aplicados y reducen la compactación del suelo, sobre todo

si se utilizan robots de enjambre más pequeños. Basándose en un examen de 18 estudios, los robots agrícolas autónomos para cosecha, siembra y deshierbe resultan económicamente viables en determinadas circunstancias[61, 62, 63]. Los robots de enjambre, en particular, ofrecen una ventaja en materia de costos en las explotaciones con campos pequeños y de forma irregular[64]. Los responsables de la formulación de políticas y los productores deben tener una percepción más clara de estos beneficios para lograr mayores inversiones en el desarrollo de las tecnologías pertinentes.

El potencial de automatización de la agricultura en pequeña escala no mecanizada o escasamente mecanizada

Los pequeños productores agrícolas comprenden una gama muy diversa de unidades de producción agrícola. Algunos pueden tener un nivel alto de comercialización y utilizar tecnologías modernas, incluida la mecanización motorizada, mientras que otros practican la agricultura de subsistencia con aperos sencillos. En general, dependen mucho de la mano de obra familiar y mecanizan solo parte de sus actividades agrícolas, si es que lo hacen. En muchos contextos, sin embargo, podrían beneficiarse de la expansión de los mercados de alquiler de maquinaria. En el mercado de alquiler suele predominar maquinaria de gran volumen que se desplaza entre varias zonas agroecológicas dentro de las fronteras nacionales y a través de estas. Para aprovechar estos servicios, los productores han tenido que adaptar sus explotaciones y sistemas de producción a fin de ajustarse a este enfoque centrado en la producción agrícola a gran escala. Así pues, existe la necesidad urgente de encontrar soluciones adaptadas para, en primer lugar, abordar anteriores efectos negativos de la mecanización y, en segundo lugar, facilitar su expansión, aumentando así la productividad de forma sostenible.

La maquinaria pequeña se ajusta mejor a la agricultura en pequeña escala

Las soluciones tecnológicas, como los tractores pequeños de dos y cuatro ruedas, resultaron fundamentales para aumentar la mecanización en Asia[2, 19, 20]. Los tractores de dos ruedas probablemente sean más rentables y se adapten mejor a tamaños reducidos de las explotaciones. Pueden maniobrar alrededor de tocones y piedras y reducir al mínimo la pérdida de biodiversidad, puesto que no precisan el aclareo de superficies considerables de terreno. Son asimismo más fáciles de manejar, mantener y reparar y se adecuan mejor a la microfinanciación[22, 65]. Se puede aplicar el mismo argumento a una amplia variedad de pequeñas máquinas agrícolas motorizadas, que son más respetuosas con la biodiversidad al no necesitar que los terrenos agrícolas se remodelen o limpien de manera sustancial. También puede haber beneficios en términos de igualdad de género (véase el Recuadro 17, en el que se presentan ejemplos exitosos de pequeñas máquinas motorizadas utilizadas por mujeres en Nepal), con posibles ahorros de mano de obra y recursos y un aumento del empoderamiento de las mujeres.

Las tecnologías de automatización digital pueden proporcionar múltiples beneficios, pero existen muchos desafíos para la agricultura en pequeña escala

El aumento de la investigación sobre la agricultura de precisión en países de ingresos bajos y medianos bajos pone de relieve la necesidad de aprovechar el potencial de las tecnologías de automatización digital para la agricultura en pequeña escala[67, 68, 69]. Para estimular la adopción, algunos proveedores de servicios estudian la posibilidad de ofrecer servicios de asesoramiento gratuitos a pequeños productores, basando su modelo de negocio en los posibles ingresos generados por la venta de datos recopilados de los agricultores[31]. Esta opción puede ser un prometedor punto de partida, siempre que cumpla con las normas relativas al intercambio y privacidad de los datos. Además, los agricultores están dispuestos a plantar el mismo cultivo en zonas adyacentes para compartir el pago de servicios de asesoramiento basados en el uso de SAT (por ejemplo, en Burkina Faso[70], Ghana[71] y Rwanda[72]).

Las tecnologías digitales también han contribuido a potenciar los servicios de asesoramiento agrícola para los pequeños productores[30]. En países de ingresos bajos, las soluciones digitales implementadas con mayor frecuencia son instrumentos digitales no incorporados, debido a su bajo costo, pero aún se desconocen en gran medida las repercusiones en la productividad y la sostenibilidad ambiental. Además, los datos disponibles no son suficientes para generar

RECUADRO 17 LOS ARGUMENTOS A FAVOR DE QUE LAS MUJERES ADOPTEN LA MECANIZACIÓN MOTORIZADA: DATOS OBTENIDOS DE NEPAL

La mecanización motorizada puede empoderar a las mujeres y atender sus necesidades de tres maneras. Las mujeres pueden ser: i) clientes de proveedores de servicios de mecanización, reduciendo el trabajo pesado y liberando tiempo para descansar o emprender otras actividades sociales o económicas; ii) operadoras de maquinaria y equipo o empleadas en una empresa de servicios de alquiler de mecanización, utilizando sus habilidades técnicas para percibir ingresos, y iii) empresarias que gestionan su propio agronegocio de servicios de alquiler de mecanización, prestando servicios de mecanización a otros agricultores y generando ingresos.

En un informe elaborado recientemente por la FAO se ofrece información sobre maquinaria y equipo ensayados en el mercado con fines de producción de cultivos y actividades poscosecha en Nepal. El objetivo es promover y respaldar el acceso de las mujeres a la mecanización agrícola motorizada en calidad de operadoras o gestoras. Entre los ejemplos de equipo motorizado adoptado por mujeres figuran los siguientes:

- La **deshierbadora propulsada** presenta varios tipos y tamaños. Deshierba y cultiva entre hileras cultivos de espaciamiento amplio, como hortalizas, maíz y caña de azúcar. Según el informe, en comparación con el trabajo manual, una sola máquina puede deshierbar una superficie muy amplia. Las agricultoras de maíz del distrito de Dang señalaron que podían ahorrar 10 000 NPR (84 USD) por bigha (superficie correspondiente a 0,66 ha) utilizando la deshierbadora de gran potencia en vez de pagar una deshierbe manual.
- La **segadora móvil** es una segadora con motor que se utiliza para el arroz o trigo agrupado. Elimina la pesada tarea de la trilla a mano, ahorra tiempo y aumenta en gran medida la cantidad de grano trillado (de 8 a 10 veces más que cuando se trilla manualmente). Gracias a su alto nivel de trillado, es adecuada para proveedores de servicios particulares o centros de alquiler al cliente.
- La **desgranadora de maíz** se utiliza para separar el grano de la mazorca. Elimina el trabajo pesado y las molestias del desgranado a mano, ahorra tiempo y aumenta en gran medida la cantidad que se puede desgranar en un tiempo dado (30 a 40 veces más rápido que el desgranado a mano). El maíz desgranado ocupa además menos espacio que cuando se encuentra en mazorcas, lo que facilita su almacenamiento.

FUENTE: Justice, Flores Rojas y Basnyat, 2022[66].

el asesoramiento adaptado que los pequeños productores necesitan. Asimismo, el bajo nivel de habilidades digitales genera dificultades relacionadas con la ampliación de la escala y existe también una importante brecha digital con las mujeres y otros grupos vulnerables que tienen peor acceso a las soluciones. Otra cuestión incipiente en muchos países es la falta de legislación en materia de privacidad y protección de datos, que puede provocar una utilización indebida por terceros[73]

También se han llevado a cabo investigaciones sobre el uso de drones para aplicar insumos como fertilizantes o productos químicos en pequeñas explotaciones, incluido en África[74, 75]; se ha iniciado la comercialización, pero las soluciones aplicadas se basan fundamentalmente en los mapas y tienen muy poca capacidad de toma de decisiones autónoma. Entre los beneficios de la aplicación de insumos mediante drones figuran la mejora de la precisión, la reducción de la exposición a plaguicidas, la posibilidad de aplicación en terrenos a los que el equipo no puede llegar (porque el campo está demasiado húmedo o es de difícil acceso) y la prevención de daños a los cultivos en pie por el movimiento del equipo. La rentabilidad depende del costo del equipo, la eficacia de la aplicación, los ahorros de insumos gracias a la aplicación localizada y la mejora del rendimiento por la reducción de daños en comparación con el uso de maquinaria terrestre. La disponibilidad y la asequibilidad de los drones son aspectos fundamentales para los pequeños productores agrícolas, que normalmente no poseen equipo propio. Estas tecnologías plantean muchos desafíos, como rellenar los tanques rociadores, los depósitos de fertilizantes o las tolvas de semillas, recargar las baterías,

emplear etiquetas de plaguicidas para la aplicación localizada, proporcionar capacitación a los usuarios y controlar la dispersión hacia zonas no destinatarias. Para resolver estos problemas se necesita capacidad técnica e institucional y esto puede constituir en sí mismo un nuevo desafío en muchos países de ingresos bajos y medianos[76].

Dado de que uno de los obstáculos que impiden a los pequeños productores la adopción de la automatización digital son los costos, resulta especialmente importante mejorar las tecnologías, la escala y los modelos de negocio innovadores para aumentar la asequibilidad. Esta cuestión queda claramente reflejada en los ordenadores y los teléfonos inteligentes: una vez que estos se fabrican en grandes cantidades, se vuelven mucho menos caros, lo que allana el camino para aumentar su uso en la agricultura de precisión[31]. En algunos contextos, la escasez de agua supone un desafío para la producción agrícola; en Malí, un caso de introducción exitosa de invernaderos automatizados, en los que un ordenador controlaba la aplicación de agua y plaguicidas, muestra que estas tecnologías pueden aumentar la eficiencia en el uso del agua y los insumos[77].

Ganadería de precisión

La ganadería de precisión se aplica principalmente en sistemas intensivos en países de ingresos altos en los que sensores controlan la salud, el estado reproductivo y el comportamiento de los animales. El marcado electrónico y la cadena de bloques se utilizan cada vez más para mejorar la calidad del producto al facilitar la rastreabilidad del ganado que se comercializa desde sistemas extensivos[29]. Sin embargo, estas tecnologías avanzadas siguen siendo demasiado costosas para la mayoría de productores ganaderos en países de ingresos bajos, donde las tecnologías para ganadería de precisión se centran más en los sistemas de vallado virtuales con alarmas sonoras, descargas eléctricas u otros avisos para mantener a los animales dentro de los límites. Estas tecnologías reducen el trabajo pesado y la necesidad de mano de obra, facilitan la gestión reproductiva, la recopilación de información y la gestión intensiva y eliminan potencialmente la necesidad de cercados físicos. Además, los GNSS ayudan a los productores de ganado a localizar a los animales que pastan en grandes pastizales abiertos y pueden conectarse a sensores para vigilar la temperatura, el movimiento y otros indicadores del estado de salud y reproductivo. Sin embargo, disponer de GNSS individuales para cada animal es actualmente demasiado costoso para los sistemas extensivos de pastoreo. Al igual que con los cultivos, se necesita reorganización (para lograr costos más bajos y producción masiva) y modelos de negocio innovadores para poner estas tecnologías a disposición de los sistemas extensivos de producción ganadera en países de ingresos bajos[29]. Las aplicaciones para acceder a información útil relativa a la gestión del ganado encierran un gran potencial para la ganadería de precisión[78]. Datos circunstanciales recabados en Kenya muestran que los pastores utilizan cada vez más estas aplicaciones que les indican el estado de los pastizales y les ayudan a encontrar suficiente alimento cuando se desplazan con sus rebaños[79]. Las aplicaciones basadas en datos obtenidos por satélite pueden ayudar a determinar y notificar enfermedades de los animales, permitiendo así que los productores y criadores de ganado realicen intervenciones rápidas y selectivas[78].

Arreglos de activos compartidos para la mecanización

Los instrumentos digitales presentan también perspectivas alentadoras para mejorar el uso de activos de mecanización agrícola compartidos para los pequeños productores. Por ejemplo, los dispositivos de seguimiento con GNSS y el *software* de gestión de flotas —como los que aplican las soluciones tipo Uber para el transporte— prometen reducir de forma significativa los costos de transacción de los pequeños productores y los proveedores de servicios de maquinaria y pueden facilitar la supervisión de los operadores de maquinaria por parte de los proveedores de servicios[29]. Cabe citar los ejemplos de TROTRO Tractor en África y Tun Yat en Asia. Estas iniciativas afrontan varios desafíos, como carreteras en mal estado y una mala conectividad, así como el hecho de que la demanda sea estacional, alcanzando niveles máximos en períodos concretos. Los proveedores de servicios están considerando la posibilidad de utilizar innovaciones institucionales para superar algunos de los desafíos. Por ejemplo, recurriendo a agentes de reservas para agrupar a pequeños productores, reducen los costos de transacción que implica llegar a los agricultores y asegurar la continuidad del negocio[80]. Esto podría permitir la adopción

progresiva de GNSS para un posicionamiento preciso y el control de maquinaria avanzado, con la perspectiva adicional de seguir desarrollando la agricultura de precisión mediante TDV también en países de ingresos bajos y medianos. El principal desafío que plantea la utilización de GNSS con maquinaria voluminosa es la necesidad de que los terrenos sean rectangulares, lo que podría no ser así para muchos pequeños productores.

Robots con inteligencia artificial

Los robots diseñados para explotaciones agrícolas en países de ingresos altos no suelen ser apropiados para los países de ingresos bajos y medianos, en los que la agricultura sigue estando dominada por pequeños productores que dependen fundamentalmente de la mano de obra familiar y llevan a cabo muchas actividades de forma manual. Por ejemplo, las cosechadoras de algodón automatizadas en países de ingresos altos son muy eficaces, pero solo resultan adecuadas para el algodón que madura todo junto al mismo tiempo. Esto se debe a que la máquina puede dañar las plantas durante la cosecha. Este tipo de solución no se ajusta a las explotaciones agrícolas tradicionales de la India o África occidental, donde el algodón es un cultivo de alta calidad y con varias floraciones, cuya campaña dura de unos 150 a 160 días, durante los cuales el algodón se recoge de tres a cuatro veces[31].

Los costos suponen un obstáculo adicional para la adopción de soluciones robóticas, sobre todo para los pequeños productores en países de ingresos bajos y medianos, donde se hallan muy pocos ejemplos. Estos cultivos y sistemas agrícolas destinatarios están diseñados tradicionalmente para el trabajo manual y adaptados a los contextos y desafíos locales, por lo que se requieren cambios mínimos o nulos en las estructuras agrícolas. Los factores que determinan la adopción de estas soluciones tienen también un carácter socioeconómico y la falta de mano de obra estacional constituye un factor destacado. Otros factores que hacen disminuir el interés por el trabajo manual y mal remunerado son la mejora del acceso a la educación, la migración a las ciudades, el estigma social y las políticas gubernamentales en apoyo de los desempleados[73, 81, 82, 83].

La bibliografía sugiere que los robots autónomos diseñados específicamente para las condiciones de los países de ingresos bajos y medianos podrían aportar los siguientes beneficios: i) la disminución de la necesidad de mano de obra; ii) la disminución de costos y la reducción de economías de escala, garantizando así que las tecnologías también sean accesibles a las explotaciones de menor tamaño que utilizan mecanización convencional, y iii) la capacidad de utilizar de manera rentable tecnologías en terrenos de forma irregular, evitando así la necesidad de reformar los paisajes rurales para convertirlos en grandes campos rectangulares en los que la mecanización tradicional es más eficiente. Lamentablemente, no hay análisis de viabilidad para estos países a fin de apoyar los argumentos a favor de la inversión en estas tecnologías[29]. Esto se debe en parte al hecho de que las organizaciones que desarrollan estas soluciones carecen de capacidad para atraer o retener personal con talento que pueda realizar este tipo de análisis, pues se trata por lo general de pequeñas empresas que compiten contra grandes compañías[31]. En el Recuadro 18 se presentan posibles oportunidades y desafíos que se plantean al desarrollar robots destinados a pequeños productores.

Repercusiones más amplias de las tecnologías de automatización digital para la agricultura

Las tecnologías agrícolas suelen tener implicaciones de carácter económico, social y ambiental que van mucho más allá de sus beneficios y costos a nivel de la explotación agrícola. Por ejemplo, la mecanización motorizada de la agricultura se ha relacionado con el aumento del tamaño de las explotaciones, la redefinición de los campos y el descenso de las poblaciones rurales. Las tecnologías de automatización digital tienen gran potencial para afrontar los desafíos ambientales en una agricultura muy mecanizada, tal y como se explica más arriba. Si están bien diseñadas, tienen también un gran potencial en la agricultura en pequeña escala, sobre todo si se combinan con maquinaria motorizada adaptada. De cara al futuro, si las tecnologías de automatización digital examinadas en el presente capítulo, en particular robots y la IA, se desarrollan correctamente y se adoptan de forma generalizada, podrían tener repercusiones positivas más amplias, en particular las siguientes:

RECUADRO 18 UNA IDEA DE ROBOTS DE CULTIVO AUTÓNOMOS DE BAJO COSTO

Un ejemplo de un robot potencialmente viable para pequeños productores sería un robot agrícola autónomo con ruedas pequeñas que pudiera sembrar, deshierbar y cosechar y que costase lo mismo que una moto, esto es, entre 500 USD y 1 000 USD, una cantidad que muchos hogares agrícolas en países de ingresos bajos poseen y que, por tanto, sirve de referencia útil para el precio. Un robot andador también sería de utilidad en los campos, ya que puede pasar por encima de obstáculos, pero resulta mucho más caro. Habida cuenta de la capacidad de aprendizaje del robot agrícola autónomo utilizando inteligencia artificial (IA), existen grandes probabilidades de aumentar la producción de alimentos de manera sustancial, muy por encima de los niveles viables actualmente. Sin embargo, producir robots especializados para cada cultivo y para unas condiciones agroecológicas concretas es un negocio de elevados costos y escaso volumen.
Así pues, un modelo de negocio viable es aquel en el que un fabricante suministra una máquina autónoma genérica, con una serie de herramientas adaptadas a diferentes tareas, algunas de las cuales se fabrican localmente. Esta máquina autónoma contaría con un dispositivo GNSS para permitirle crear mapas (por ejemplo, color del suelo, fuerza del suelo basada en la fuerza necesaria para cosechar, rendimiento). Se podría alimentar mediante varias fuentes de energía, por ejemplo combustible, energía solar, metano. Para hacer que estas máquinas autónomas sean más asequibles, especialmente en las primeras etapas, podrían ser alquiladas o podrían cobrarse tasas por servicios de trabajo agrícola.
Con una máquina agrícola autónoma genérica, serían posibles muchos otros tipos de automatización digital. Por ejemplo, con la incorporación de un sensor de cultivos, la máquina autónoma podría determinar las necesidades de fertilizantes[84], utilizar mapas de suelos, plantas y rendimientos registrados con anterioridad y detectar plagas, enfermedades y hierbas para aplicar los insecticidas, fungicidas o herbicidas necesarios.
Mientras para algunos pequeños productores será difícil acceder a la automatización digital, al mismo tiempo millones de ellos representan una oportunidad de negocio y un nuevo mercado atractivo. Un proceso similar de investigación, desarrollo de tecnología y emprendimiento se produjo con el almacenamiento hermético de cereales en África y Asia meridional[85]. Antes de los sacos de almacenamiento de cultivos mejorados de Purdue, los fabricantes se mostraban reacios a invertir en innovaciones de almacenamiento de cereal para pequeños productores por su percepción de falta de poder adquisitivo. Sin embargo, una vez que se hubieron vendido millones de estos sacos en más de 30 países, aparecieron numerosos imitadores y competidores.

FUENTE: Lowenberg-DeBoer, 2022[29].

- **Estructura de la explotación agrícola:** Los robots pequeños de enjambre permiten reducir economías de escala y eliminan los incentivos para ampliar el tamaño de las explotaciones, evitando así alteraciones sociales y ambientales. Al reducir el trabajo pesado, aumentar la rentabilidad y mejorar el prestigio de la agricultura como sector de alta tecnología, los robots de enjambre pueden ayudar a las comunidades rurales a retener a los jóvenes y también atraer trabajadores de otros sectores (véase más información sobre la juventud en el Capítulo 4). La agricultura con mecanización motorizada ha provocado el abandono de pequeños campos de forma irregular; los robots de enjambre podrían facilitar que la agricultura comercial recuperara algunos de estos campos abandonados, que en muchos casos se caracterizan por la buena calidad del suelo, precipitaciones seguras y proximidad a los mercados. Por otra parte, como los robots de enjambre ayudan a mejorar la rentabilidad de estos campos, los programas de subvenciones dirigidos a las explotaciones en pequeña escala pueden pasar a ser menos costosos. Además, tanto las explotaciones en pequeña escala como las explotaciones de mayor tamaño que siguen dependiendo de la tracción animal pueden esquivar la mecanización motorizada y adoptar directamente la automatización digital, evitando la necesidad de reconfigurar los paisajes rurales y contribuyendo así a aumentar la biodiversidad.

- **Estructura de los mercados de equipo agrícola**: Garantizar el acceso de la agricultura en pequeña y mediana escala, incluidos los cultivos, la ganadería y la acuicultura, a diversas tecnologías de automatización digital puede provocar cambios en la estructura de los mercados de equipo conexos. Esto puede generar oportunidades para empresarios que tengan la capacidad técnica para desarrollar máquinas y equipo asequibles, fiables y autónomos y vincular esa tecnología con modelos de negocio innovadores.

- **Protección de los cultivos como negocio de servicios:** Actualmente, la protección de los cultivos se centra sobre todo en la venta de grandes cantidades de plaguicidas. La pulverización selectiva puede reducir la cantidad empleada en hasta un 90 % y acarrear beneficios significativos para el medio ambiente, en tanto que el control mecánico o láser de las malezas podría eliminar los herbicidas por completo[29]. Esto podría reforzar el papel de los empresarios locales que ofrecen máquinas autónomas estandarizadas para detectar malezas y plagas. Estas máquinas se podrían suministrar con arreglo a un modelo de pago por servicio o venderse directamente a los agricultores.

- **Ganadería y acuicultura más seguras, más eficientes y más resilientes**: La automatización digital puede facilitar de forma significativa el trabajo a distancia y ayudar a reducir al mínimo la carga de trabajo, mejorando también al mismo tiempo la gestión[86]. Están aumentando las investigaciones sobre los posibles usos de tecnologías digitales en la acuicultura y sobre la forma en que el sector puede hacer cambios significativos en los correspondientes modelos de negocios y estructuras de las explotaciones[87]. Por ejemplo, las tecnologías del IdC pueden supervisar de forma automática las condiciones hídricas y permitir a los acuicultores adoptar medidas inmediatas[88]. En la producción ganadera, el creciente uso de sensores biométricos, que monitorean la salud y el comportamiento de cada animal en tiempo real, hace que los productores obtengan información en tiempo real y, por ende, lleven a cabo acciones específicas que pueden ofrecer numerosos beneficios, incluida la reducción del uso de antibióticos. Los sensores también posibilitan el uso de la tecnología de cadena de bloques, que puede garantizar la rastreabilidad de los productos de origen animal desde la explotación agrícola hasta la mesa así como ofrecer ventajas clave en el seguimiento de brotes de enfermedades y la prevención de pérdidas económicas conexas y pandemias sanitarias relacionadas con los alimentos[89].

A medida que las tecnologías avancen y se vuelvan más accesibles, aflorarán otras repercusiones. Las repercusiones exactas, sin embargo, dependerán de muchos factores, en particular las características de las tecnologías, la conectividad, los marcos jurídicos y reguladores, las decisiones empresariales de corporaciones y empresas emergentes, las reacciones de las redes sociales y las actitudes culturales con respecto a la automatización digital agrícola. Los gobiernos pueden promover la adopción y posibilitar la obtención de resultados positivos mediante infraestructuras digitales, enfoques jurídicos y reguladores apropiados, investigación y educación (véase el Capítulo 5). ■

CONCLUSIONES

En este capítulo se han presentado los datos objetivos disponibles que respaldan los argumentos a favor de diversas tecnologías de automatización. Los argumentos a favor de la mecanización motorizada agrícola están sólidamente asentados, habida cuenta de los beneficios que comporta en cuanto a, entre otras cosas, el ahorro sustancial de costos gracias a la reducción en el uso de mano de obra, la ejecución oportuna de las actividades agrícolas, la reducción del trabajo pesado, la expansión e intensificación de la producción agrícola y el aumento de la resiliencia a las perturbaciones climáticas y sanitarias. Además, la mecanización ha contribuido a liberar mano de obra familiar de los hogares agrícolas, lo que permite a miembros del hogar dedicar el tiempo que no invierten en la agricultura a labores no agrícolas que pueden mejorar sus medios de vida.

Durante la próxima década, es probable que la mecanización todavía desempeñe una importante función en la transformación agrícola de países

donde su adopción ha sido lenta, especialmente en el África subsahariana, pero la mecanización debe adaptarse a las necesidades locales mediante estrategias basadas en una cuidadosa evaluación de la demanda. Se dispone de diversos tipos y tamaños de maquinaria para diferentes zonas topográficas y agroclimáticas, capaces de atender las necesidades de los pequeños productores. Las soluciones tecnológicas como los tractores pequeños de cuatro ruedas y los tractores de dos ruedas, así como la amplia variedad de máquinas agrícolas pequeñas, que son más respetuosas con la agrobiodiversidad para la alimentación y la agricultura, pueden formar parte de un contexto en el que el nivel de adopción sigue siendo bajo.

A pesar de su potencial, la mecanización es aún escasa en muchas partes del mundo debido a factores estructurales, tales como infraestructura deficiente, y la ausencia de competencias técnicas y de un entorno empresarial propicio. Muchas zonas y grupos socioeconómicos siguen sin tener acceso a la mecanización, ya sea debido a restricciones financieras o a factores estructurales limitantes, tales como políticas restrictivas o infraestructura inadecuada. Se necesita más apoyo en materia de políticas para los bienes públicos o colectivos mediante ayuda a través de los servicios generales. Esto incluye el fomento de iniciativas de investigación y desarrollo agrícolas, junto con servicios de transferencia de conocimientos (por ejemplo, capacitación y asistencia técnica) y el apoyo al desarrollo y mantenimiento de la infraestructura (por ejemplo, la mejora de carreteras rurales, sistemas de riego, infraestructura de almacenamiento). Estos dos puntos de partida para la ayuda a través de servicios generales pueden fomentar un entorno propicio para la automatización sin distorsionar los incentivos de mercado y a menudo son necesarios para formular un argumento a favor viable de la automatización, especialmente en países de ingresos bajos y medianos[90].

En cambio, las tecnologías de automatización digital, en particular los robots para cultivos y la automatización digital de la acuicultura, se encuentran todavía en las primeras etapas de desarrollo y comercialización y las repercusiones económicas en los productores agrícolas siguen teniendo un carácter especulativo. La producción ganadera de precisión, por otro lado, se encuentra en una fase más madura, aunque sigue concentrada en los países de ingresos altos. Otras tecnologías, como las soluciones digitales no incorporadas, los SAT activos y la teledetección, las soluciones de mecanización con GNSS y TDV, y las soluciones para el cultivo protegido, están expandiéndose. Sin embargo, basándose en los 27 estudios de casos de todo el mundo examinados en el presente capítulo, estas tecnologías han demostrado hasta el momento ser rentables únicamente en países de ingresos altos y para productores en gran escala. Es evidente que se necesitan más datos empíricos relativos a los beneficios y los costos a fin de entender mejor qué tecnologías se pueden adaptar a diferentes condiciones.

Como en el caso de la mecanización, hay factores estructurales —en particular, la falta de conectividad, electricidad, alfabetización digital y conocimiento del potencial— que afectan a los argumentos a favor de las tecnologías de automatización digital. Los datos obtenidos tanto de la bibliografía como de los estudios de casos sugieren que los agricultores jóvenes son decisivos en la transformación de los negocios agrícolas familiares hacia la digitalización y la automatización avanzada. Otros factores importantes que influyen en la adopción son el aumento de la competencia de los mercados internacionales, la falta de mano de obra suficiente y el potencial para reducir el trabajo pesado y mejorar las condiciones laborales. En algunos casos, las plataformas digitales que posibilitan el acceso a servicios de mecanización también ayudan a las mujeres a superar el prejuicio social contra ellas y mejorar su acceso a los servicios (véase el Capítulo 4).

Los instrumentos digitales también están cambiando el panorama de la mecanización mediante la ampliación de los mercados de maquinaria en alquiler, gracias a importantes reducciones en los costos de transacción. Además, ciertas tecnologías de automatización digital tienen potencial para invertir algunas de las tendencias ambientales negativas resultantes de la mecanización llevada a cabo en el pasado. Para hacer frente a estos desafíos, es necesario adaptar las innovaciones en mecanización motorizada a maquinaria más pequeña y más ligera que puede reducir la compactación del

suelo y mitigar los efectos negativos para el medio ambiente. La investigación técnica y agronómica aplicada puede ayudar a explorar las soluciones de mecanización que mejor se adapten a las condiciones agroecológicas locales.

En este capítulo se ha presentado también la función de las políticas públicas, la legislación, las inversiones y las innovaciones a fin de afrontar los obstáculos estructurales para la adopción y adaptar las intervenciones a los pequeños productores y las preocupaciones relativas al medio ambiente. En los capítulos 4 y 5 se examinan en más profundidad las repercusiones sociales de la automatización y la función de las políticas públicas, respectivamente. ■

KENYA
Agricultor dedicado a la agricultura de conservación conduce un tractor en Kathonzweni, en el condado de Makueni.
©FAO/Luis Tato

CAPÍTULO 4
REPERCUSIONES Y OPORTUNIDADES SOCIOECONÓMICAS DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

MENSAJES PRINCIPALES

➔ El proceso de automatización agrícola puede mejorar la productividad y generar nuevos empleos, tanto en la agricultura como en los sistemas agroalimentarios en general, lo que crea oportunidades para trabajadores jóvenes, mujeres y grupos marginados, como las personas con discapacidad.

➔ Para entender todas las implicaciones sociales de la automatización agrícola, debemos ir más allá de la producción primaria y examinar las repercusiones en los sistemas agroalimentarios en su conjunto.

➔ En situaciones de aumento de salarios y escasez de mano de obra, la automatización puede beneficiar tanto a los productores como a los trabajadores asalariados. En particular, puede ayudar a los pequeños productores agrícolas a superar la escasez de mano de obra y liberar tiempo de la agricultura para dedicarlo a otras actividades, mejorando así su bienestar.

➔ Por otro lado, cuando la mano de obra es abundante y las subvenciones reducen el costo de adopción de la automatización, existe el riesgo de que se produzca un desplazamiento de puestos de trabajo y desempleo, especialmente en el caso de los trabajadores más pobres y menos cualificados.

➔ La automatización inclusiva requiere un enfoque ascendente que otorgue prioridad al desarrollo de competencias y capacidades, en el que mujeres y jóvenes y todas las partes interesadas pertinentes participen en el diseño del desarrollo de tecnologías a fin de tener en cuenta sus preocupaciones, necesidades y conocimientos.

➔ Los gobiernos no deberían aplicar subvenciones distorsionadoras que entrañen el riesgo de aumentar el desempleo, ni restringir la automatización suponiendo que de esa forma se preservarán puestos de trabajo e ingresos, lo que haría que la agricultura sea menos competitiva y productiva. La atención debería centrarse más bien en crear un entorno favorable que asegure la plena participación de las mujeres, los jóvenes, los pequeños productores y otros grupos vulnerables y marginados a fin de que todos ellos se beneficien de la automatización.

➔ En paralelo, se deben abordar las causas profundas de la pobreza, la vulnerabilidad y la marginación para que la automatización no agrave la exclusión de los grupos más vulnerables y marginados.

En los capítulos 2 y 3 se examinaron las tendencias y los factores determinantes de la mecanización motorizada y las tecnologías de automatización digital, así como las (posibles) repercusiones en la productividad, la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad ambiental. En este capítulo se examinan las implicaciones de la automatización agrícola para la inclusión y se determinan de forma específica los ganadores y perdedores en el proceso. Al inicio, se ofrece una visión general de las características de los sistemas agroalimentarios y cómo la automatización puede afectar a la mano de obra dentro de dichos sistemas. Posteriormente, se examinan las repercusiones de la automatización agrícola en el empleo decente y en diferentes grupos socioeconómicos y demográficos —grandes productores frente a pequeños productores, trabajadores agrícolas sin tierras frente a trabajadores agrícolas por cuenta propia, mujeres y jóvenes— que participan en el proceso. Asimismo, en el capítulo se reconoce que países con distintos niveles de transformación agrícola y estructural experimentarán estos efectos de diferente manera y, por tanto, afrontarán distintos desafíos en materia de políticas en relación con la automatización. ■

UN ENFOQUE BASADO EN LOS SISTEMAS AGROALIMENTARIOS PARA ANALIZAR LAS IMPLICACIONES SOCIALES

La producción agrícola está cambiando con rapidez. La adopción de tecnologías que ahorran mano de obra, desde tractores, cosechadoras y trilladoras en países de ingresos bajos y medianos hasta soluciones de IA de alta tecnología que se encuentran principalmente en países de ingresos altos, se produce en el contexto de un proceso continuo de transformación agrícola y evolución de los sistemas agroalimentarios.

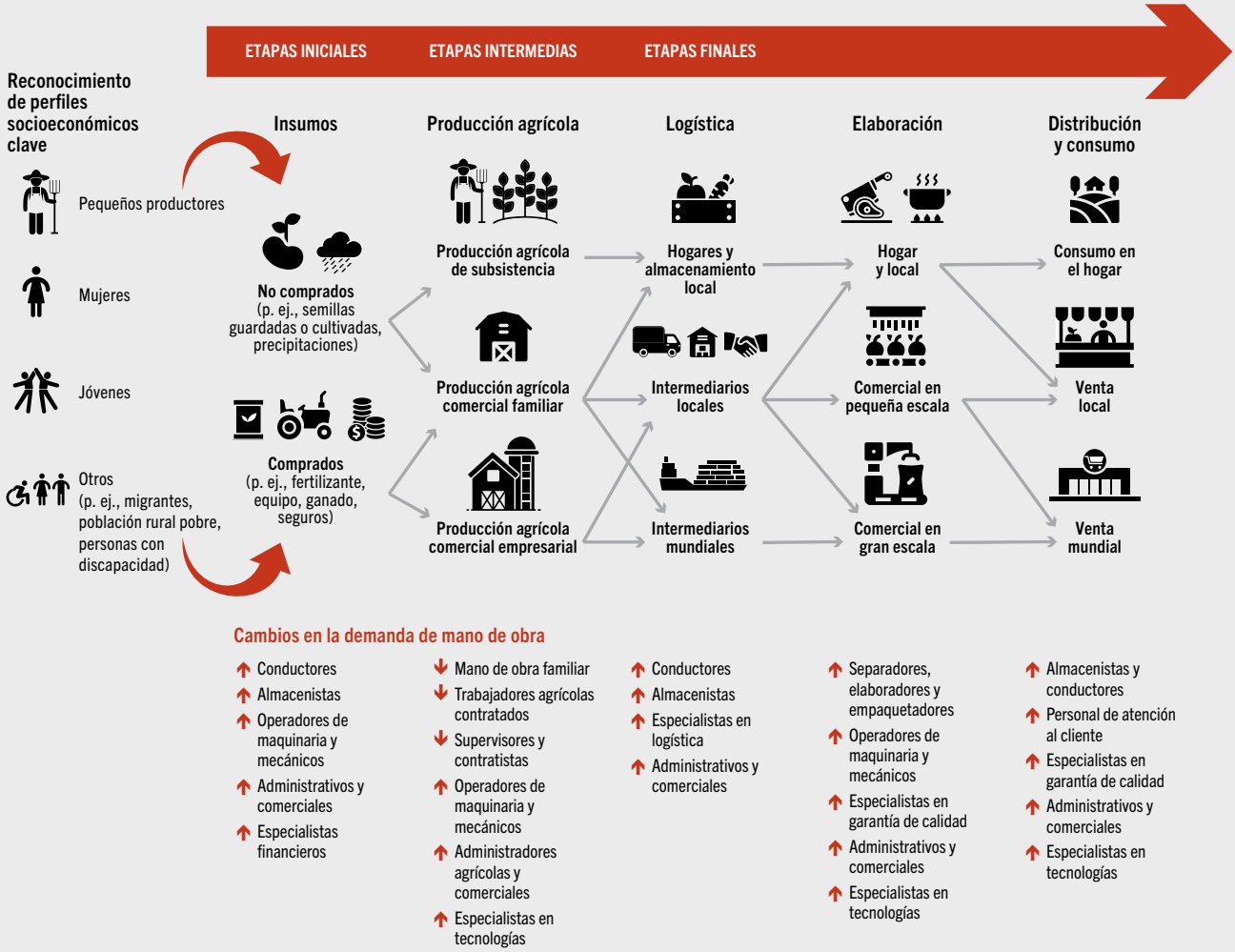
Es fundamental entender la dinámica de los sistemas agroalimentarios para analizar y predecir los efectos de la automatización en cualquier nodo de los sistemas, teniendo en cuenta posibles desventajas o consecuencias inesperadas.

Las respuestas en las etapas anteriores y posteriores son igualmente importantes para entender las implicaciones para la producción agrícola, los precios, los flujos comerciales y el empleo decente. Estas también dependen del tipo de cadena de valor agroalimentaria, como se describe en la edición de 2021[1] de esta publicación: i) tradicional, vinculada sobre todo a la producción agrícola de subsistencia en pequeña escala; ii) de transición, asociada con frecuencia a la producción agrícola comercial de tipo familiar en pequeña y mediana escala, o iii) moderna, donde la producción agrícola comercial de tipo empresarial a gran escala desempeña un papel principal. Estas cadenas de valor difieren en muchos aspectos, incluidas las necesidades de mano de obra. Entender los vínculos bidireccionales a lo largo de las cadenas de valor agroalimentarias es fundamental para comprender la repercusión de las tecnologías de automatización, en particular cómo cambian las necesidades de mano de obra en los distintos componentes de los sistemas agroalimentarios y el potencial de los trabajadores para pasar de unos componentes a otros. Los efectos dependerán también, entre otras cosas, de las funciones específicas de cada sexo, las categorías de trabajadores (por ejemplo, migrantes o locales, estacionales o no estacionales) y el conjunto de competencias de los trabajadores.

Desentrañar los sistemas agroalimentarios

En la Figura 7 se proporciona un marco conceptual para analizar la repercusión de la automatización en el empleo en los diferentes componentes de los sistemas agroalimentarios. Se ilustran algunas de las principales características de los tres tipos habituales de cadenas de valor agroalimentarias anteriormente mencionados, separando los mercados de etapas iniciales, intermedias y finales e indicando las actividades principales en cada mercado. Se muestran asimismo los vínculos entre los mercados y se ponen de relieve diferencias en las actividades comerciales habituales de tres categorías distintas de productores agrícolas, a saber, de subsistencia, comercial familiar y comercial empresarial. Se identifican diferentes grupos socioeconómicos y demográficos (a la izquierda en la figura) como actores clave en los sistemas agroalimentarios, entre los cuales figuran pequeños productores, mujeres, jóvenes y otros grupos marginados (por ejemplo, personas

FIGURA 7 UN ENFOQUE BASADO EN SISTEMAS AGROALIMENTARIOS DE LAS REPERCUSIONES DE LA AUTOMATIZACIÓN EN EL EMPLEO



FUENTE: Elaborado por la FAO sobre la base de Charlton, Hill y Taylor, 2022[3].

con discapacidad y migrantes), pese a que estos últimos suelen ser los que sufren mayor exclusión, marginación y vulnerabilidad. El proceso de automatización agrícola ofrece la posibilidad de aplicar un enfoque inclusivo, que asegure que todas las personas, especialmente las vulnerables, excluidas y marginadas, participen en los procesos de desarrollo y se beneficien de ellos, a través de la mejora de las oportunidades, el acceso a recursos productivos y naturales, el empoderamiento, la capacidad de acción y el respeto por los derechos. La inclusión es tanto una forma de obtener resultados mejores y más equitativos como un fin en sí misma para conseguir que nadie se quede atrás[2].

En la parte inferior de la Figura 7, se muestra una lista de los principales tipos de trabajo en cada mercado y se indica (con flechas hacia arriba o hacia abajo) cómo la tecnología de automatización

podría afectar a la demanda de cada tipo de trabajo, aunque las repercusiones concretas dependerán del contexto y se deben comprobar de forma empírica. Aunque las tecnologías de automatización reducen la demanda de mano de obra para las tareas que automatizan, simultáneamente crean tareas nuevas con las correspondientes necesidades de mano de obra, como el mantenimiento y el manejo del equipo. La Figura 7 ofrece un punto de referencia para el posterior examen de las implicaciones de la automatización agrícola para la inclusión. En la presente sección se proporciona información básica sobre los vínculos de mercado en los sistemas agroalimentarios que son cruciales para que las repercusiones de la automatización sobre el empleo se transmitan a los componentes de los sistemas agroalimentarios.

Tipos de producción agrícola

La producción agrícola (etapa intermedia) es fundamental y comprende los tres tipos antes mencionados (véase la Figura 7). En la producción agrícola de subsistencia, la producción forma parte de una estrategia familiar en materia de medios de vida, en la que los hogares compran pocos insumos y consumen la mayoría de sus propios productos agrícolas[4]. La producción de subsistencia es habitual en países de ingresos bajos, pero también puede definir acertadamente pequeñas granjas en zonas rurales de países de ingresos altos[5]. Aunque la producción agrícola de subsistencia se describe como la producción de alimentos para consumo propio, esto no significa que los hogares produzcan necesariamente la totalidad de sus propios alimentos; de hecho, los hogares con producción de subsistencia a menudo dependen en buena medida de la compra de alimentos[6, 7, 8].

En la producción agrícola comercial de tipo familiar, las actividades de producción agrícola son una parte importante de la estrategia de ingresos familiares; se compran la mayoría de los insumos y los productos agrícolas se venden en los mercados locales, nacionales y mundiales. La agricultura comercial familiar comprende la producción en pequeña escala en países de ingresos altos y bajos, así como actividades a escala mediana y relativamente grande en países de ingresos altos, y su propietaria y administradora es una familia.

Por último, la producción agrícola comercial de tipo empresarial está formada por empresas que producen a gran escala. Es más frecuente en los países de ingresos altos, pero también se puede observar en países de ingresos bajos en forma de plantaciones y fincas a gran escala[9].

Las actividades en este nodo de los sistemas agroalimentarios están todas directamente relacionadas con la producción agrícola, ganadera, pesquera y acuícola, así como la actividad forestal y agroforestal. Entre las actividades necesarias figuran el mantenimiento y preparación del suelo, la plantación, el deshierbe y el cuidado de las plantas, la poda y la cosecha, así como la reproducción, la cría, el cuidado diario y el control sanitario. En este nivel, la automatización de determinadas tareas agrícolas puede llevar a un aumento de la producción, lo que tendría repercusiones para las actividades de las etapas finales, que incluyen el transporte, el envasado, el almacenamiento, la elaboración y la distribución. Estas actividades de las etapas posteriores generarán un incremento de la demanda de la mayoría de tipos de trabajadores a fin de atender el mayor volumen de producción.

Actividades de las etapas anteriores y posteriores

Las actividades de las etapas anteriores comprenden todas aquellas actividades relacionadas con la provisión de insumos destinados a la producción agrícola. En líneas generales, incluyen la producción y distribución de semillas, fertilizantes, maquinaria, piensos para animales y equipo de riego, además de la provisión de seguros, asistencia técnica y financiación. La agricultura de subsistencia depende fundamentalmente de insumos no adquiridos (en particular, semillas conservadas), los piensos obtenidos de los cultivos plantados y las precipitaciones (más que el riego)[10]. En función del tamaño, la ubicación y otras características, la agricultura comercial familiar puede utilizar insumos adquiridos o no, o una combinación de ambos. En esta representación de los sistemas agroalimentarios (véase la Figura 7 en la pág. 69), las innovaciones en la tecnología agrícola provienen generalmente de la parte de los insumos y dependen de la disponibilidad de semillas, piensos, fertilizantes y equipo y maquinaria, incluidas las tecnologías de automatización, mejores (o menos costosos). Una vez adoptadas, estas tecnologías

cambian la forma en que se utilizan los insumos en la producción agrícola (etapa intermedia).

Las actividades de las etapas posteriores comprenden actividades poscosecha, de sacrificio y de captura, tales como el almacenamiento, el transporte, la elaboración, el envasado, la venta al por mayor y al por menor y, por último, el consumo en los hogares y los servicios de alimentación. En la agricultura de subsistencia, estas actividades tienen lugar en los hogares o aldeas[11, 12]. En la agricultura comercial familiar, las actividades logísticas se pueden llevar a cabo en los hogares o aldeas, pero mediante intermediarios locales o mundiales. Los productores empresariales, en cambio, se pueden abastecer de productos procedentes de distintos lugares y conservarlos en grandes almacenes específicos. En el transporte se incluye el de tipo marítimo, aéreo, ferroviario y por carretera. La distribución conlleva la entrega a granel de los productos agrícolas a elaboradores o mayoristas. En muchos casos, las tecnologías de automatización dan lugar al aumento de la producción agrícola en las etapas intermedias, lo que puede a su vez ocasionar expansión, crecimiento y mayor innovación tecnológica en las etapas finales. Por ejemplo, la introducción de la cosechadora motorizada de tomate aumentó la cantidad de tomates con fines de elaboración, lo que incentivó la innovación en el sector de la elaboración[13]. Por otro lado, la innovación en las etapas finales también puede influir en la demanda de productos de etapas iniciales e intermedias, con el consiguiente efecto en la adopción de tecnologías por parte de los productores agrícolas. Por ejemplo, la disminución de los costos de elaboración de los tomates en conserva puede impulsar la demanda de este producto, lo que serviría de incentivo para que los productores de tomate incrementasen la producción y atendieran la creciente demanda mediante la adopción de las tecnologías pertinentes (por ejemplo, variedades mejoradas, equipo de riego, cosechadoras).

Los mayoristas y minoristas, incluidas las microempresas informales, junto con el consumo a nivel de los hogares y servicios de alimentación, constituyen el nodo final en los sistemas agroalimentarios. La automatización en la venta al por mayor, venta minorista, restaurantes y servicios de alimentación ha reducido la necesidad de mano de obra[14] y ha aumentado la productividad y las ventas[15]. El avance tecnológico más importante en el sector de la distribución a nivel mundial ha sido el comercio electrónico[16], que impulsa aún más la innovación tecnológica en etapas anteriores, especialmente las innovaciones centradas en la sostenibilidad, como los embalajes más sostenibles[17] y, en los países de ingresos bajos, la mejora de las infraestructura de transporte, la logística y los servicios en línea[18, 19, 20]. En la India, el auge de las plataformas de comercio electrónico ha permitido a los agricultores conectarse con mercados más amplios y lograr precios más altos[21]. En China, una selección de estudios de casos muestra cómo el comercio electrónico en zonas rurales está creando oportunidades de diversificación y nuevos mercados para las personas y comunidades rurales en diversas partes del país, incluidos grupos vulnerables como las mujeres y los jóvenes[22]. ■

REPERCUSIONES LABORALES DE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

La automatización puede afectar a la producción agrícola y las oportunidades de empleo decente de diversas formas. En la producción de cultivos, se hace posible ampliar las tierras cultivadas o mejorar el rendimiento por hectárea, lo que a su vez aumenta la producción. En el ámbito de la producción ganadera, la automatización puede mejorar la productividad de la mano de obra y reducir de forma considerable el trabajo pesado al permitir que los trabajadores ordeñen o alimenten sus animales con una intervención manual mínima. Un razonamiento similar se puede aplicar a la pesca, la acuicultura y la actividad forestal (véase el Capítulo 2); en el caso de la actividad forestal, la mejora de la seguridad de los trabajadores supone un beneficio adicional importante que impulsa la automatización. Todos estos beneficios pueden tener como resultado un aumento significativo del bienestar. Si la automatización implica grandes economías de escala, la adopción generalizada entre grandes productores puede a veces dejar fuera del negocio a productores más pequeños y precipitar la consolidación en el sector de la

RECUADRO 19 ANALIZAR LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA DESDE LA PERSPECTIVA DEL EMPLEO DECENTE

Por empleo rural decente se entiende cualquier actividad, ocupación, trabajo, negocio o servicio realizado por mujeres y hombres, adultos y jóvenes, a cambio de remuneración o beneficios, en las zonas rurales que[23]: i) respeta las normas fundamentales del trabajo tal como se definen en los convenios de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) (por ejemplo, contra el trabajo infantil, el trabajo forzoso y la discriminación y con garantía de libertad para negociar); ii) proporciona un ingreso vital adecuado; iii) asegura un grado adecuado de seguridad y estabilidad en el empleo; iv) adopta medidas de seguridad y salud; v) evita el exceso de horas de trabajo, y vi) promueve la capacitación.
Para analizar la automatización agrícola desde la perspectiva del empleo decente, es necesario examinar sus repercusiones en los ámbitos siguientes:

Trabajo infantil. Según un reciente estudio empírico que abarca siete países en desarrollo, el uso de tractores (y de cosechadoras combinadas en la India) disminuye entre un 5 % y un 10 % la probabilidad de empleo infantil, al tiempo que mejora la asistencia escolar de los niños. Sin embargo, en los lugares en que el acceso a la educación es limitado, la introducción de maquinaria agrícola puede simplemente derivar en que los niños pasen de realizar actividades de trabajo agrícola a no agrícola[24].

Ingresos adecuados para vivir. En ciertas situaciones, la automatización puede contribuir a mejorar los ingresos, los medios de vida, la rentabilidad y las oportunidades laborales[25, 26]. Por ejemplo, en Uganda, los teléfonos móviles se asocian con un aumento positivo de los ingresos familiares y la igualdad de género gracias a la mejora del acceso a los mercados, los servicios y la información[27].

Seguridad y salud ocupacionales. Las nuevas tecnologías pueden reducir el trabajo pesado y los riesgos para la salud, por ejemplo mediante la disminución del uso de herbicidas y plaguicidas[28].

Horarios de trabajo reducidos. El ahorro de tiempo derivado de la automatización agrícola puede dejar más tiempo para el descanso y actividades recreativas. Esto también puede ofrecer a los pequeños productores la oportunidad de dedicarse a trabajos no agrícolas, lo que generará mayor estabilidad en materia de ingresos y contribuirá a lograr medios de vida resilientes.

agricultura. A medida que la demanda de mano de obra agrícola disminuye y las nuevas tecnologías hacen que algunas habilidades queden obsoletas, la automatización puede desplazar a los trabajadores, especialmente los más pobres, que tal vez tengan dificultad para encontrar empleo en otra parte. Deben establecerse políticas, leyes e inversiones apropiadas para evitar, mitigar o abordar los efectos sociales negativos, sobre todo para los más vulnerables.

En las siguientes secciones se consideran los efectos que la automatización agrícola tiene para el empleo en los sistemas agroalimentarios en diferentes contextos. En el presente informe se analiza la repercusión de la automatización agrícola desde la perspectiva particular del empleo rural decente, que se define como el trabajo que proporciona ingresos para vivir y condiciones laborales razonables. En el Recuadro 19 (pág. 72) se exponen los estándares de empleo decente que se utilizarán para evaluar la repercusión de las tecnologías de automatización agrícola.

Las repercusiones en el empleo de la automatización agrícola son difíciles de medir, pues normalmente implican cambios en las distintas actividades de producción agrícola, así como cambios en etapas iniciales derivados de la demanda variable de insumos y cambios en etapas finales que afectan al transporte y la logística, la elaboración, la distribución y la venta minorista. A medida que la transformación agrícola evoluciona, las personas abandonan la agricultura en busca de trabajos mejor remunerados y continúa el descenso de la proporción de personas empleadas en la agricultura, como se describe en el Capítulo 1 (véase la Figura 3 en la pág. 9). El proceso reconfigura la oferta y la demanda de mano de obra en todos los sistemas agroalimentarios, ya que afecta a la producción, la elaboración y la distribución de alimentos y otros productos agrícolas. Cuando todos los nodos en los sistemas agroalimentarios cambian más o menos de forma simultánea, resulta difícil, si no imposible, atribuir repercusiones sociales —tales como cambios en el empleo decente e implicaciones relativas al

género, los jóvenes y los pequeños productores— a hechos concretos de la automatización agrícola. Entender la transformación de los sistemas agroalimentarios es un paso fundamental para comprender sus repercusiones sociales, especialmente en el empleo. Cabe señalar que en este capítulo no se incluyen los posibles efectos *indirecto*s de la adopción de automatización (por ejemplo, el aumento de la demanda de investigadores y científicos para desarrollar y mejorar las tecnologías), ni se consideran las posibles implicaciones en la economía en general, que también pueden tener importantes repercusiones sociales. Cómo se manifiesta en la realidad el amplio conjunto de repercusiones finales posibles sigue siendo una cuestión empírica y dependerá de las circunstancias específicas en los diferentes países y sociedades.

La Figura 7 (pág. 69) contribuye a representar dos aspectos principales. En primer lugar, los efectos posibles de la automatización agrícola son múltiples y es probable que las repercusiones en el empleo agrícola sean diversas. La demanda de mano de obra poco cualificada, ya sea mano de obra familiar o contratada, probablemente disminuya al automatizarse numerosas tareas. La automatización de algunas tareas puede solucionar los problemas de limitación de mano de obra, permitiendo que la producción aumente, bien por expansión horizontal o por intensificación. Es posible que la automatización aumente la demanda de trabajadores relativamente cualificados que complementen las nuevas tecnologías. En segundo lugar, los efectos generales de la automatización agrícola en el empleo decente dentro de los sistemas agroalimentarios probablemente sean muy diferentes de los efectos en cada centro de negocio agrícola. La automatización podría reducir fácilmente el empleo estacional de bajos salarios en las explotaciones y aumentar el empleo menos estacional de salarios más altos en las etapas iniciales y finales. La pregunta es si las repercusiones sociales positivas del aumento del trabajo menos temporal con mejor salario compensan los efectos negativos de la menor disponibilidad de empleo estacional de bajo salario para los trabajadores, permitiendo que estos últimos encuentren alternativas de empleo.

La estacionalidad laboral supone una preocupación en el sector agrícola en todo el mundo. Las actividades de producción de cultivos y ganadera son intrínsecamente estacionales. Esto quiere decir que el desempleo y el subempleo tienden a ser altos en algunas temporadas, mientras que en otras puede haber un déficit importante de mano de obra. Para un productor agrícola, no tener acceso a mano de obra en momentos críticos, por ejemplo, durante la cosecha o el esquileo, puede tener importantes consecuencias para las actividades agrícolas y dar lugar a pérdidas o desalentar totalmente el cultivo. La automatización que alivia el exceso de demanda de mano de obra durante algunas temporadas podría, en teoría, mantener el empleo en otras. Esto hace que surjan preguntas importantes. ¿Qué labores agrícolas son más fáciles de automatizar y en qué temporadas? ¿Coinciden con la escasez de mano de obra que afrontan las explotaciones? Por otro lado, ¿cuáles son las repercusiones para los trabajadores más pobres no cualificados que se ven sin trabajo una vez que las empresas empiezan a automatizarse y cuyas competencias quedan obsoletas? ¿Qué políticas pueden asegurar un proceso de automatización más productivo, eficiente, sostenible e inclusivo?

Para la mayoría de cultivos que requieren mano de obra intensiva, esencialmente frutas y hortalizas, las labores que se realizan en las temporadas de más escasez de mano de obra suelen ser las más difíciles de automatizar por los daños que la maquinaria pudiera ocasionar a las plantas o frutas. A modo de ejemplo, cabe examinar la automatización en las zonas agrícolas más ricas, donde los salarios agrícolas son relativamente altos y las soluciones de automatización están más disponibles. En California (Estados Unidos de América), la preparación del suelo se ha mecanizado de forma generalizada, en particular la arada, la labranza y la nivelación del terreno. La cosecha de cultivos para fines de elaboración, por ejemplo tomates o uvas de vino, está automatizada. Sin embargo, la recolección de frutas y hortalizas frescas para consumo final sigue dependiendo del trabajo manual y es más difícil de automatizar, aunque se perfilan en el horizonte soluciones robóticas de recogida de la cosecha, incentivadas por la escasez de recolectores y el rápido aumento de los salarios.

Estas nuevas oportunidades de empleo son aptas para muchos tipos de trabajadores. Los empleos de conductor, almacenista, operador de maquinaria y mecánico requieren poca formación académica, pero experimentan diferencias en cuanto a la remuneración, la seguridad en el empleo y las competencias necesarias[29, 30]. Estos empleos también pueden ser estacionales, especialmente en las pequeñas empresas de elaboración, pero pueden ser estables si los ofrecen grandes empresas comerciales de elaboración. En ambos casos son menos estacionales que los trabajos de campo en la agricultura. Son desempeñados en su gran mayoría por hombres[31, 32]. Los trabajos de empleado administrativo, vendedor y especialista que requieren más formación académica, capacitación y experiencia son los mejor pagados y habitualmente registran una proporción más alta de mujeres empleadas[33].

Implicaciones para los pequeños productores y los productores de subsistencia

Las implicaciones en la demanda de mano de obra dependen del tipo de trabajo y la producción. Los productores de subsistencia gestionan sus unidades de producción mediante mano de obra familiar. Suelen ser pobres, padecer una situación de inseguridad alimentaria y tener acceso limitado a los mercados y servicios[34]. En el Estado Plurinacional de Bolivia, hasta un 83 % de los pequeños productores son pobres, en comparación con el promedio nacional de pobreza que se sitúa en torno al 61 %. En Etiopía, donde el 30 % de la población vive por debajo del umbral de pobreza del país, la tasa de incidencia de la pobreza para los pequeños productores asciende al 48 %. En Viet Nam, más de la mitad de los pequeños productores son pobres, mientras que en el conjunto del país solo un 20 % de la población vive en situación de pobreza. En tales condiciones, la tasa de pobreza más alta que se registra entre quienes trabajan en la agricultura viene provocada, al menos en parte, por las bajas tasas de productividad, ya que sobreviven gracias a una agricultura de subsistencia o prácticamente de subsistencia. Si estas explotaciones adoptan la automatización, pueden aumentar su productividad y mejorar los ingresos y los medios de vida mediante la ampliación de la producción y podrían llegar a convertirse en explotaciones familiares comerciales. Por ejemplo, la disponibilidad de tractores para explotaciones familiares en pequeña escala en Zambia permitió que los productores duplicaran con creces sus ingresos, sobre todo mediante el aumento de las tierras cultivadas y la aplicación de más insumos (principalmente fertilizantes), lo que incrementó el rendimiento un 25 %[35]. La adopción de la automatización puede liberar tiempo para dedicarlo a otras actividades como la educación de los hijos y acarrear beneficios económicos a largo plazo para los hogares. También puede posibilitar que los miembros del hogar busquen trabajo en actividades no agrícolas, si las hay.

La automatización agrícola puede asimismo dar acceso a mercados de mayor valor y permitir que los hogares agrícolas firmen contratos con supermercados o compradores extranjeros, siempre que la calidad y la cantidad de los productos sean constantes. La participación en estos mercados de alto valor puede aportar beneficios significativos en materia de bienestar para los hogares agrícolas. En Kenya, los contratos de los supermercados con pequeños productores de hortalizas aumentaron los ingresos de los hogares agrícolas en más de un 40 % y dieron lugar a la mayor reducción de las medidas multidimensionales de la pobreza para los hogares más pobres[36]. En los hogares agrícolas que suministran productos a los supermercados también se ha registrado un consumo considerablemente mayor de calorías, vitamina A, hierro y zinc[37].

Incluso en otras regiones de África, donde la mano de obra es relativamente abundante y las tasas de fecundidad son altas, hay datos que demuestran que la falta de mano de obra agrícola limita la producción. Así pues, la automatización brinda la posibilidad de mejorar la producción y los ingresos de los hogares. Un estudio de datos relativos a las explotaciones obtenidos de cuatro países en África oriental y meridional justifica las iniciativas actuales encaminadas a mecanizar la agricultura en África, pues la mano de obra y otras fuentes de energía agrícola parecen ser factores importantes que limitan la productividad agrícola en la región[38].

Muchos de los beneficios que puede aportar la automatización agrícola no son ni inmediatos ni automáticos. Los pequeños productores y los agricultores de subsistencia carecen de

RECUADRO 20 LAS REPERCUSIONES EN LA MANO DE OBRA DE LA COSECHA MECANIZADA DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL BRASIL

En el Brasil, se elaboraron una serie de leyes y reglamentos para prohibir la quema previa a la cosecha de caña de azúcar a partir de 2020 por motivos ambientales. Esta medida puso fin a la cosecha manual, que conllevaba la quema de caña de azúcar antes de la cosecha, e hizo que los productores de caña invirtieran cada vez más en motorizar su cosecha. Aunque esta legislación ha aportado beneficios para el medio ambiente por lo que se refiere a la disminución de la contaminación y ha aumentado la productividad, se estimó que reduciría entre un 52 % y un 64 % la mano de obra que trabajaba directamente en la producción de caña de azúcar. Los trabajadores menos cualificados, que no superaban los tres años de estudios, serían los más gravemente afectados, en tanto que estaba previsto un aumento de la demanda de mano de obra especializada en el sector. Estos cambios en el empleo requieren medidas públicas inmediatas para proteger a los más vulnerables de los efectos negativos de la automatización.

FUENTE: Guilhoto *et al.*, 2002[39].

competencias de gestión y técnicas para aprovechar las oportunidades que ofrece la automatización agrícola. Deben asimismo actualizar y modernizar sus modelos de negocio para adaptarse a las normas y exigencias de los mercados. Este aspecto pone de relieve la importancia de fomentar la capacidad y establecer sistemas de asesoramiento rural eficaces que puedan garantizar el acceso oportuno a información sobre tecnologías y mercados (véase el Capítulo 5).

Implicaciones para la producción comercial en mediana y gran escala

Las unidades de producción comercial de tipo familiar pertenecen a familias y son explotadas por mano de obra familiar, pero también pueden utilizar la contratación de mano de obra, por ejemplo, trabajadores agrícolas asalariados, capataces, contratistas. La automatización puede reducir la demanda de los tres tipos de mano de obra, pero puede lograr también que los productores amplíen su actividad. Si los productores comerciales familiares optan por la expansión hacia una agricultura comercial empresarial, es muy probable que la mano de obra familiar sea reemplazada por profesionales contratados, en particular administradores, comerciales, operadores de maquinaria y mecánicos. Si, como sucede a menudo, la adopción de tecnologías viene alentada por el aumento de salarios y la escasez de mano de obra, la automatización agrícola tenderá a aumentar la productividad laboral y los salarios, en cuyo caso la automatización podría mejorar el bienestar tanto de los productores como de los trabajadores contratados. Sin embargo, la automatización también puede desplazar a los trabajadores, sobre todo a los más pobres y menos cualificados, que se verán obligados a buscar trabajo en otra parte, lo que posiblemente ejerza una presión a la baja en los sueldos de la mano de obra no cualificada ya que su conjunto de competencias dificulta que se encuentren otros trabajos (véase el Recuadro 20). Otra posibilidad es que las explotaciones de subsistencia abandonen por completo la agricultura debido a la adopción de tecnologías por parte de las explotaciones comerciales, lo que se denomina concentración parcelaria. En estos casos, debe disponerse de políticas, legislación e inversiones que garanticen que los productores de subsistencia y en pequeña escala, así como los trabajadores poco cualificados, no se queden atrás, sino que puedan obtener beneficios de la automatización agrícola. Podría ser necesario ofrecer protección social y capacitación específicas durante la transición.

Las explotaciones comerciales de tipo empresarial dan empleo a todo tipo de mano de obra, salvo mano de obra familiar. Estas explotaciones son las más avanzadas y, por lo general, presentan un nivel importante de automatización. Suelen contar con economías de escala y el capital necesario para invertir en más tecnologías robóticas que pueden

RECUADRO 21 LA AUTOMATIZACIÓN Y LAS COMUNIDADES RURALES DE EMIGRANTES: EL CASO DE CALIFORNIA

A medida que se amplía la producción de cultivos mientras la oferta de mano de obra agrícola interna disminuye, los países buscan nuevas fuentes de mano de obra agrícola por conducto de la inmigración. Por ejemplo, en California (Estados Unidos de América), más del 90 % de la fuerza de trabajo agrícola está formada por inmigrantes. La dependencia de trabajadores agrícolas extranjeros es universal en los países de ingresos altos de hoy en día. Puede parecer que la automatización afectaría negativamente a las comunidades de origen de migrantes. Sin embargo, la automatización agrícola en California no surge de la nada. En México, de donde procede la mayoría de los inmigrantes, las tasas de fecundidad están disminuyendo, el nivel de asistencia escolar se está incrementando considerablemente y el acceso a trabajos no agrícolas está aumentando, lo que reduce la oferta de mano de obra rural. La construcción de escuelas de enseñanza secundaria en zonas rurales de México está extendiendo la educación a niños y niñas que de lo contrario buscarían empleo en la agricultura, acelerando así la transformación agrícola. De hecho, las personas que tienen un mayor nivel de estudios tienen más probabilidades de trabajar en el sector no agrícola, incluso cuando emigran[44]. Como resultado, la oferta de mano de obra agrícola se ha reducido significativamente en California; entre 2008 y 2018, los salarios agrícolas aumentaron un 18 % más rápido que los salarios no agrícolas.

Antes de que la oferta de mano de obra agrícola mexicana disminuyera en la década de 1990, apenas había incentivos para adoptar y desarrollar nuevas tecnologías que permitieran ahorrar mano de obra en California. En la actualidad, en ambos países, hay una carrera entre la automatización y el descenso de la fuerza de trabajo agrícola. El proceso de automatización suele comenzar con las actividades que requieren más mano de obra y son más fáciles de automatizar, pero a medida que se desarrollan y comercializan soluciones más avanzadas, los Estados Unidos de América, en particular, están empezando a automatizar actividades más complejas como la recolección de frutas y hortalizas.

FUENTES: Charlton, Hill y Taylor, 2022[3]; Taylor y Charlton, 2018[45].

reducir considerablemente la demanda de mano de obra agrícola, lo que podría acarrear consecuencias negativas para los trabajadores, en particular los trabajadores poco cualificados, o cambiar el tipo de mano de obra necesaria en la explotación. Por ejemplo, con la automatización digital, un antiguo tractorista puede supervisar un enjambre de máquinas agrícolas autónomas o reciclarse para llevar a cabo reparaciones. Sin embargo, los robots no suelen ser económicamente viables para la mayoría de explotaciones, a menos que escasee la mano de obra. A modo de ejemplo, aunque las tecnologías de ordeño robotizado llevan muchos decenios explotándose comercialmente, pocas explotaciones lecheras en los Estados Unidos de América las han adoptado, ya que la mano de obra agrícola sigue siendo relativamente económica[40]. Por su parte, en Europa occidental se llevan utilizando a nivel comercial desde la década de 1990.

En general, si se adoptan tecnologías de automatización donde no hay escasez de mano de obra, pero se hace como consecuencia de un abaratamiento artificial de su costo, por ejemplo gracias a subvenciones públicas, existe el riesgo de que los trabajadores se vean desplazados y se genere desempleo. El desplazamiento de mano de obra puede resultar costoso para los trabajadores agrícolas; la repercusión global dependerá de si pueden cambiar a los nuevos trabajos que se generen en las etapas iniciales y finales (véase la Figura 7 en la pág. 69). Por otra parte, la adopción de tecnologías agrícolas motivada por el alza de los salarios y la creciente competencia por la escasa mano de obra probablemente aumente los salarios así como la productividad global, beneficiando tanto a los productores como a los trabajadores contratados.

La automatización en las explotaciones agrícolas de países de ingresos altos o sus regiones podría tener efectos negativos en las remesas que los migrantes envían a países y regiones más pobres. Si la demanda de trabajadores agrícolas migrantes poco cualificados disminuye, esto

podría aumentar el nivel de desempleo en los países y regiones de origen de los migrantes, además de reducir los flujos de remesas[41]. En el Brasil, la automatización de la cosecha de café ha reducido significativamente la demanda de mano de obra poco cualificada, sobre todo migrantes internos procedentes de zonas más pobres del país, pero ha aumentado la demanda de trabajadores especializados[42]. Esta situación requiere políticas sociales inmediatas e inclusivas que ayuden a los trabajadores no cualificados que pierdan su trabajo para que puedan encontrar empleo en otra parte.

La automatización parece en muchos casos producirse en un contexto de disminución de la mano de obra agrícola y aumento de los salarios en zonas de emigración. En el Recuadro 21 se proporciona un ejemplo de cómo la automatización agrícola en los Estados Unidos de América se ve impulsada por una escasez de mano de obra cada vez mayor en las comunidades de emigrantes de México. En otro estudio realizado en los Estados Unidos de América se observó que la automatización de los invernaderos aumentaba los ingresos brutos de los negocios hortícolas, permitiéndoles pagar salarios más altos y retener durante más tiempo a los trabajadores migrantes, además de contratar menos trabajadores nuevos especializados[43]. ■

LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA BRINDA NUEVAS OPORTUNIDADES EMPRESARIALES Y TRANSFORMADORAS QUE TIENEN IMPLICACIONES EN LA NUTRICIÓN Y LOS CONSUMIDORES

Los adelantos en automatización agrícola pueden crear nuevas oportunidades empresariales, como por ejemplo oportunidades relacionadas con la agricultura orgánica y los productos botánicos con valiosas propiedades aromáticas, medicinales y nutricionales. Pueden también contribuir a la recuperación de cultivos tradicionales ricos en nutrientes que eran difíciles de mecanizar. Esto está empezando ya a ocurrir en algunos países de ingresos altos. En Francia, en 2018, se emplearon 150 robots para el deshierbe de hortalizas orgánicas y remolacha azucarera[46]. En un país en el que una de las principales limitaciones para la agricultura orgánica o biodinámica son los elevados costos de mano de obra, la utilización de máquinas autónomas de deshierbe para eliminar las malas hierbas e IA para detectar enfermedades de las plantas permite una rápida expansión de la producción orgánica, que puede hacer disminuir los precios de los productos orgánicos de forma sustancial. Se trata de buenas noticias para los consumidores que prefieren comprar productos orgánicos, pero no se pueden permitir los elevados precios actuales[47].

Otro ejemplo es el maíz. Al mecanizarse la producción de maíz, se desarrollaron híbridos cuyas mazorcas estaban casi a la misma altura para facilitar la cosecha mecánica. Sin embargo, el proceso de fitomejoramento resultó en la pérdida de algunos valores nutricionales y culinarios. No obstante, ahora es posible recuperar estos valores, ya que las máquinas autónomas con IA son capaces de cosechar variedades de maíz tradicionales, más sabrosas y más nutritivas, cuyas mazorcas están a diferente altura. De igual forma, para la mecanización de la recogida del tomate fueron necesarias variedades que madurasen de manera uniforme, pero este proceso provocó la pérdida de valor nutricional y sabor. La recogida selectiva con máquinas autónomas logró permitir la producción comercial de variedades autóctonas tradicionales de gran sabor[47].

Además de las oportunidades empresariales antes mencionadas, la automatización puede ofrecer más noticias buenas a los consumidores, ya que brinda la posibilidad de producir alimentos de menor costo. El principal riesgo desde la perspectiva de los consumidores es que la automatización estimula la concentración en el sector alimentario, dando lugar a que un pequeño número de grandes corporaciones ocupen una posición dominante; estas fijan luego precios monopolísticos que perjudican a los consumidores y reducen la producción a niveles poco óptimos desde un punto de vista social. Por otro lado, las corporaciones cuentan con economías de escala y, por tanto, pueden producir

bienes a costos más bajos que los competidores más pequeños. Si se puede evitar una concentración excesiva, los consumidores podrían incluso tener mejores condiciones que en un mercado perfectamente competitivo formado por muchos pequeños productores. En el Gran Los Ángeles, en los Estados Unidos de América, a diferencia de los pequeños comerciantes minoristas de alimentos, los supermercados no suben los precios en función de la concentración del mercado o el aumento de las cuotas de mercado. La competencia entre supermercados les impide establecer precios monopolísticos y así los consumidores perciben los beneficios de la reducción de costos relacionada con el incremento de la eficiencia derivado de las economías de escala[48]. Las políticas que favorecen la competencia en los mercados son fundamentales para limitar la consolidación empresarial y proteger el bienestar del consumidor[3].

Existe el riesgo de que, si las tecnologías de automatización no son neutrales en cuanto a la escala, los pequeños productores y elaboradores se puedan ver forzados a retirarse del negocio al carecer de las economías de escala necesarias para seguir siendo competitivos. No obstante, este no tiene que ser un resultado de introducir la automatización digital en la agricultura. Para evitar esta fatalidad, es preciso que una automatización digital de bajo costo (esto es, neutral respecto de la escala) y gran eficacia llegue a estar tan extendida como la telefonía móvil. Con la infraestructura digital y el entorno jurídico, regulador y cultural adecuados, existe gran potencial para un desarrollo económico rural sostenible basado en una agricultura intensiva, pero sostenible. Si los países —y en particular los países de ingresos bajos y medianos— ganan o pierden con la automatización agrícola dependerá de cómo gestionen esta transición. Aquellos países que creen la infraestructura física, económica, jurídica y social necesaria para la automatización digital podrán beneficiarse. Los países que ignoren el desafío podrían perder el empleo agrícola manual de bajos salarios que tienen ahora, sin desarrollar oportunidades agrícolas de salarios más altos basadas en la automatización. Los antecedentes sugieren que la cooperación internacional es crucial para prepararse para la transición; no obstante, la voluntad política de reconocer estas oportunidades y adoptar medidas en consonancia no es menos esencial[3, 47, 49]. ■

UN PROCESO INCLUSIVO DE AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

El presente informe ve en la automatización agrícola tanto una oportunidad como una responsabilidad de incluir a quienes sufren un mayor grado de vulnerabilidad, exclusión y marginación a través de sus medios de vida en los sistemas agroalimentarios. Entre estos figuran pequeños productores, pastores, pescadores y silvicultores y comunidades forestales en pequeña escala, trabajadores agrícolas asalariados, microempresas y trabajadores informales, personas sin tierra y migrantes[2].

Estas personas se encargan de una gran parte de la producción de alimentos y son custodios de recursos naturales y biodiversidad. Pese a ello, siguen estando marginados, carecen de un acceso equitativo a los recursos, no tienen derechos de tenencia de la tierra, no participan en los procesos de formulación de políticas y toma de decisiones y se ven afectados de forma desproporcionada por el cambio climático y fenómenos climáticos extremos. Son los más expuestos a carecer de alimentos inocuos y nutritivos, recursos, mercados, servicios públicos y sociales básicos, infraestructura, herramientas y tecnologías, protección social y oportunidades de generación de ingresos[2]. Abordar los múltiples obstáculos y limitaciones que afrontan estos agentes es esencial para lograr un proceso de automatización agrícola inclusivo, que dé lugar a una agricultura en pequeña escala sostenible, resiliente, productiva y eficiente.

La pobreza y la pobreza extrema deberían ser un objetivo clave de este proceso, ya que abarca todos los grupos de población antes mencionados. Cuatro de cada cinco personas que viven por debajo del umbral internacional de la pobreza residen en zonas rurales y dependen, al menos en parte, de los sistemas agroalimentarios para obtener sus medios de vida[50]. La mayoría se ven privados de muchos aspectos del bienestar y derechos humanos fundamentales tanto individuales como colectivos. Los marcos jurídicos desempeñan una importante función para garantizar que se reconozcan, se protejan y se promuevan los derechos humanos de todos.

RECUADRO 22 INCLUSIÓN DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD

Las personas con discapacidad suelen verse excluidas de los procesos de desarrollo sobre la base de las discapacidades psicosociales, físicas o sensoriales e intelectuales, lo que impide un acceso justo y equitativo a oportunidades sociales y económicas. La discapacidad se puede deber a la pobreza, la inseguridad alimentaria y la malnutrición, en tanto que las personas con discapacidad presentan un riesgo mayor de pobreza, hambre y malnutrición. La agricultura es uno de los tres sectores más peligrosos para trabajar, con exposición a una gran variedad de riesgos, largas horas y condiciones laborales deficientes, sin que haya muchas veces unas políticas o legislación adecuadas en materia de seguridad y salud en el trabajo.

La automatización puede contribuir a garantizar oportunidades de trabajo decente que eliminan riesgos laborales y rompen la relación entre la pobreza, la malnutrición y la discapacidad. La inclusión de personas con discapacidad también puede conllevar lo siguiente: i) adaptar y mejorar las tecnologías de automatización agrícola actuales, o desarrollar otras nuevas, que atiendan sus necesidades especiales, mediante medios alternativos de comunicación (por ejemplo, impresión en gran tamaño, braille, lengua de signos) y utilizar formatos de imágenes, audios (grabaciones en cintas o discos) y electrónicos, y ii) reforzar las competencias técnicas de las personas con discapacidad en el sector de la agricultura y los sistemas agroalimentarios más amplios.

Es particularmente importante facilitar que los jóvenes con discapacidad sean independientes y activos. La FAO ha aprovechado sus escuelas de campo y de vida para jóvenes agricultores con el fin de abordar la brecha en cuanto al acceso a educación, así como el estigma y la falta de oportunidades económicas que afrontan las personas con discapacidad, basándose en tecnologías innovadoras. Esto conlleva una metodología simple, pero eficaz, para educar a niños y jóvenes vulnerables sobre la agricultura, incorporando al mismo tiempo aptitudes para la vida.

FUENTE: FAO, 2022[2, 51].

Los gobiernos deberían incluir medidas para representar a los grupos marginados y vulnerables, como por ejemplo los pueblos indígenas y las personas con discapacidad, en la toma de decisiones; determinar los efectos potencialmente desfavorables de la automatización en los derechos humanos, sobre todo los de estos grupos; aplicar medidas especiales para prevenir, erradicar o mitigar los efectos negativos de la automatización.

El género y la juventud son otros dos temas de importancia crucial para la inclusión. Dentro del Marco estratégico de la FAO para 2022-2031, el género y la juventud se tratan como temas transversales independientes a fin de poner de relieve su importancia y velar por que estos programas reciban especial atención[2]. Las políticas, la legislación y las inversiones deberían garantizar enfoques de seguimiento basados en los derechos humanos, incluida la recopilación de datos desglosados para medir los efectos en los medios de vida, derechos y oportunidades de los jóvenes y las mujeres. El género y la juventud se examinan por separado en las secciones siguientes. Hay también muchos otros que se ven excluidos y marginados de la automatización agrícola por motivos de raza, sexo, pobreza y condición socioeconómica, idioma, origen étnico, religión, edad, discapacidad, casta u otros motivos. Los pueblos indígenas y las personas con discapacidad son un caso concreto (véase el Recuadro 22 en la pág. 79).

Implicaciones en materia de género de la automatización agrícola

Las repercusiones en materia de género de la automatización en las explotaciones agrícolas son complejas y diversas. Dependen de la distribución previa por género para la realización de las tareas agrícolas manuales que se acaban de automatizar y de la división de la mano de obra entre géneros en los sistemas agroalimentarios, así como dentro de los hogares (por ejemplo, la distribución de los bienes). En muchos lugares, existen divisiones por sexos bastante rígidas en las explotaciones agrícolas. Por ejemplo, en Marruecos, el cultivo de flor de Crocus, de la que se extrae el azafrán, es una actividad predominantemente masculina, mientras que la

RECUADRO 23 INCLUSIÓN DE MUJERES Y JÓVENES: DATOS OBJETIVOS PROCEDENTES DE ESTUDIOS DE CASOS

En varios de los estudios de casos del Capítulo 3 se presta especial atención al empoderamiento de las mujeres y los jóvenes a través del desarrollo de tecnologías. Entre algunos ejemplos exitosos figuran los proveedores de servicios siguientes:

Igara Tea. Aproximadamente un 18 % de los usuarios son mujeres, de las que un 4 % son cabeza de familia. En el plano de las explotaciones agrícolas, el 65 % de la fuerza de trabajo son jóvenes. En la elaboración de las hojas de té, las mujeres y los jóvenes constituyen más de la mitad del total de mano de obra.

TraSeable Solutions. Las mujeres y los jóvenes representan aproximadamente un 40 % y un 15 % de los usuarios registrados, respectivamente.

Tun Yat. Aproximadamente un 30 % de los usuarios son mujeres y entre el 25 % y el 30 % son jóvenes de menos de 30 años. Esto también es consecuencia de la migración masculina interna, donde los hombres se desplazan a las zonas urbanas para trabajar, dejando que las mujeres realicen las tareas agrícolas. Al centrarse en el empleo de mujeres y jóvenes (locales), Tun Yat incentiva el empoderamiento de la mujer en las zonas rurales. La empresa emplea mujeres y jóvenes en la elaboración de alimentos y la inocuidad de los alimentos, y para trabajar como operadores y mecánicos de tractores.

FUENTE: Ceccarelli *et al.*, 2022[54].

elaboración de las flores, que supone una labor tediosa e intensiva en mano de obra, es realizada casi exclusivamente por mujeres[52]. Así pues, la automatización del cultivo de flores liberaría sobre todo mano de obra masculina. Asimismo, si diese lugar a la expansión de la producción de flores, se produciría un aumento de la demanda de mano de obra femenina. Aunque estas podrían ser noticias positivas para las trabajadoras asalariadas, son malas noticias para la mano de obra femenina familiar.

En un estudio de casos en Zambia, los hombres y las mujeres compartían tareas que requieren mucha mano de obra, como por ejemplo el deshierbe. Cuando se empezaron a usar servicios de tractores para la preparación de la tierra, el cultivo aumentó, pero esto no supuso una carga adicional desproporcionada para las mujeres o los niños. Al contrario, la totalidad de miembros de los hogares pudo disfrutar de más tiempo libre[35]. Otros datos de África oriental y meridional muestran que, en muchos casos, la mecanización de la preparación de la tierra sustituye mano de obra tanto masculina como femenina —pero especialmente femenina, pues las mujeres son las principales encargadas del deshierbe, que es un trabajo considerablemente pesado[38]. En Kenya occidental, la adopción de la mecanización motorizada también hizo que hombres y mujeres dispusieran de más tiempo libre y los hogares pudieron aumentar su inversión en la educación de los hijos[53]. Estos ejemplos subrayan cómo la evaluación de los efectos de la automatización en las mujeres debe incluir la comprensión de las funciones específicas de cada sexo; es importante no hacer generalizaciones poco fundadas acerca de que la automatización beneficia únicamente a los hombres solo porque esta automatiza principalmente las actividades que estos realizan. En el Recuadro 23 pueden verse otros ejemplos satisfactorios de tecnologías de automatización agrícola utilizadas por mujeres y jóvenes.

A pesar del potencial de la automatización en las explotaciones para aliviar la carga de tiempo y trabajo de las mujeres, mejorando a la vez la productividad, los ingresos y el bienestar, las investigaciones indican que las mujeres van por detrás de los hombres en la adopción de tecnologías agrícolas debido a los obstáculos para acceder a capital, insumos y servicios (información, extensión, crédito, fertilizantes), las limitaciones de accesibilidad física y las normas culturales[55].

RECUADRO 24 MUJERES AL VOLANTE: PROMOVER EL EMPODERAMIENTO DE LAS MUJERES MEDIANTE TRACTORES

El programa de capacitación sobre tractores Mujeres al volante pretende derribar las barreras que existen para las mujeres en la automatización agrícola, un ámbito tradicionalmente dominado por los hombres. El objetivo de este programa de capacitación consiste en impulsar de forma sostenible la participación y el liderazgo de las mujeres en el manejo de maquinaria agrícola en Ghana.

Como resultado del programa, 182 operadoras de tractor han obtenido su certificación desde 2018. La exitosa tasa de finalización ha demostrado que las mujeres pueden sobresalir en el manejo y mantenimiento de tractores. Las tituladas crearon la Asociación de mujeres en el manejo de tractores para organizarse y apoyarse entre ellas.

La participación de las mujeres en la automatización ha ayudado a cambiar la mentalidad, no solo de las mujeres, sino de los profesionales, los empleadores y la sociedad en general. Estas nuevas trabajadoras contribuyen ahora a la seguridad de un entorno familiar estable y toman decisiones esenciales para los hogares sobre recursos e ingresos. La actividad ha fomentado así la igualdad de género en el lugar de trabajo y en el hogar.

FUENTE: GIZ, 2020[56].

A modo de ejemplo, según el Instituto de Gestión y Administración Pública de Ghana, el 78,6 % de las agricultoras en la zona costera no puede acceder a los servicios de tractores[56]. Las mujeres son a menudo incapaces de adoptar tecnologías de automatización y no pueden asumir trabajos que requieren competencias en funcionamiento y gestión de explotaciones agrícolas debido a su nivel más bajo de alfabetización, la falta de herramientas o equipo adecuados, la ausencia de infraestructura y la falta de fondos suficientes para programas de extensión para mujeres[56].

Por lo general son los hombres quienes realizan las transacciones comerciales de servicios de automatización agrícola a nivel de las explotaciones. En consecuencia, son ellos quienes toman las decisiones y controlan los recursos necesarios para invertir en automatización, especialmente capital[56]. El equipo y las herramientas agrícolas suelen diseñarse para adaptarse a las características ergonómicas de los hombres y apenas se presta atención a las de las mujeres[57]. En Bangladesh, las mujeres no utilizan bombas de riego debido a su complejidad tecnológica, la exigencia física para manejarlas y la dificultad de contratar y supervisar trabajadores[58]. Resulta evidente la necesidad de proyectar y proporcionar acceso a tecnologías de automatización que tengan en cuenta las cuestiones de género. De hecho, en un examen reciente de la bibliografía se pone de relieve la necesidad de incorporar, en futuras investigaciones y políticas, las diferencias en cuestión de género relativas al diseño, el fomento y la adopción de las tecnologías de automatización a fin de reducir la carga de trabajo de las mujeres y mejorar los resultados en cuanto al bienestar[55].

Deben superarse estas limitaciones relativas al género para aumentar la productividad, la seguridad y la comodidad y reducir el trabajo pesado como parte del desarrollo sostenible íntegro de la sociedad[57]. Para favorecer la adopción de tecnologías por parte de las mujeres, los responsables de la formulación de políticas y los asociados locales en la ejecución deben asimismo determinar el entorno propicio y fomentar el desarrollo, la difusión y la provisión de servicios de tecnologías que tengan en cuenta las cuestiones de género. Las tecnologías que tienen en cuenta las cuestiones de género son aquellas que se adaptan a las características físicas tanto de hombres como de mujeres[59]. Las políticas, la legislación y las inversiones deberían también fomentar la capacidad y la autonomía de las mujeres, así como la igualdad de género en lo que respecta a la propiedad o el control de activos productivos fundamentales[60]. Las estrategias y medidas específicas que abordan de forma simultánea

las limitaciones a la adopción de tecnologías que afrontan las mujeres en el plano de los hogares, servicios y políticas pueden generar resultados positivos. Los datos obtenidos de Ghana, por ejemplo, demuestran que la provisión de capacitación para las mujeres en nudos de la cadena de valor donde normalmente predominan los hombres puede tener una repercusión positiva no solo en las mujeres sino también en la comunidad en general (véase el Recuadro 24 en la pág. 81)[56].

En un examen de las diferencias de participación entre mujeres y hombres en mercados emergentes para servicios de máquinas segadoras y cosechadoras en Bangladesh también se pone de relieve el potencial de los servicios de alquiler[58]. En concreto, las mujeres se beneficiaron de la gestión y en ocasiones posesión de servicios de maquinaria, así como de las consecuencias directas e indirectas de contratar estos servicios para cosechar sus cultivos. Las iniciativas que promueven servicios de alquiler deberían centrarse en atraer a las mujeres, tanto en calidad de propietarias de negocios como de usuarias de maquinaria.

La participación de los jóvenes rurales: oportunidades y desafíos

Los agricultores jóvenes parecen ser los primeros en acoger la innovación agrícola. Se consideran pues decisivos en el cambio generacional y la transformación agrícola[54]. La automatización agrícola presagia nuevos tipos de empleo que difieren de los empleos tradicionales en el sector de la agricultura, los cuales suelen asociarse con condiciones de trabajo peores, más peligrosas y mal retribuidas. Estos nuevos empleos implican tecnologías innovadoras para las que son necesarias habilidades diferentes a fin de hacer un uso productivo de ellas, dando lugar a salarios decentes y condiciones laborales más seguras.

En un documento reciente sobre la opinión de partes interesadas respecto de temas de gran relevancia para la transformación agrícola en África se señala que, en general, existe un gran optimismo respecto de que la agricultura pueda atraer a los jóvenes, manifestándose de acuerdo con esta afirmación entre un 78 % y un 98 % de las partes interesadas. Sin embargo, una gran parte de los encuestados considera que los jóvenes no participan lo suficiente en los procesos de políticas (entre el 72 % y el 97 %) y una parte significativa señaló que los jóvenes carecían de modelos de referencia en la agricultura (entre el 48 % y el 79 %). Existe asimismo la percepción de que los sistemas educativos no preparan adecuadamente a los jóvenes para el mercado laboral, en particular en Benin (70 %) y Kenya (63 %)[61]. Los trabajos altamente especializados están fuera del alcance de la mayoría de jóvenes rurales[62] y, por tanto, es fundamental que los jóvenes adquieran las competencias necesarias. En las políticas e inversiones públicas debería priorizarse un programa firme en materia de desarrollo del capital humano y fomento de la capacidad que haga especial hincapié en los jóvenes[54]. ■

EL FUTURO DE LA MANO DE OBRA AGROALIMENTARIA

A medida que la automatización destinada a ahorrar mano de obra en las explotaciones agrícolas se expande, la fuerza de trabajo evoluciona. Esta última no solo disminuye, sino que también adquiere más destrezas y es capaz de complementar tecnologías nuevas y de creciente complejidad. Un problema importante que afrontan los países de ingresos altos, medianos y bajos es de dónde provendrá la mano de obra agrícola del mañana y cómo se facilitará su transición de actividades manuales que básicamente requieren poca cualificación a trabajos que implican tecnologías más complejas y sofisticadas, incluidas tecnologías digitales nuevas que probablemente incrementen la demanda de trabajadores especializados en las explotaciones y lleven a un aumento de los salarios[63].

El temor a que los robots para la recolección de cultivos desplacen a millones de trabajadores agrícolas sin otras perspectivas de empleo carece de fundamento sólido. En general, la automatización de los trabajos agrícolas y la evolución de la fuerza de trabajo en las explotaciones suponen procesos graduales y no son iguales en todos los lugares, cultivos y tareas agrícolas. Los incentivos para adoptar métodos que

permiten economizar mano de obra son mayores para tareas específicas que requieren mucha mano de obra y son fáciles de automatizar a bajo costo. Con el tiempo —pero no al mismo tiempo— la oferta de trabajadores agrícolas disminuye en diferentes lugares, lo que guarda estrecha relación con el aumento de los ingresos, la disminución de la fecundidad, el aumento de la educación y el incremento de las oportunidades de empleo fuera de las explotaciones. Así pues, aunque la disminución de la mano de obra agrícola es innegable, se produce de forma desigual en todo el mundo.

Más que expulsar de forma rápida a una gran cantidad de trabajadores, la automatización probablemente continúe realizándose de forma gradual. A medida que la oferta de mano de obra agrícola vaya disminuyendo, se automatizarán algunas tareas mientras que otras seguirán necesitando mucha mano de obra. La visión favorable es que las señales del mercado seguirán orientando el desarrollo y la adopción de técnicas que permitan ahorrar mano de obra y un proceso de automatización gradual desplazará a los trabajadores menos cualificados desde las tareas recién automatizadas hacia otras actividades que resulten más difíciles de automatizar. Con algunas actividades, como por ejemplo la preparación y arada del suelo, la automatización abrirá nuevas tierras, aumentando así la demanda de trabajadores en otras tareas (plantación, deshierbe, aclareo, cosecha) al ampliarse la producción de alimentos.

Esto no significa que en el proceso no haya fricciones; la adopción (o no adopción) de tecnologías que permiten ahorrar mano de obra creará desempleo (o escasez de mano de obra) en algunos momentos y en algunos lugares. Se puede dar una automatización excesiva en caso de haber un avance repentino que otorgue a los agricultores un acceso fácil a tecnologías que ahorran mano de obra, lo que incentivaría la adopción de estas tecnologías incluso cuando los salarios son bajos. Esta situación hipotética es poco probable que se produzca en países de ingresos altos, donde la escasez de mano de obra rural y el aumento de los salarios son ya la norma. En países de ingresos bajos y medianos, sobre todo donde la mano de obra rural es abundante y los salarios son bajos, una automatización excesiva y demasiado rápida podría tener un efecto negativo en los trabajadores de explotaciones agrícolas comerciales, en particular aquellos cuyas competencias han quedado obsoletas por las nuevas tecnologías[3]. En el Recuadro 20 (pág. 75) se muestra un ejemplo de este último caso en el Brasil. De todas formas, la automatización puede todavía mejorar los medios de vida de los pequeños productores, ya que hace posible que los miembros familiares dediquen más tiempo a la educación y las oportunidades de empleo fuera de la explotación y mejora la eficiencia, la productividad y la resiliencia.

Otra situación hipotética es que se produzca muy poca automatización, sobre todo si las políticas públicas crean obstáculos que dificultan la automatización en las explotaciones por considerar que esto conservará los puestos de trabajo en el sector agrícola. En un contexto de disminución de la oferta de mano de obra agrícola y aumento de los salarios, la hipótesis de que al limitar la automatización se conserva el empleo y los ingresos agrícolas probablemente sea errónea, por dos motivos. En primer lugar, las políticas restrictivas en materia de automatización hacen que las explotaciones sean menos competitivas e incapaces de ampliar su producción para satisfacer el aumento de los mercados internos o las exportaciones. En segundo lugar, para mejorar los salarios y condiciones laborales de los trabajadores agrícolas es fundamental aumentar su productividad, acoplando su trabajo a las nuevas tecnologías. La mayoría de los trabajadores agrícolas mundiales tiene ingresos familiares por debajo del umbral de la pobreza y las perspectivas de salir de la pobreza siguen siendo poco prometedoras sin tecnologías que mejoren la productividad de los trabajadores. Limitar la adopción de tecnologías destinadas a ahorrar mano de obra (y, por tanto, a mejorar la productividad de los trabajadores) hace que persistan los salarios bajos para los trabajadores agrícolas[3].

En vista de ello, la ampliación de la producción de alimentos en un tiempo de disminución de la oferta de mano de obra agrícola, mientras siguen reforzándose los sistemas educativos para preparar la fuerza de trabajo del mañana, constituye un importante desafío en materia de políticas en todo el mundo. Este desafío no se limita a la producción primaria —se aplica también a las demás partes de los sistemas agroalimentarios, incluidas la elaboración y la distribución—. Si no se dispone

de trabajadores con las aptitudes necesarias para complementar las nuevas tecnologías, será difícil satisfacer el aumento de la demanda mundial de alimentos, especialmente en lugares en los que la mano de obra agrícola crece lentamente o incluso disminuye.

CONCLUSIONES

Entender las implicaciones sociales de la automatización de las explotaciones requiere mirar hacia dentro para entender qué labores agrícolas están automatizadas y cómo se relacionan con otras tareas. Requiere asimismo mirar hacia fuera para observar cómo interactúa la producción agrícola con los nodos de las etapas anteriores y posteriores en los sistemas agroalimentarios y la economía en general. En un momento determinado, la automatización afecta a tareas individuales en algunas explotaciones. Libera mano de obra de esas tareas concretas hacia otras más intensivas en mano de obra en la explotación agrícola, así como hacia otras actividades en las etapas anteriores y posteriores de la cadena agroalimentaria y en otros sectores de la economía.

Es fácil imaginar que la automatización crea desempleo y deprime los salarios agrícolas. Un resultado así es sin duda posible en algunas situaciones. Sin embargo, la experiencia pasada sugiere que la innovación y la adopción de tecnologías que permiten ahorrar mano de obra tienden a ser un proceso largo. No resulta fácil crear máquinas que reproduzcan la destreza y habilidad de los seres humanos para realizar tareas agrícolas. Hay muchos ejemplos en los que la automatización de una tarea agrícola (por ejemplo, la preparación del suelo con un tractor) aumenta la demanda de trabajadores para otras tareas (por ejemplo, la siembra, el deshierbe, el aclareo, la cosecha). De este modo, la automatización puede estimular el empleo agrícola al permitir que las explotaciones amplíen su producción en respuesta al aumento de la demanda de alimentos interna y mundial.

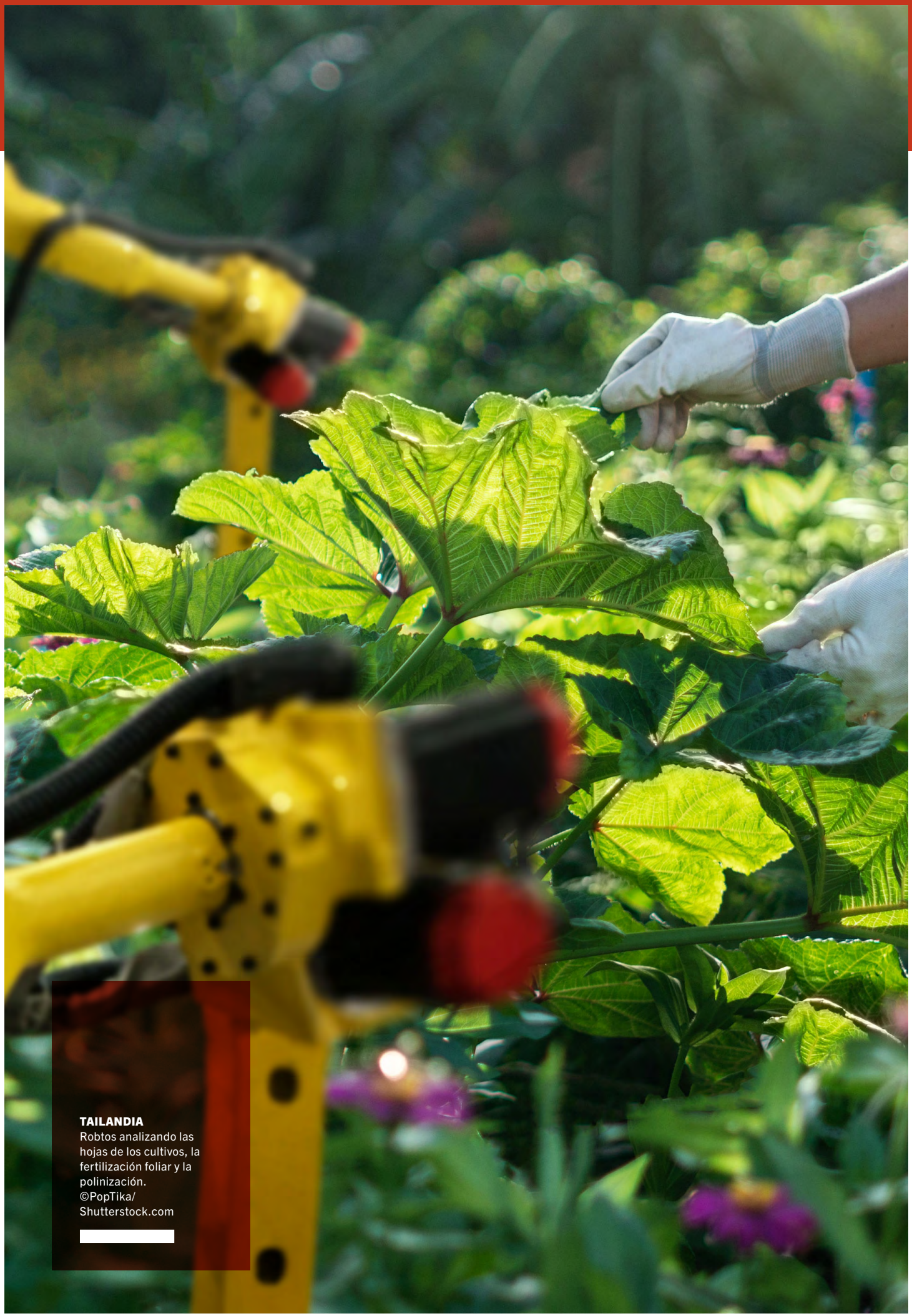
Hay datos que demuestran que el aumento de la producción agrícola, facilitado por la automatización, impulsa la creación de trabajo en otros nodos de los sistemas agroalimentarios —en actividades de suministro de insumos en las etapas anteriores y en actividades de logística, almacenamiento, elaboración y comercialización en las etapas posteriores respecto de las explotaciones agrícolas—. Además, crea nuevas oportunidades empresariales para el desarrollo de nuevos negocios.

La forma en la que el desarrollo y la adopción de tecnologías agrícolas que permiten ahorrar mano de obra afectan al empleo y los salarios depende en gran medida de aquello que impulsa la automatización de las explotaciones agrícolas. Las señales del mercado, concretamente los cambios en los salarios en relación con los precios de otros factores, incentivan o desincentivan la adopción de métodos para economizar mano de obra en las explotaciones. En lo que respecta a la oferta, los grandes avances en materia de investigación y desarrollo (I+D) seguirán poniendo nuevas soluciones de automatización de las explotaciones para nuevas tareas al alcance de los agricultores y a un costo cada vez más bajo. En definitiva, la repercusión global sigue siendo una cuestión empírica, condicionada también por la importancia de la agricultura en la economía y las posibles repercusiones en el conjunto de la economía que la automatización agrícola puede desencadenar.

Se trata de buenas noticias desde la perspectiva del aumento de la producción alimentaria mundial, ya que la mano de obra agrícola en todo el mundo se está contrayendo. Al mismo tiempo, el desarrollo muy rápido de la automatización de las explotaciones, o políticas públicas que promueven la automatización antes de tiempo, podría provocar cambios bruscos en la demanda de mano de obra y romper el vínculo entre la automatización y la disponibilidad de mano de obra. Esto podría hacer que la automatización coincidiera con el aumento del desempleo y la caída o el estancamiento de los salarios en las explotaciones en algunos lugares y en algunos momentos. La respuesta obvia en materia de políticas debería ser evitar la creación de distorsiones en los mercados que alienten una automatización prematura y en su lugar comenzar de inmediato a preparar a los trabajadores con las competencias necesarias para acceder a nuevos trabajos de mayor especialización. Esto reviste especial importancia para los jóvenes y las mujeres, a quienes una serie de obstáculos técnicos, económicos y culturales impiden su plena

participación en estos beneficios. Dado el riesgo de que los pequeños productores se vean obligados a abandonar la agricultura como resultado de la adopción de tecnología en las explotaciones comerciales, es importante proteger sus medios de vida y velar por que no se queden atrás.

En este capítulo se han proporcionado sugerencias de iniciativas dirigidas a fomentar una automatización agrícola inclusiva en la que mujeres, jóvenes y pequeños productores participen de forma más plena. Las políticas públicas sobre automatización agrícola tienen un importante papel que desempeñar en este sentido, además de asegurar que la automatización agrícola sea un factor determinante de la transformación de los sistemas agroalimentarios. La función de las políticas públicas y la legislación se examina en más profundidad en el Capítulo 5. ■



TAILANDIA
Robtos analizando las hojas de los cultivos, la fertilización foliar y la polinización.
©PopTika/ Shutterstock.com

CAPÍTULO 5
OPCIONES DE POLÍTICAS PARA UNA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA EFICIENTE, SOSTENIBLE E INCLUSIVA

MENSAJES PRINCIPALES

➔ La creación de un entorno propicio para la adopción responsable de las tecnologías de automatización resulta fundamental, y ello exige una variedad de instrumentos de política complementarios que operen de forma coherente. Estos instrumentos guardan relación, entre otras cosas, con marcos jurídicos e institucionales, incentivos, y apoyo relacionado con servicios generales a infraestructura, educación, capacitación, investigación y procesos de innovación privada apropiados.

➔ Las inversiones para promover la automatización responsable deberían basarse en las condiciones específicas del contexto, como el estado de la conectividad y los problemas relacionados con la infraestructura, los conocimientos y las competencias, y la desigualdad en el acceso a las tecnologías de automatización.

➔ Las políticas destinadas a abordar los problemas de sostenibilidad ambiental y mejorar la resiliencia deberían reconocer las posibles sinergias entre la automatización y otros enfoques de la sostenibilidad, como la planificación territorial y la agricultura de conservación.

➔ Los responsables de la formulación de políticas deberían centrar sus esfuerzos en establecer marcos legislativos y reglamentarios transparentes, proporcionar un apoyo relacionado con servicios generales —incluida la investigación sobre tecnologías (proyectos piloto, ensayos, etc.) centradas en el agricultor e impulsadas por la demanda— que no cause distorsiones, así como brindar capacitación para ayudar a los trabajadores en la transición a nuevas tareas, tanto dentro como fuera del sector agrícola.

➔ Mientras que los productores agrícolas deben elegir qué tecnologías adoptar de entre toda la gama disponible, la función de las intervenciones públicas es asegurar el acceso inclusivo a la automatización agrícola. Las iniciativas de múltiples partes interesadas que, por ejemplo, comparten conocimientos sobre automatización pueden también facilitar la adopción de estas tecnologías.

Como se ha expuesto en los capítulos anteriores, la automatización agrícola ofrece muchas oportunidades para la transformación sostenible e inclusiva de los sistemas agroalimentarios, pero también conlleva riesgos. Exige esfuerzos paralelos por parte de agentes privados, públicos y del tercer sector, con objetivos coherentes y complementarios, a fin de crear un entorno propicio para la automatización agrícola que permita aprovechar las oportunidades, mitigar los riesgos y velar por una transformación agrícola sostenible e inclusiva. Tomando en consideración también las enseñanzas extraídas de los estudios de casos preparados para este informe (véase el Anexo 1) y la bibliografía disponible, en el presente capítulo se determinan los instrumentos jurídicos y de política para

fomentar la adopción de la automatización agrícola de forma sostenible e inclusiva, sin dejar a nadie atrás. El principio general de la automatización agrícola es el *cambio tecnológico responsable*, que dé lugar a sistemas agroalimentarios eficientes, productivos, inclusivos, resilientes y sostenibles. El cambio tecnológico responsable es un proceso que implica anticipar los efectos de las tecnologías en la productividad, la resiliencia y la sostenibilidad, al tiempo que se presta atención a los grupos marginados y vulnerables, como las mujeres, los jóvenes y los pequeños productores. El proceso debe abarcar la amplia variedad de partes interesadas, atendiendo a sus preocupaciones y aprovechando sus ideas y conocimientos[1]. Para que sea responsable, la automatización agrícola debe ser flexible, centrarse en los agricultores, basarse en la demanda, respetar la privacidad de los datos y la diversidad cultural, proyectarse de forma participativa e inclusiva y ser transparente. Debe reconocer la importancia del contexto y adaptar las tecnologías a las necesidades locales, implicando a los agentes locales y aprovechando su capacidad de innovación adaptativa. ■

HACIA UNA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA RESPONSABLE

Como todo cambio tecnológico, la automatización agrícola conlleva inevitablemente perturbaciones en los sistemas agroalimentarios; si bien genera beneficios, también entraña desventajas, e inevitablemente habrá quien salga ganando y quien salga perdiendo. Las iniciativas para acelerar la adopción deben tener en cuenta los procesos socioeconómicos y normativos que impiden o catalizan el desarrollo y la adopción de la tecnología. La automatización agrícola repercute en los sistemas agroalimentarios de varias maneras. Afecta a los medios de vida de los grupos vulnerables por sus posibles repercusiones en la seguridad alimentaria y la nutrición, la resiliencia, la reducción de la pobreza y el empleo en las zonas rurales, y, por tanto, en la desigualdad. Afecta indirectamente al bienestar general de las comunidades, con posibles efectos en la sostenibilidad ambiental, incluida la conservación de los recursos naturales y la biodiversidad.

Considerando estas repercusiones, el cambio tecnológico responsable debería ocupar un lugar central en los debates sobre políticas, con especial atención a la inclusividad y la sosteniblidad.

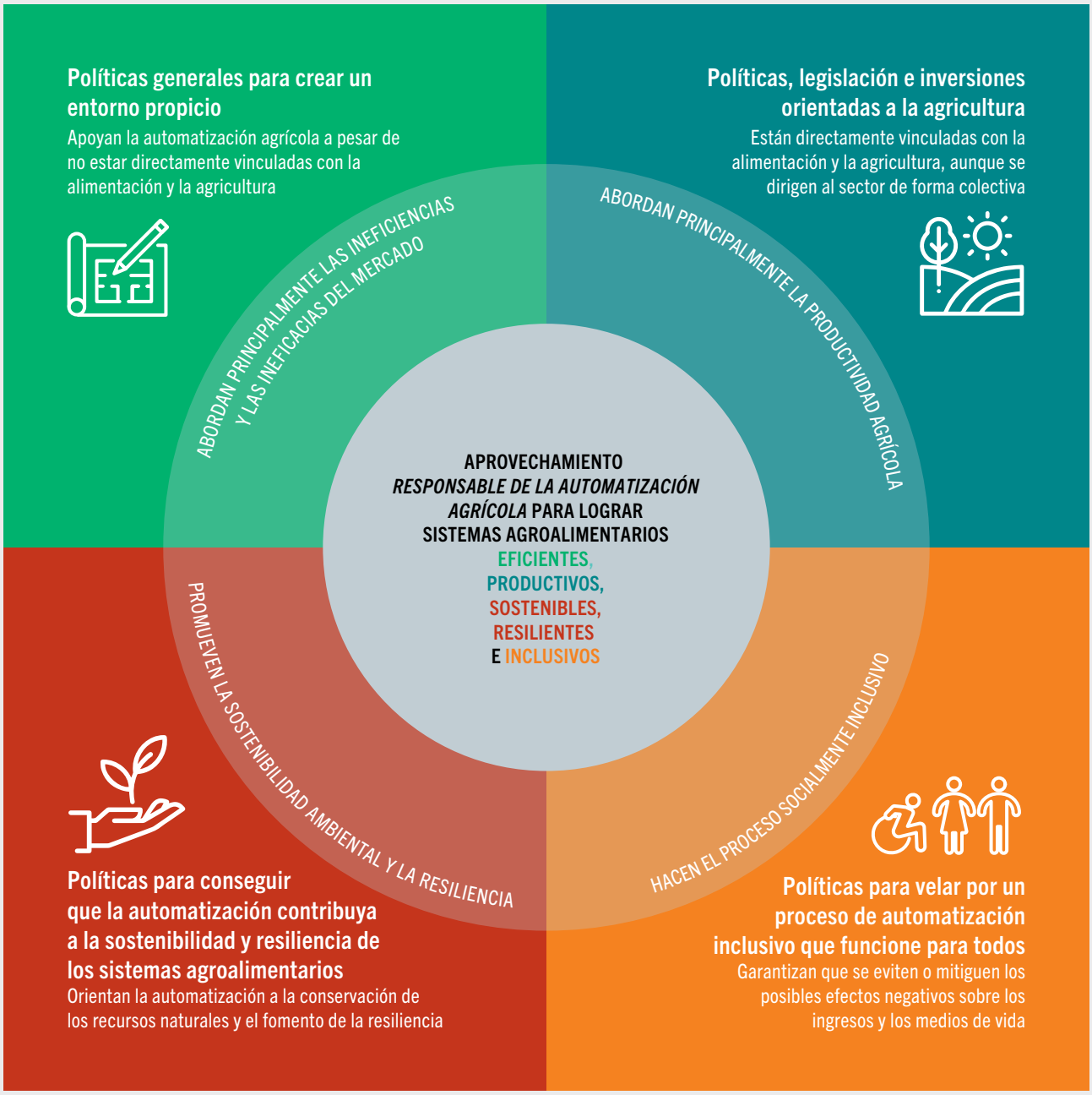
Las iniciativas encaminadas a lograr sistemas agroalimentarios más sostenibles, inclusivos y resilientes deben incluir a todas las partes interesadas, especialmente los pequeños productores y otros grupos marginados y vulnerables, que no suelen tener acceso a las tecnologías de automatización agrícola[1,2]. En este capítulo se presentan distintas opciones posibles en cuanto a políticas, instituciones, legislación e inversiones con objeto de poner en práctica el concepto de cambio tecnológico responsable. Estas opciones se organizan en cuatro ámbitos clave. En conjunto, constituyen un programa para conseguir que la automatización agrícola contribuya a sistemas agroalimentarios eficientes, productivos, sostenibles, resilientes e inclusivos. Todas estas opciones se basan en las principales conclusiones de los estudios de casos y la bibliografía disponible que se presentan en este informe y abordan los principales obstáculos a la adopción señalados y analizados en los capítulos 2 a 4. Las políticas, que se complementan y refuerzan mutuamente, se presentan en la Figura 8 y se resumen a continuación.

- **Políticas generales para crear un entorno propicio.** Se trata de políticas que no están directamente relacionadas con la alimentación y la agricultura, aunque apoyan la adopción de la automatización agrícola. Abordan las deficiencias existentes o potenciales en materia de infraestructura —como carreteras, energía y conectividad—, además de las políticas nacionales de financiación y gestión de datos.

- **Políticas, legislación e inversiones orientadas a la agricultura.** Estas están directamente relacionadas con la alimentación y la agricultura y se dirigen al sector de forma colectiva. Entre ellas figuran la investigación agrícola, los servicios de transferencia de conocimientos y la financiación destinada a la automatización agrícola.

- **Políticas para garantizar que la automatización agrícola contribuya a la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agroalimentarios.** Estas políticas

FIGURA 8 ESQUEMA DE LAS OPCIONES EN MATERIA DE POLÍTICAS PARA APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA DE FORMA RESPONSABLE



FUENTE: Elaboración de la FAO para este informe.

RECUADRO 25 CÓMO LOS DIFERENTES TIPOS DE APOYO PÚBLICO PUEDEN POTENCIAR LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA

El apoyo mundial prestado a la alimentación y la agricultura alcanzó un valor de casi 630 000 millones de USD al año de media durante el período comprendido entre 2013 y 2018[3]. La mayor parte de este apoyo se dirige a los productores agrícolas de forma individual, a través de políticas comerciales y de mercado, o mediante subvenciones fiscales vinculadas principalmente a la producción (por ejemplo, el apoyo a los precios de productos básicos específicos) o a insumos variables específicos (por ejemplo, los fertilizantes en algunos países). Este apoyo puede afectar a la justificación comercial de la automatización a través de múltiples vías. Por ejemplo, puede afectar a la combinación de productos básicos, ya que las ayudas agrícolas se destinan principalmente a los alimentos básicos amiláceos (en los países de ingresos bajos y medianos bajos) y a los productos lácteos y otros alimentos ricos en proteínas (en los países de ingresos altos y medianos altos). La combinación de productos determinará a su vez las opciones de adopción de tecnologías de automatización, que pueden ser adecuadas para algunos productos pero no para otros. En todo el mundo, aproximadamente un tercio de las ayudas se conceden a través de incentivos de precios relacionados con un producto o grupo de productos específicos.

Asimismo, la adopción de la automatización puede verse afectada por el apoyo a los factores de producción, concretamente por los incentivos que favorecen la acumulación de capital. Por ejemplo, las subvenciones al crédito para los productores agrícolas favorecerán las tecnologías de automatización con mayor densidad de capital. La inclusividad de la automatización dependerá en gran medida de quién reciba este apoyo (grandes productores o pequeños productores). A nivel mundial, aproximadamente una décima parte de las ayudas concedidas a los agricultores de forma individual se basan en factores de producción.

Las ayudas vinculadas a la producción, ya sea a través de los precios o de los factores de producción, distorsionan los incentivos y, en consecuencia, pueden ser contraproducentes, favoreciendo involuntariamente a unos productores en detrimento de otros. Aunque la inclusividad puede verse favorecida por medidas de apoyo específicas, normalmente estas no se guían por ese fin.

El apoyo relacionado con servicios generales se dirige a la alimentación y la agricultura de forma colectiva y no está directamente vinculado a la producción, a productores individuales o a factores de producción específicos. Estas políticas incluyen el apoyo a la investigación y el desarrollo agrícolas y los servicios de transferencia de conocimientos (en particular, mediante actividades de capacitación y asistencia técnica), así como el desarrollo y mantenimiento de infraestructura (por ejemplo, la mejora de las carreteras rurales, los sistemas de riego, las instalaciones de almacenamiento y la conectividad). Este apoyo es importante para la adopción de la automatización, sin distorsionar los incentivos ni favorecer a determinados grupos de productores en detrimento de otros.

se centran en alentar a los productores agrícolas a adoptar tecnologías de automatización que, entre otras cosas, permitan conservar los recursos naturales, apoyar la sostenibilidad ambiental y fomentar la resiliencia.

- **Políticas para lograr que el proceso de automatización agrícola sea inclusivo y funcione para todos**. Estas políticas complementan las de los otros tres grupos y tienen por objeto garantizar que todo el mundo —especialmente los grupos marginados, como las mujeres, los pequeños productores y los jóvenes— pueda beneficiarse de la automatización agrícola y que se aborden las posibles repercusiones negativas sobre los ingresos y los medios de vida.

Un ámbito de políticas muy importante es el apoyo relacionado con servicios generales. Se trata de ayudas públicas que no están vinculadas directamente con la producción agrícola y el uso de insumos (véase el Recuadro 25 en la pág. 90). El apoyo relacionado con servicios generales es fundamental en la creación de un entorno propicio para hacer negocios en la agricultura y los sistemas agroalimentarios en general. No distorsiona los incentivos, sino que permite a los productores agrícolas, a sus proveedores de insumos y servicios y a otras partes interesadas crear empresas prósperas, adoptar decisiones fundamentadas sobre la automatización y estimular las innovaciones. Por desgracia, solo una sexta parte de la ayuda mundial a la alimentación y la agricultura (unos 111 000 millones de USD)

corresponde al apoyo relacionado con servicios generales[3]. Este tipo de ayuda es más limitada donde más se necesita, es decir, en los países en los que la agricultura sigue siendo un sector clave para la economía, el empleo y los medios de subsistencia (los países de ingresos bajos y algunos de ingresos medianos bajos)[4]. En estos países, la creación de condiciones equitativas para la automatización agrícola exigirá con toda probabilidad un aumento del apoyo relacionado con servicios generales, lo que, sin embargo, conllevaría un monto considerable de financiación para el desarrollo.

Al proyectar las políticas y planificar las inversiones, los gobiernos también tendrán que lograr un equilibrio entre los diferentes, y a veces contradictorios, objetivos económicos, ambientales y sociales. La pertinencia de las políticas, inversiones y otras medidas públicas propuestas a continuación varía en función del contexto. Los gobiernos deberían priorizar las medidas basándose no solo en los desafíos locales, sino también en las capacidades y los recursos nacionales —incluidos los financieros— que pueden movilizar para formular políticas y llevarlas a la práctica.

En las siguientes secciones se presentan con más detalle las políticas e inversiones recomendadas según las cuatro categorías de políticas. ■

POLÍTICAS GENERALES PARA CREAR UN ENTORNO PROPICIO

En todo el mundo, la demanda de tecnologías que sustituyan la mano de obra humana y mejoren la precisión de las labores agrícolas ha sido uno de los factores más importantes que han impulsado la mecanización en el pasado y es el principal motor de la automatización digital y la robótica en la actualidad. Por medio de políticas, legislación e inversiones de carácter general que afectan al desarrollo agrícola, los gobiernos pueden crear un entorno propicio para las partes interesadas, desde los productores agrícolas hasta los proveedores de servicios, pasando por los operadores de logística y los fabricantes[4]. En particular, el fomento del desarrollo agrícola y la inversión en él —por ejemplo, mediante la mejora de la infraestructura— pueden contribuir a justificar económicamente la adopción de tecnologías de automatización digital. Estas políticas e inversiones desempeñan un papel fundamental en la corrección de los fallos del mercado y la reducción de los costos de transacción causados por deficiencias en la conectividad, el suministro de electricidad, la protección de datos y el acceso a los servicios (por ejemplo, finanzas, seguros, educación), lo que permite mejorar la eficiencia económica general. En las siguientes secciones se ponen de relieve importantes esferas de atención.

Mejora de la infraestructura de transporte

Las deficiencias de la infraestructura pueden generar elevados costos de transacción en el acceso a los insumos y recursos de producción y a los mercados de productos, reduciendo de esta forma los incentivos para invertir en tecnología, incluida la automatización agrícola. Mejorar la infraestructura de transporte permite un mayor acceso de los agricultores a los mercados de alto valor, reduce los costos de transacción de la maquinaria, las piezas de repuesto, las reparaciones y el combustible, y facilita la aparición de mercados de servicios (migratorios)[5]. Esta mejora es especialmente importante en el África subsahariana, donde la infraestructura de transporte suele ser deficiente (véanse los capítulos 2 y 3), pero también es pertinente en otros países de ingresos bajos y medianos en los que parece que la automatización agrícola se ha adoptado de forma limitada.

Inversión en infraestructura energética

Ninguna tecnología de automatización funciona sin energía. Si bien algunas máquinas funcionan con electricidad, la mayoría de ellas dependen de los combustibles fósiles, mientras que la automatización digital requiere electricidad. Incluso en los países en los que las zonas rurales tienen acceso a la red eléctrica, el suministro suele llegar a los núcleos de población pero no a las viviendas aisladas en el campo. La electrificación de las zonas rurales es escasa, incluso en países de ingresos altos. Por esta razón, en muchos países de ingresos bajos y medianos las zonas rurales, si es que tienen suministro energético, dependen de electricidad generada fuera de la red. Las políticas

RECUADRO 26 RED DE BANDA ANCHA DE LIBRE ACCESO EN KOMEN (ESLOVENIA)

En Eslovenia, aproximadamente el 50 % de la población —cerca de 1 millón de personas— vive en zonas rurales, con una densidad media de 30 habitantes por km^2. El municipio de Komen, una zona con población escasa y en declive en la región de Carst, al oeste del país, recibió fondos de la Unión Europea para construir redes de banda ancha de libre acceso. Una asociación público-privada aprovechó la oportunidad para reducir la brecha digital local mediante la rápida instalación de infraestructura y logró una elevada tasa de implantación. La clave del éxito global del proyecto fue la atención prestada a la sostenibilidad y los costos operativos a largo plazo.

La zona de Komen, con una extensión de 103 km^2, comprende cerca de 1 340 hogares distribuidos en 35 aldeas. La instalación de la red era económicamente inviable para los proveedores comerciales, debido a los elevados costos y la escasa rentabilidad prevista como consecuencia de la complejidad y lo rocoso del terreno, y la baja densidad de población. Los órganos municipales desarrollaron el proyecto con el apoyo de un asociado del sector privado.

Los trabajos se llevaron a cabo con rapidez y con unos plazos de ejecución muy ajustados. Las autoridades locales colaboraron activamente con el asociado del sector privado en los trámites administrativos; el ayuntamiento concedió los permisos necesarios con prontitud, un aspecto clave para cumplir el calendario de los trabajos. Las actividades de comunicación y concienciación, dirigidas a todos los ciudadanos de la región de Carst, fueron muy eficaces y suavizaron las relaciones con la población local. Esta estrecha colaboración entre los asociados durante la fase de construcción condujo rápidamente a una elevada tasa de implantación.

FUENTE: Comisión Europea, 2020[11].

que mejoran el suministro eléctrico (por ejemplo, mediante electricidad generada fuera de la red a partir de fuentes renovables) pueden ayudar a apoyar al sector manufacturero local y facilitar la adopción de procesos de automatización digital y mecanización en la agricultura, como es el caso de las bombas de riego y la maquinaria para la elaboración y conservación de alimentos[6, 7]. Los gobiernos podrían centrarse en el potencial de las fuentes renovables para la mecanización de la energía en los segmentos finales de la cadena de valor[8]. La energía renovable basada en inversiones locales también puede amortiguar, al menos en cierta medida, las perturbaciones del sector energético y las fluctuaciones de los precios de los combustibles que afectan a la rentabilidad de la agricultura.

Mejora de la infraestructura de comunicación

La mejora de la infraestructura de comunicación es especialmente importante para la adopción de tecnologías digitales y de automatización. En muchos países de ingresos bajos y medianos la conectividad es deficiente, aunque este problema también puede darse en algunos países de ingresos altos. Además, el acceso a Internet también es fundamental para la automatización digital, dado que permite la actualización de los programas informáticos, mejora la capacidad de los ordenadores (a través de la informática en la nube) y posibilita el acceso a los datos de teledetección y otras bases de información. El acceso a Internet en las zonas rurales de todo el mundo suele ser limitado y caro, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos. Las políticas para fomentar el desarrollo de la infraestructura digital rural podrían incluir préstamos a bajo interés para los proveedores rurales de Internet y ayudas a las cooperativas de comunicación que ofrecen servicios de datos. En Europa, la conectividad ha mejorado en las zonas rurales mediante la aplicación de diversas soluciones, entre las que se incluyen iniciativas privadas, públicas y comunitarias, la mayoría de las cuales implican la colaboración entre distintas partes (véase el caso de Eslovenia en el Recuadro 26, en la pág. 92). Estos ejemplos muestran la importancia

de la colaboración entre las comunidades y los sectores público y privado para mejorar la conectividad y la infraestructura rurales[9]. La legislación también puede desempeñar una importante función; en algunas jurisdicciones, el acceso a Internet es un derecho protegido por la ley (por ejemplo, en Finlandia)[10].

Las inversiones también deberían destinarse a infraestructura de apoyo asociada, como los conjuntos de datos públicos sobre previsiones meteorológicas y calendarios para la producción agrícola y ganadera. Un ejemplo de iniciativa de colaboración en este ámbito lo constituye la Alianza de Bienes Públicos Digitales, una iniciativa de múltiples partes interesadas de la que forma parte la FAO. La Alianza promueve el descubrimiento, el desarrollo y la utilización de bienes públicos digitales, así como la inversión en ellos, en múltiples sectores, incluido el agrícola.

Mejora de los mercados de crédito en general y de las políticas cambiarias

El crédito es fundamental para invertir en la automatización de la agricultura y financiar las tecnologías agrícolas en general. Los pequeños productores, especialmente las mujeres, suelen tener un acceso limitado al crédito, debido a la falta de garantías (por ejemplo, títulos de propiedad de la tierra) y a los elevados costos de transacción, entre otros obstáculos[12]. En muchos casos, los tipos de interés prohibitivos impiden la obtención de créditos para financiar maquinaria[5, 12] y otras tecnologías de automatización. A diferencia de lo que ocurre con las semillas, los fertilizantes y los plaguicidas, las tecnologías de automatización son caras y sus costos se reparten a lo largo de varios años. Las políticas de tipos de interés pueden influir en gran medida en los patrones de automatización, como se ha visto en varios países asiáticos[6, 13]. Las políticas de tipos de cambio también pueden afectar a la automatización debido a su repercusión en los costos de importación de la maquinaria, las piezas de repuesto y el combustible[5, 13]. Garantizar unos tipos de interés asequibles para el crédito y asegurar unos tipos de cambio estables es esencial para las inversiones a largo plazo en la mayoría de las tecnologías de automatización.

Establecimiento de políticas y leyes nacionales transparentes en materia de datos

Las tecnologías de automatización digital suelen recabar cantidades ingentes de datos sobre cultivos, ganadería, acuicultura y actividades forestales. Estos datos pueden incluir información de dominio privado, lo que, por consiguiente, plantea problemas de privacidad para los productores agrícolas. Los datos que no están protegidos por la legislación sobre privacidad pueden convertirse en una mercancía valiosa, por lo que puede ser necesario establecer marcos jurídicos para aclarar quién obtiene beneficios del uso de los datos. Disponer de una legislación transparente en materia de protección, intercambio y privacidad de datos es un factor clave para la automatización digital, ya que genera confianza entre los agricultores. En concreto, deben establecerse normas claras sobre la propiedad y el control de los datos. Conviene tener en cuenta el concepto de "privacidad por diseño", integrando la protección de datos en el diseño de la tecnología.

Asimismo, debe fomentarse una digitalización responsable y progresiva del sector agrícola, lo que incluye el desarrollo de infraestructuras nacionales de datos y el apoyo a estas. Debido a su papel crucial en el intercambio de datos, es necesario que la interoperabilidad (la comunicación precisa y fiable entre máquinas) quede definida técnicamente y se imponga por ley. La interoperabilidad jurídica define el marco normativo para el intercambio de datos, al tiempo que protege aspectos como la confidencialidad de la información.

Otro ámbito relacionado con la gestión de datos es la capacidad institucional y normativa para la digitalización y la automatización. La experiencia en países de ingresos bajos y medianos demuestra que las empresas tecnológicas más poderosas suelen anticiparse a este sistema de gobernanza, lo que genera consecuencias potencialmente negativas. Es lo que se denomina "colonialismo digital"[14, 15], una práctica en la que el poder y la influencia se concentran en las grandes empresas —por ejemplo, mediante el software patentado—, para extraer datos y beneficios de los usuarios. La mayoría de los países de ingresos bajos y medianos no pueden desarrollar una

RECUADRO 27 ESTRATEGIAS NACIONALES PARA POTENCIAR LA ADOPCIÓN DE INSTRUMENTOS DIGITALES EN LA AGRICULTURA AFRICANA

La Unión Africana y varios gobiernos de África están acelerando los esfuerzos encaminados a crear un entorno que permita el uso eficaz de los instrumentos digitales para transformar los sistemas agroalimentarios. Un paso clave reciente es la Estrategia de agricultura digital de la Unión Africana, dirigida por el Departamento de Economía Rural y Agricultura de la Comisión de la Unión Africana. Se trata de una continuación de la Estrategia de transformación digital para África (2020-2030), que aborda también la agricultura[16]. La Estrategia de agricultura digital, que aún no ha sido aprobada oficialmente, alienta a los gobiernos a aprovechar mejor el poder de la innovación digital para impulsar el rendimiento, la inclusión y la sostenibilidad de la agricultura y otros sectores rurales, lo que exige la aplicación de estrategias de agricultura digital y la utilización de la digitalización para reforzar los servicios de mecanización.

Además, *Smart Africa*, un organismo intergubernamental creado por los jefes de Estado y de Gobierno africanos, ha elaborado un plan sobre tecnología agrícola para África[17], si bien, hace unos años, la FAO y la Unión Internacional de Telecomunicaciones ofrecieron a los gobiernos una guía para sus estrategias de agricultura digital[18]. A partir de estas distintas iniciativas, muchos ministerios de agricultura de África están diseñando nuevas políticas para aprovechar mejor las oportunidades que ofrece la digitalización.

industria digital competitiva utilizando sus propios recursos. A pesar de ello, es importante desarrollar la capacidad de la gobernanza nacional y regional para, al menos, orientar las tecnologías de automatización, y no al revés. También son importantes las iniciativas de colaboración encaminadas a afrontar los desafíos que se plantean en materia de datos. Un ejemplo de ello es el amplio espectro de asociados que integran la Alianza de Bienes Públicos Digitales. Estas iniciativas también ponen de relieve las posibilidades que ofrece la comunicación digital para compartir información sobre las tecnologías de automatización y dar a conocer su potencial. ■

POLÍTICAS, LEGISLACIÓN E INVERSIONES ORIENTADAS A LA AGRICULTURA

Aparte de formular políticas, legislación e inversiones de carácter general, los órganos decisorios deben dirigir sus esfuerzos al sector agrícola para apoyar la automatización de forma más directa. Los gobiernos pueden utilizar distintas políticas, legislación, inversiones y otras intervenciones para dirigirse al sector, especialmente a los pequeños productores, a fin de apoyar la adopción de tecnologías de automatización. Como ejemplo cabe citar las políticas de tenencia de la tierra, las inversiones en fomento de la capacidad, la legislación sobre garantía de calidad, la investigación aplicada y la financiación específica. El orden concreto de prioridades entre estas medidas depende en gran medida del contexto, incluido el nivel de desarrollo general de un país o región y las características agroclimáticas y topográficas de la agricultura. Las estrategias nacionales de automatización agrícola son necesarias para orientar medidas, políticas e inversiones más específicas. Esto resulta esencial en los ámbitos en los que la automatización es inexistente o se encuentra en una fase inicial. Estas estrategias nacionales deben basarse en encuestas y estudios de campo que tengan en cuenta las experiencias de los investigadores, productores agrícolas, proveedores de servicios y fabricantes. La introducción de maquinaria y equipo digital específicos por parte de los productores debe basarse en sus condiciones y necesidades, que varían dentro de los países y entre ellos. En África, donde la automatización de la agricultura es todavía limitada, los gobiernos se han unido para acelerar su adopción, reconociendo las ventajas de la revolución digital (véase el Recuadro 27 en la pág. 94).

En las siguientes secciones se presentan las posibles políticas, inversiones y legislación en

las que pueden centrarse los gobiernos, teniendo en cuenta las condiciones y necesidades de los productores, a fin de aprovechar el potencial de las tecnologías de automatización y elaborar un estudio de viabilidad para el mayor número posible de productores.

Mejora del acceso a las tecnologías de automatización, especialmente para los pequeños productores

Como se señaló anteriormente, el funcionamiento de los mercados de crédito tiene importantes consecuencias en el acceso a la financiación para adoptar tecnologías costosas como la automatización. Para comprar maquinaria, los agricultores pueden utilizar sus ahorros, pero cuando estos son limitados, recurren al crédito. Los gobiernos pueden influir en este proceso a través de políticas crediticias dirigidas directamente a la automatización de la agricultura. La solución más habitual para financiar la automatización son los préstamos de inversión, aunque estos pueden quedar limitados por la falta de garantías o tener costos elevados. Otras posibles opciones incluyen las garantías otorgadas mediante contrato, los sistemas de garantía de préstamos, los préstamos colectivos de responsabilidad conjunta y el *leasing* o arrendamiento financiero. En el caso del arrendamiento financiero, pueden aplicarse diversos incentivos, como por ejemplo donaciones de contrapartida o la concesión de subsidios "inteligentes" (es decir, que no distorsionen los mercados)[26]. Este tipo de instrumentos se utilizan en algunos países asiáticos para mejorar el acceso de los agricultores al crédito[13]. Otras opciones con potencial para el futuro incluyen los acuerdos de financiación de la cadena de valor, el crédito cooperativo (como se ha visto en la India[27]) y los productos de ahorro y seguro, especialmente para el equipo de mayor tamaño[26]. Además de los productores y los proveedores de servicios, también los fabricantes locales y los talleres de mantenimiento y reparación pueden necesitar préstamos[5, 22].

Los datos aportados por los 27 estudios de casos examinados en el Capítulo 3 muestran que cuando los productores agrícolas —especialmente los pequeños agricultores— carecen de capacidad financiera, los proveedores de servicios pueden buscar modelos de negocio alternativos para rentabilizar sus soluciones. En algunos casos, los servicios están vinculados al crédito, los seguros o los contratos agrícolas, como los acuerdos de agricultura por contrato que garantizan a los agricultores la compra de su cosecha por un precio y una cantidad predeterminados. Esto permite reducir los riesgos de producción, mejorar la capacidad de inversión y, en consecuencia, aumentar el rendimiento de los cultivos y la calidad de los productos. A falta de una normativa en materia de agricultura por contrato o cadenas de suministro que mejore la capacidad contractual de los pequeños productores, estos modelos de negocio pueden generar bloqueos tecnológicos (es decir, exigir a los agricultores que utilicen servicios específicos), o dependencias y asimetrías de poder no deseadas, con consecuencias socioeconómicas imprevistas. Estas soluciones también pueden coaccionar tanto a los agricultores como a los compradores y a los proveedores de servicios para que sigan determinadas pautas de comportamiento y prácticas agronómicas promovidas por los agentes con mayor poder de mercado. Al mismo tiempo, estas soluciones vinculan a los agricultores a un sistema cerrado y particular[25]. Disponer de servicios formales más organizados contribuye a reducir los riesgos de producción, pero también puede restringir las opciones del agricultor. Es necesario disponer de normas para proteger a los pequeños productores ante los contratos abusivos.

Otra esfera de políticas en la que los gobiernos pueden facilitar el acceso a la financiación es la tenencia de la tierra. La inseguridad en la tenencia de la tierra priva a los productores de incentivos para invertir en tecnologías agrícolas —y en sus explotaciones en general— porque les genera una gran incertidumbre sobre si podrán llegar a percibir beneficios de su inversión. Además, restringe el acceso al crédito, ya que los agricultores no pueden utilizar los títulos de propiedad como garantía. Esta situación es especialmente problemática cuando la inversión es costosa y tarda varios años en amortizarse, como en el caso de la maquinaria motorizada. Una mayor seguridad en la tenencia de la tierra facilita el acceso al crédito, especialmente para los pequeños productores, e incentiva la inversión en maquinaria. En Myanmar, por ejemplo, las reformas de la tenencia de la tierra han aumentado considerablemente la probabilidad de obtención de

un préstamo bancario para comprar maquinaria agrícola[23]. Los agricultores pueden utilizar este crédito para adquirir insumos como fertilizantes y semillas mejoradas; las sinergias entre estos insumos y el uso de maquinaria y equipo digital contribuyen a aumentar la productividad y la eficiencia en el uso de los recursos. La concesión de créditos para la automatización debería quedar bajo la responsabilidad de los agentes del mercado y orientarse por criterios de viabilidad comercial. Las iniciativas públicas para financiar directamente la automatización de la agricultura han chocado a menudo con considerables problemas de gobernanza[26, 28].

Las políticas comerciales pueden desempeñar un papel decisivo en el acceso a las tecnologías de automatización agrícola. El suministro de automatización agrícola puede verse afectado por los elevados derechos de importación, los largos procedimientos aduaneros y las barreras no arancelarias al comercio, como las medidas sanitarias. En Asia, la supresión de las restricciones a la importación ha contribuido notablemente a la mecanización[13], mientras que, en África, la maquinaria está ahora exenta de derechos de importación en muchos países, aunque no en todos[12, 13]. En algunos países en los que la maquinaria está en gran parte exenta, las piezas de recambio suelen estar sujetas a elevados aranceles, lo que socava la sostenibilidad de la mecanización. La reducción de los derechos arancelarios aplicados a la maquinaria, el equipo digital y las piezas de recambio, junto con la mejora de los procedimientos aduaneros, puede contribuir a reducir los costos de transacción de las tecnologías de automatización y estimular su adopción. Los gobiernos deberían otorgar prioridad a las exenciones arancelarias y fiscales para la maquinaria y el equipo que mejor se adapten a las condiciones locales y aborden los principales desafíos relativos a los objetivos nacionales de mejora de la productividad, aumento de la sostenibilidad y mayor resiliencia.

Fomento de los conocimientos y las competencias

Los fabricantes, los propietarios, los operadores y los técnicos de maquinaria, así como los productores agrícolas, necesitan adquirir conocimientos y competencias sobre cómo crear, gestionar, operar, mantener y reparar equipo de automatización agrícola. El fomento de los conocimientos especializados suele ser deficiente, a pesar de su importancia para mantener la rentabilidad y la sostenibilidad de las tecnologías de automatización[5]. Un buen ejemplo de ello es Ghana, donde el 86 % de los tractores tienen averías frecuentes y duraderas debido al mantenimiento deficiente y a la escasez de operadores y mecánicos cualificados[19].
Las iniciativas públicas destinadas a crear conocimientos y competencias han desempeñado un papel fundamental a lo largo de la historia de la mecanización en todo el mundo[20].
Los centros de formación profesional, que combinan el aprendizaje teórico con el práctico, pueden ser especialmente adecuados para proporcionar los conocimientos y aptitudes necesarios. La capacitación también es esencial para las personas encargadas de supervisar la automatización digital. En Australia, el código de prácticas elaborado específicamente para los usuarios de máquinas con funciones autónomas hace mucho hincapié en cómo alertar a los supervisores y en cómo estos deben notificar los incidentes[21].

El analfabetismo digital, así como la falta de competencias para supervisar, mantener y reparar las tecnologías de automatización, es otro de los principales obstáculos para la adopción de la automatización digital en todo el mundo, sobre todo en el caso de los pequeños productores (véase el Capítulo 3). El desarrollo del capital humano es fundamental, por lo que debe formularse un programa de fomento de la capacidad, que incluya inversiones para fomentar las competencias digitales. Este programa no solo debería dirigirse a los productores agrícolas, sino también a otros agentes de la cadena de valor agrícola, abarcando todas las etapas, desde el suministro de insumos y servicios hasta las fases posteriores (por ejemplo, la elaboración y la comercialización). Disponer de este programa es fundamental para apoyar la transición de los trabajadores de los puestos de trabajo poco cualificados a los de alta cualificación, y es especialmente importante para los jóvenes, a menudo considerados los principales impulsores de la transformación de la agricultura familiar hacia la automatización agrícola, ya que tienden a adoptar las nuevas tecnologías en mayor medida que sus padres. Por lo tanto, las políticas e

RECUADRO 28 ADAPTACIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DIGITAL A DIVERSOS CONTEXTOS: DATOS EXTRAÍDOS DE 27 ESTUDIOS DE CASOS

En los 27 estudios de casos del presente informe se muestra cómo adaptar la automatización digital a las necesidades locales en distintos sistemas de producción, países y tipos de explotaciones. Por ejemplo, con respecto a la producción de cultivos existen pruebas de que los países de ingresos bajos están desarrollando pequeña maquinaria automatizada; es el caso de los recolectores de hojas de té en Uganda, y las cosechadoras automatizadas de algodón (una actividad difícil de automatizar, como se menciona en el Capítulo 3) en la India y en el África occidental. Estas tecnologías están actualmente a disposición de los productores de mediana y gran escala, y se espera que su uso se extienda, gestionado por las organizaciones de productores por conducto de centros de contratación.

En la ganadería de precisión, los modelos de negocio y de servicio de los robots de ordeño ofrecen valiosas enseñanzas en cuanto a la aplicación de las tecnologías en distintos tipos de explotaciones. Mientras que en los países de ingresos altos los robots de ordeño son utilizados principalmente por las explotaciones de mediana y gran escala, existen otras tecnologías adaptadas a las explotaciones de interior de pequeña escala, así como a instalaciones para el pasto que permiten el libre movimiento de las vacas en países de ingresos medianos.

Por último, en lo que respecta a la agricultura en entornos controlados, los invernaderos son cada vez más comunes en los países de ingresos altos y medianos, donde existe un cierto nivel de automatización (por ejemplo, para el control del clima). Estas soluciones están apareciendo en países de todo el mundo (Arabia Saudita, Chile y México, entre otros). La agricultura controlada, y en particular los invernaderos, representan una importante oportunidad para la robótica con inteligencia artificial (IA).

FUENTE: Ceccarelli et al., 2022[25].

inversiones de los gobiernos deben dirigirse a los jóvenes trabajadores rurales.

Inversión en investigación y desarrollo aplicados

Las tecnologías de automatización se ven impulsadas en gran medida por la investigación y el desarrollo privados. Los gobiernos pueden brindar apoyo general por medio de las instituciones pertinentes y llevar a cabo o financiar actividades de investigación sobre soluciones técnicas, agronómicas y económicas que fomenten una automatización sostenible y adaptada a las condiciones locales. El programa de investigación también debería incluir estudios sobre los efectos de soluciones específicas de agricultura de precisión en la rentabilidad, la sostenibilidad ambiental (en particular, las huellas de carbono, hídrica y energética), la seguridad laboral y la inclusión de las mujeres, los jóvenes y otros grupos vulnerables. Otro ámbito pertinente es el de los distintos tipos de agricultura practicada en entornos protegidos y controlados (por ejemplo, la agricultura vertical o los invernaderos), que no siempre son percibidos positivamente por los consumidores y los responsables de la formulación de políticas. También es fundamental desarrollar y validar modelos agronómicos específicos que ayuden a entender las respuestas de los cultivos a tecnologías concretas de la agricultura de precisión, como la TDV. Los gobiernos pueden apoyar los sistemas nacionales de investigación e innovación —privados o públicos— para adaptar y mejorar la maquinaria y el equipo digital existentes, adaptándolos a las necesidades de los productores a medida que evolucionan los sistemas agrícolas.

Es necesario investigar sobre el uso de macrodatos y macroanálisis agrícolas como un bien público capaz de ofrecer servicios de asesoramiento gratuitos a los pequeños productores. También se recomienda la investigación aplicada para estudiar la adaptación de las soluciones automatizadas a diferentes regiones, países, condiciones agroecológicas, orientaciones de producción y tipos de explotaciones (véase el Recuadro 28). Las ideas que han funcionado en un lugar tal vez no sean adecuadas en otros sitios. Para fomentar

el desarrollo de una agricultura autónoma pertinente, los marcos de I+D deben promover la colaboración entre innovadores y agricultores a fin de diseñar las soluciones y ampliar su escala. Un ejemplo extraído del Reino Unido es un programa de *Innovate UK* llamado "*Science and Technology into Practice*" (Ciencia y tecnología en la práctica). El programa, que está financiado con fondos públicos, exige a los innovadores colaborar con los usuarios finales a lo largo del proyecto, celebrar actos de demostración, así como recabar las opiniones de los agricultores para actuar en consecuencia.

Un último ámbito de investigación es el de la nueva dinámica de poder en los países de ingresos bajos y medianos como consecuencia de la creciente dependencia de las tecnologías de digitalización y automatización. Es necesario comprender los intereses comerciales de los grandes actores en el desarrollo de las tecnologías y la prestación de servicios, y las posibles repercusiones en los pequeños productores, especialmente en lo que respecta a la concentración de poder, la redistribución de la tierra y la riqueza, y la pérdida o creación de conocimientos y competencias, así como las consecuencias para la mano de obra y el empleo.

Garantía de calidad y elaboración de normas de seguridad

La falta de mecanismos de garantía de la calidad mediante la realización de pruebas experimentales y la certificación de la maquinaria, el equipo y las piezas de repuesto puede perjudicar la adopción de diversas tecnologías de automatización agrícola, dado el aumento de la incertidumbre y los riesgos asociados a la compra[13]. Por ejemplo, en Ghana, una desgranadora de maíz de fabricación local acoplable a un tractor cuesta menos que una máquina similar de importación, pero resulta difícil evaluar la calidad antes de la compra debido a la falta de normas o sistemas de certificación. Por esta razón, muchos agricultores optan por las marcas extranjeras[5]. La realización de pruebas puede resultar demasiado costosa para los pequeños y medianos fabricantes que no disponen de líneas de montaje; es más, estos carecen de incentivos para realizar ensayos si los mercados locales no exigen una certificación oficial. No obstante, existen organizaciones públicas, comerciales o del tercer sector que pueden llevar a cabo pruebas para mitigar eficazmente las asimetrías de información, sin que por ello aumenten considerablemente los costos de la maquinaria. La existencia de un servicio público de validación que evalúe la eficiencia en función de los costos, la eficacia y la facilidad de uso de las tecnologías podría repercutir positivamente en su adopción. Asimismo, el fortalecimiento de las instituciones normativas puede fomentar la fabricación y el comercio de tecnologías de automatización[22].

Los responsables de la formulación de políticas deben garantizar la seguridad de la automatización agrícola mediante un conjunto equilibrado de leyes y reglamentos. Estas normas deben abarcar todos los aspectos, ya sean positivos o negativos, y basarse en una consulta inclusiva, interactuando con todas las partes interesadas tanto antes como después de la aplicación de la normativa. En el Reino Unido, por ejemplo, el Gobierno ha restringido rigurosamente el uso de drones en la aplicación de insumos alegando motivos de seguridad, a pesar de los considerables beneficios que estos dispositivos aportan al medio ambiente y la seguridad humana. La legislación también exige la supervisión humana sobre el terreno del 100 % de las máquinas autónomas para que no causen accidentes. Existen estudios que indican que esta legislación anula los beneficios económicos del equipo autónomo para los pequeños y medianos productores y aumenta las economías de escala, con lo que su uso es rentable para las explotaciones más grandes únicamente[24]. Este tipo de conclusiones pueden dar lugar a una revisión de las políticas, siempre y cuando estas se hayan elaborado en un proceso transparente e inclusivo.

Los gobiernos deben adoptar marcos transparentes para garantizar la seguridad. Estos marcos deben incluir como elementos esenciales inspecciones para verificar el cumplimiento por parte de los usuarios; normas para brindar orientación, y mecanismos para permitir la autorregulación, por ejemplo, a través de sistemas de garantía (sistemas voluntarios que establecen normas de producción que abarcan la inocuidad de los alimentos, el bienestar animal y la protección del medio ambiente). Las normas pueden ser jurídicamente vinculantes o no. En Australia, se

ha adoptado un código de prácticas para orientar el uso de máquinas autónomas en la agricultura[21]. Este código proporciona confianza tanto a los agricultores, para adoptar soluciones autónomas, como a los fabricantes, para ampliar la escala de las soluciones. Su objetivo es normalizar el enfoque de la automatización de la maquinaria. El código de buenas prácticas abarca varios ámbitos, entre ellos: controles generales de peligros y preparación para emergencias; transporte de vehículos entre los campos; requisitos de mantenimiento y reparación; gestión de emergencias, así como disposiciones legislativas y normas. En el Reino Unido se están llevando a cabo trabajos similares para los robots, en particular los utilizados en la agricultura[9].

Aprovechamiento del potencial de las tecnologías de automatización agrícola de bajo costo

En los casos en que la inversión en maquinaria de gran tamaño no está justificada económicamente debido a limitaciones financieras, o porque la maquinaria no se adapta a las condiciones topográficas locales (por ejemplo, terrenos accidentados) o al tamaño de las explotaciones (por ejemplo, parcelas muy pequeñas y fragmentadas), la maquinaria pequeña puede aportar grandes beneficios a los productores de cultivos, especialmente a los que explotan pequeñas parcelas en zonas relativamente marginales. Entre estas máquinas y equipo se encuentran los tractores de dos ruedas o motocultivadores, las sembradoras de tambor, las rotativas de deshierbe y las escardadoras mecánicas[29]. Existen datos objetivos que demuestran las ventajas económicas derivadas de la introducción de maquinaria pequeña (véase el Recuadro 17 en la pág. 59). De hecho, estas sencillas tecnologías pueden contribuir a una considerable simplificación de las tareas más fatigosas, así como a un ahorro de tiempo y de insumos, lo que se traduce en una mejora de la productividad y en una mayor resiliencia gracias a la realización puntual de las labores. También son más respetuosas con el medio ambiente, ya que el consumo de combustible fósil para su funcionamiento es mínimo o inexistente, y muchas de ellas son adecuadas para métodos agroecológicos como los sistemas de cultivo de arroz y cría de peces y la alternancia de humectación y secado, en la que los agricultores aplican tecnologías de ahorro de agua para reducir el consumo de recursos hídricos en los campos de arroz sin que ello afecte el rendimiento de los cultivos. En algunos contextos, fomentan una mayor inclusión de las mujeres, que pueden quedar excluidas de la mecanización debido a costumbres culturales y tradiciones[29, 30].

En la mayoría de los países de ingresos bajos y medianos se dispone de tecnologías como la IVR, los USSD o los SMS, además de los centros de llamadas, y, por tanto, estas son las soluciones más comunes, si no las únicas, para los pequeños productores, especialmente en el África subsahariana. Estas tecnologías permiten acceder a los servicios agrupados, ya que pueden llegar a los agricultores (independientemente de los dispositivos que estos utilicen y de sus conocimientos digitales), son de bajo costo y requieren poco mantenimiento. Los servicios agrupados suelen combinar varios subservicios (por ejemplo, suministro de información sobre los mercados, el clima y la meteorología, así como datos de seguimiento de las explotaciones en tiempo real), y también establecer vínculos entre los agentes. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de limitar las brechas digitales gracias a su gran accesibilidad. Son menos vulnerables a los fallos en la infraestructura, ya que requieren menos energía y una infraestructura de datos más sencilla en comparación con las tecnologías avanzadas basadas en datos, y son las más rentables. Sin embargo, es importante que las soluciones que se ofrezcan no solo respondan a las necesidades locales, sino que proporcionen un asesoramiento fiable[25]. ■

POLÍTICAS PARA CONSEGUIR QUE LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA CONTRIBUYA A SISTEMAS AGROALIMENTARIOS SOSTENIBLES Y RESILIENTES

Hasta aquí, en este capítulo se ha examinado la función de una serie de medidas para superar los obstáculos a la adopción de la automatización agrícola, centrando la atención en las necesidades de los pequeños productores. En esta sección se examina lo que debe hacerse para que la adopción de la automatización agrícola contribuya a que los sistemas agroalimentarios sean sostenibles y resilientes, y evite una mayor degradación del medio ambiente. Como ya se ha mencionado, la mecanización motorizada ha generado muchos beneficios, entre ellos el aumento de la productividad, lo que contribuye a una mayor seguridad alimentaria, una reducción de la pobreza y una mejora de la salud y el bienestar, entre otros efectos positivos. No obstante, estas mejoras han acarreado consecuencias negativas para la sostenibilidad ambiental como, por ejemplo, la pérdida de biodiversidad, la compactación y erosión del suelo y la degradación del agua. Estos efectos pueden minimizarse o evitarse en gran medida si al mismo tiempo se aplican políticas, legislación e inversiones adecuadas, y se utilizan tecnologías más avanzadas, como las soluciones de automatización digital. En las siguientes secciones se examinan importantes esferas de atención.

Protección contra la pérdida de biodiversidad, la degradación de la tierra y las emisiones de carbono

La mecanización motorizada puede dar lugar a la expansión de las tierras de cultivo a costa de los bosques y la sabana, lo que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad (véase el Capítulo 3). Estos efectos negativos se pueden abordar o evitar, al menos en parte, mediante la planificación y el seguimiento del uso del suelo, facilitados por las tecnologías de automatización digital que se centran en las tierras más valiosas para mitigar el cambio climático y conservar la biodiversidad. Las inversiones también deben seguir los principios de la inversión responsable en la agricultura y los sistemas agroalimentarios, aprobados por el Comité de Seguridad Alimentaria Mundial[31].

Las estrategias de cultivo sostenible, como los sistemas agrícolas-ganaderos-forestales integrados, que generan menos efectos climáticos y permiten una mayor biodiversidad, también pueden contribuir a mitigar los efectos ambientales negativos[32]. En uno de los 27 estudios de casos examinados en el Capítulo 3, el referente a Justdiggit (véase el Anexo 1), se promueve la restauración del paisaje a gran escala en África, por ejemplo, mediante la transformación de pastizales degradados en tierras verdes y fértiles. Este proceso de restauración del paisaje, que se lleva a cabo por medio de la captación de agua de lluvia, la gestión del pastoreo y la poda de árboles, está asistido por sensores remotos que controlan el crecimiento de los árboles y calculan los volúmenes de carbono captado[33]. En algunos países, los gobiernos han conseguido reducir al mínimo la expansión de las tierras de cultivo mediante la planificación y el seguimiento del uso del suelo. Debería fomentarse la adopción de estas iniciativas y prácticas, y su aplicación podría repetirse en otros lugares. En otros países, las intervenciones públicas han generado efectos negativos; por ejemplo, como consecuencia del apoyo brindado a planes de agricultura en bloque a gran escala o inversiones en tierras. Deberían paralizarse y prohibirse las intervenciones de este tipo que aún se estén aplicando en otros lugares.

Una combinación de tecnologías puede reducir las emisiones de GEI y mejorar el almacenamiento de carbono en el suelo, lo que permite a la agricultura lograr emisiones netas negativas manteniendo una alta productividad. Según previsiones actuales, en los próximos 15 años las sinergias entre la automatización digital, la genética de los cultivos y los microbios, y la electrificación permitirán reducir en un 71 % las emisiones de GEI derivadas de las prácticas agrícolas de cultivo en hileras. Se calcula que las prácticas agrícolas actuales de

cultivo en hileras generan alrededor del 5 % del total de las emisiones de GEI en los Estados Unidos de América y la Unión Europea. Los mercados emergentes de servicios ecosistémicos, tanto voluntarios como reglamentarios, pueden incentivar los avances a lo largo de esta vía de transición y orientar las inversiones públicas y privadas hacia el desarrollo tecnológico[34].

Una maquinaria más ligera puede reducir la compactación y la erosión del suelo, a menudo causadas por maquinaria motorizada de gran tamaño. Además, la agricultura de conservación con rotación de cultivos puede reducir la erosión del suelo hasta en un 99 %, mediante la utilización de escarificadores o plantadoras directas en lugar de arados, promoviendo así la menor alteración posible del suelo (cultivo sin labranza), el mantenimiento de una cobertura permanente del suelo y la diversificación de las especies vegetales[35]. Parece que este es el camino que debe seguir la agricultura en todo el mundo, incluso en los países de ingresos bajos y medianos[22]. Existen datos que demuestran que la combinación de la mecanización motorizada con la labranza reducida puede generar sinergias entre la productividad y la salud del suelo[36]. Sin embargo, para superar algunas de las dificultades asociadas a esta práctica, deben elaborarse soluciones adaptadas a las condiciones locales[37]. La investigación técnica y agronómica aplicada puede explorar las soluciones de mecanización que mejor se adaptan a las condiciones agroecológicas locales. Por ejemplo, cada vez se investiga más sobre la aplicación de insumos con drones en las pequeñas explotaciones, una tecnología que ofrece numerosos posibles beneficios: reduce la exposición a los plaguicidas, y puede aplicarse en campos demasiado húmedos o problemáticos para el acceso de las máquinas, así como en cultivos en pie, evitando dañar los cultivos por los movimientos de la maquinaria.

Fomento de tecnologías de automatización conocidas por ser respetuosas con el medio ambiente

El concepto de la mecanización adaptada a la escala, en la que las máquinas se adaptan al tamaño de la explotación (y no al revés)[38], puede ayudar a reducir los efectos ambientales negativos. Por ejemplo, los tractores pequeños de dos o cuatro ruedas pueden ejecutar maniobras con mayor facilidad que los grandes alrededor de los elementos del paisaje y los árboles de la explotación. Los pequeños robots de enjambre, actualmente en fase experimental, también pueden generar beneficios ambientales como la reducción de la compactación del suelo, al tiempo que proporcionan mayores rendimientos. Aunque la mayoría de los robots agrícolas que se están desarrollando actualmente tienen una capacidad de decisión muy limitada, a largo plazo, la IA podrá lograr que estos dispositivos resulten útiles para la sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, los robots de enjambre dotados de IA pueden evitar los obstáculos del campo y combatir con precisión las plagas y las malezas, reduciendo así el uso de productos químicos y protegiendo la biodiversidad.

Uno de los desafíos más importantes es ampliar la escala de estas tecnologías; sin ello, es imposible optimizar su potencial para reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente y aumentar la productividad de forma sostenible (véase el Capítulo 3). Los elevados costos de adquisición y funcionamiento representan un considerable obstáculo para la ampliación de su escala, especialmente para los pequeños productores; a fin de aumentar la asequibilidad, es necesario centrar la atención en la mejora de la tecnología y en modelos de negocio innovadores. Los teléfonos móviles son un ejemplo de ello: las posibilidades de ampliación de la escala de uso de estos dispositivos, los hizo mucho más asequibles, allanando el camino a los teléfonos inteligentes, cuyo uso es cada vez más común en la agricultura de precisión.

Los propios agricultores son quienes mejor pueden elegir qué soluciones de mecanización se ajustan a sus condiciones agroecológicas locales. Los gobiernos deben crear un entorno propicio, difundiendo información sobre las tecnologías disponibles y cómo utilizarlas para lograr múltiples objetivos, entre ellos la sostenibilidad ambiental. Un ejemplo de este tipo de apoyo informativo es el catálogo de mecanización elaborado por la FAO en colaboración con el Centro para el Desarrollo de la Infraestructura Agrícola y la Promoción de la Mecanización (CAIDMP) de Nepal y la Asociación de Empresarios de Maquinaria Agrícola de Nepal (NAMEA).

El catálogo contiene información concisa sobre las distintas máquinas disponibles en el mercado nepalí, haciendo especial énfasis en las que tienen en cuenta las cuestiones de género y están adaptadas a la producción agrícola en pequeña escala[29].

Varios gobiernos han introducido leyes dirigidas a mitigar las repercusiones ambientales y sociales negativas de las cadenas de suministro agrícola exigiendo a las empresas que establezcan sistemas obligatorios de diligencia debida basados en el riesgo[39]. Por ejemplo, la Comisión Europea ha aprobado una propuesta de directiva sobre la diligencia debida de las empresas en materia de sostenibilidad, con el objetivo de fomentar un comportamiento empresarial sostenible y responsable en toda la cadena de valor mundial. Las empresas deben identificar, prevenir, erradicar o mitigar los efectos adversos de sus actividades sobre los derechos humanos (por ejemplo, el trabajo infantil y la explotación de los trabajadores) y sobre el medio ambiente (es el caso de la contaminación y la pérdida de biodiversidad). Para las empresas, estas nuevas normas aportarán seguridad jurídica y crearán igualdad de condiciones; para los consumidores y los inversores, proporcionarán una mayor transparencia[40].

Concienciación y mejora de la comunicación

Una de las enseñanzas extraídas de los 27 estudios de casos es que los consumidores aún no reconocen los beneficios de la agricultura de precisión y su potencial en términos de eficiencia, sostenibilidad ambiental y bienestar animal. De hecho, mientras que el término "agricultura de bajos insumos" (y su relación con la sostenibilidad ambiental) es comprendido inmediatamente por los consumidores, el concepto "agricultura de precisión" sigue sin tener eco. En este sentido, la comunicación es fundamental. El hecho de que la agricultura vertical, por ejemplo, no pueda ser etiquetada como ecológica en algunos países dificulta la comunicación de sus beneficios a los consumidores. Las políticas pueden ayudar a priorizar la legislación y certificación en materia de agricultura de precisión para comunicar claramente sus beneficios a los consumidores y reforzar así los argumentos económicos a favor de la inversión (véase el Capítulo 3). Para que la agricultura de precisión consiga materializar sus potenciales beneficios ambientales, es fundamental establecer un diálogo entre los sistemas agroalimentarios en su totalidad[25]. La propia comunicación digital puede desempeñar un papel clave en la concienciación del público, la difusión de información y la promoción de la agricultura de precisión. ■

POLÍTICAS PARA LOGRAR QUE EL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA SEA INCLUSIVO Y FUNCIONE PARA TODOS

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la automatización de la agricultura es el riesgo de dejar atrás a los grupos marginados —como las mujeres, los pequeños productores y los jóvenes—, dado el sesgo de escala de la automatización, que favorece las grandes explotaciones. Los elevados costos de muchas de las tecnologías de automatización existentes, así como los requisitos de cualificación asociados a su uso, pueden dar lugar a un aumento de las desigualdades y a la profundización de las brechas digitales. La automatización puede traer consigo un aumento del desempleo y la pérdida de puestos de trabajo para mano de obra no cualificada; esto no solo puede tener implicaciones negativas para la inclusividad de las tecnologías, sino que puede distorsionar las percepciones respecto de sus beneficios. Las políticas pueden desempeñar un papel fundamental a la hora de mitigar o evitar cualquiera de los efectos negativos mencionados y garantizar que la automatización contribuya a una transformación agrícola inclusiva.

Abordar la brecha tecnológica mediante innovaciones técnicas e institucionales

Las tecnologías más recientes, incluidas las relacionadas con la revolución digital, pueden facilitar que la automatización sea aplicable en todo tipo de explotaciones, con independencia de su tamaño, y, por tanto, que sea más accesible

para todos. La utilización de maquinaria de menor tamaño ha permitido a los pequeños productores automatizar muchas actividades agrícolas (véase el Capítulo 3). Los mecanismos institucionales, como la prestación de servicios compartidos y la propiedad cooperativa facilitada por las tecnologías digitales, han contribuido a la adopción de tecnologías de automatización[41]. Son los agricultores los que deben elegir qué soluciones de automatización se adaptan mejor a sus condiciones agroecológicas locales, mientras que los gobiernos deben crear unas condiciones equitativas. Estos últimos pueden apoyar la aparición de mercados de servicios mediante la mejora de la infraestructura rural, proporcionando un marco jurídico adecuado, facilitando los cruces de fronteras y potenciando los conocimientos y competencias de los proveedores de servicios, incluida la capacitación empresarial. Las organizaciones del tercer sector, como las asociaciones de productores y las cooperativas, pueden ayudar a reducir los costos de transacción del trabajo con pequeños productores, por ejemplo, organizando a los agricultores en grupos[42]. Los instrumentos digitales pueden abordar algunos de los desafíos asociados a los mercados de servicios y reducir los costos de transacción. Los gobiernos pueden facilitar el uso de estos instrumentos mediante el fomento de la conectividad digital, la alfabetización y la confianza[43].

Garantizar que las mujeres se beneficien de la automatización

La automatización puede tener efectos tanto positivos como negativos en las mujeres; tener en cuenta sus necesidades es clave para evitar las repercusiones negativas[26]. Las mujeres suelen tener menos acceso a las tecnologías de automatización, en parte porque poseen parcelas más pequeñas y fragmentadas y les cuesta más acceder a los mercados, al crédito y a la extensión (véase el Capítulo 4). Las políticas, legislación e inversiones que abordan estas desventajas (por ejemplo, mediante la mejora de los derechos de las mujeres sobre la tierra y el acceso al crédito y la extensión) pueden contribuir a aumentar el acceso de las mujeres a la automatización. Es importante adoptar enfoques de seguimiento basados en los derechos humanos, recopilando datos desglosados para medir el efecto en los medios de vida, los derechos y las oportunidades de las mujeres. Los marcos jurídicos nacionales también deben prever evaluaciones del impacto reglamentario que tengan en cuenta las cuestiones de género, así como elaborar y presupuestar medidas destinadas a evitar y mitigar cualquier efecto adverso en las mujeres. Los marcos jurídicos deben tener en cuenta los desafíos específicos de género a los que se enfrentan las mujeres y tomar medidas para abordarlos. Estas medidas pueden consistir en la asignación de recursos financieros para fomentar el emprendimiento mediante la concesión de créditos; la organización de actividades de capacitación (por ejemplo, de alfabetización digital), y la mejora del acceso a los mercados de insumos y productos.

El escaso acceso de las mujeres a la mecanización también es consecuencia de las normas sociales. Entre los posibles puntos de partida para cambiar esta situación cabe citar las campañas de concienciación acerca de las cuestiones de género (por ejemplo, mostrando a las mujeres que son proveedoras de servicios u operadoras de éxito) y el apoyo a cooperativas o asociaciones de fomento de la mecanización integradas por mujeres, en las que estas gestionan colectivamente la maquinaria y pueden obtener acceso al desarrollo de conocimientos y habilidades y a la financiación. Debe reforzarse la labor de investigación para entender mejor cómo mejorar el acceso de las mujeres a la mecanización. La automatización suele acarrear elevados gastos iniciales, lo que repercute negativamente en la competitividad de las mujeres, ya que las empresas que estas gestionan suelen ser de menor tamaño y disponer de menor capacidad de inversión.

Las mujeres también pueden tener menores posibilidades de expresar sus necesidades debido a la falta de empoderamiento[44]. Las políticas, legislación e inversiones que utilizan enfoques de seguimiento basados en los derechos humanos y que aumentan el poder de las mujeres pueden ayudar a estas a expresar mejor sus necesidades. La investigación y el desarrollo públicos pueden centrarse en tecnologías de mecanización que tengan en cuenta las cuestiones de género, adaptando su diseño a las necesidades de las mujeres.

Centrar la atención en la juventud rural con miras a una transición fluida e inclusiva en la era digital

Uno de los principales desafíos para el desarrollo agrícola es la emigración de los jóvenes de las zonas rurales —sobre todo de los que tienen un nivel de estudios superior— lo que entraña el envejecimiento progresivo de la población remanente y graves problemas para mantener la sostenibilidad de la agricultura y los sistemas agroalimentarios. La automatización de la agricultura puede desempeñar un papel fundamental para invertir esta tendencia. Puede cubrir las carencias de mano de obra; las tecnologías digitales pueden estimular el interés de los jóvenes rurales por encontrar trabajo en el sector agroalimentario, incluidas las explotaciones agrícolas, creando nuevas oportunidades de empleo con mejores condiciones de trabajo e ingresos[45].

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, los jóvenes agricultores suelen ser los primeros en adoptar y utilizar las tecnologías de automatización —en parte debido a su mejor acceso a la información y a las tecnologías digitales, como los teléfonos inteligentes— y, por lo tanto, desempeñan un papel decisivo para la automatización digital en la agricultura[25]. Los jóvenes reúnen conocimientos y competencias sobre prácticas agrícolas juntamente con las aptitudes digitales necesarias para utilizar las nuevas tecnologías[46]. Una prioridad de las políticas debería ser la elaboración de un programa específico de automatización agrícola que se dirija a los jóvenes de las zonas rurales y garantice que estos adquieran las habilidades necesarias para realizar nuevos trabajos altamente cualificados. Este programa debería tener como objetivo fomentar las competencias de los jóvenes no solo para la producción agrícola, sino también para realizar actividades de alta tecnología a lo largo de las cadenas de valor agroalimentarias. Esto debería complementarse con apoyo financiero y normativo, así como con actividades de investigación, desarrollo y asistencia técnica a fin de garantizar un enfoque integral para la transformación de los sistemas agroalimentarios. La educación pública puede desempeñar una función determinante para garantizar una transición fluida y un acceso equitativo a las nuevas oportunidades de empleo[47].

Este aspecto es especialmente importante, ya que los jóvenes de las zonas rurales probablemente seguirán abandonando la agricultura, sobre todo en los países de ingresos bajos y medianos, pero pueden pasar a ocupar puestos de trabajo más cualificados en otras etapas de los sistemas agroalimentarios.

Las iniciativas de desarrollo rural dirigidas por la comunidad deben incluir a los jóvenes en las consultas, la planificación y la toma de decisiones. Los marcos jurídicos pueden apoyar estas iniciativas creando un entorno propicio para el desarrollo local, estableciendo cuotas obligatorias de participación de los jóvenes y creando organizaciones juveniles.

Mejorar los servicios de extensión agrícola y asesoramiento rural

Los servicios de extensión financiados con fondos públicos siempre han desempeñado un papel importante para garantizar la automatización agrícola inclusiva. Aparte de las diversas dificultades a las que se enfrentan los pequeños productores, el acceso limitado a servicios de asesoramiento fiables y oportunos es uno de los principales obstáculos que les impiden aumentar la productividad. En todo el mundo, los servicios de extensión financiados públicamente constituyen una parte fundamental de la transformación de la agricultura, ya que representan una importante fuente de información. En muchos países, la extensión sigue utilizando diferentes enfoques. Dada la falta de personal de extensión debidamente capacitado —uno de los principales obstáculos en la mayoría de los países de ingresos bajos y medianos—, la extensión por medios electrónicos, que utiliza modelos digitales para la generación y difusión de conocimientos, es un complemento válido de la extensión tradicional. La ampliación de la escala puede dar lugar a una nueva generación de servicios de extensión que también apoyen soluciones de automatización a medida[48, 49].

Es apremiante recopilar y transformar conocimientos en desuso y ponerlos a disposición de los productores a través de sistemas de aplicación novedosos; estos sistemas pueden adaptar los resultados científicos, ajustando el asesoramiento a productores con diferentes contextos y perfiles. Las enseñanzas extraídas de

dos estudios técnicos elaborados para el presente informe señalan el potencial de los instrumentos digitales para revolucionar los servicios de extensión y asesoramiento; disponer de métodos de aplicación innovadores puede contribuir a un aumento considerable del acceso a los servicios y fomentar las competencias para el uso sostenible de la automatización[25, 33]. En varios casos (por ejemplo, Igara Tea en Uganda; la empresa SOWIT en Marruecos, Túnez, Etiopía y Senegal; y la plataforma en línea Tun Yat en Myanmar), los proveedores de servicios también ofrecen servicios de extensión. Algunos de ellos brindan ayuda integral a los productores agrícolas, lo que incluye asistencia para utilizar el servicio y manejar la maquinaria. Las tecnologías digitales —por ejemplo, el IdC; las grabaciones y llamadas de audio y vídeo en los teléfonos móviles; los sistemas de información geográfica; los modelos de simulación, y la teledetección— pueden ofrecer entornos totalmente nuevos para la transmisión eficaz de conocimientos. Se deben aprovechar y explotar estas tecnologías para subsanar las deficiencias de información existentes y proporcionar la orientación eficaz que necesitan los agricultores. Esto también indica que, además de los servicios de extensión financiados con fondos públicos, las asociaciones entre los sectores público y privado tienen un importante papel que desempeñar en la mejora del acceso de los agricultores al apoyo sobre el terreno. Por último, los instrumentos digitales también pueden facilitar los servicios de asesoramiento agrícola canalizados a través de actividades de agricultura contractual o contratos de la cadena de suministro.

Protección contra los efectos negativos en el empleo

La automatización puede generar una amplia variedad de efectos en el empleo rural, tanto positivos como negativos (véase el Capítulo 4). Cuando surge como respuesta a las fuerzas del mercado (por ejemplo, el aumento de los salarios rurales debido a la transformación estructural) o sustituye a la mano de obra familiar no remunerada, lo más probable es que no genere desempleo, sino que ayude a cubrir las carencias de mano de obra. En cambio, si la automatización se promueve artificialmente, mediante iniciativas públicas a gran escala (por ejemplo, subvenciones a la importación de maquinaria) —sin que su difusión responda a una demanda real—, puede generar efectos negativos como el aumento del desempleo, la eliminación de puestos de trabajo y la caída o el estancamiento de los salarios rurales. Los responsables de la formulación de políticas deben procurar no promover la automatización antes de que esta sea necesaria; sin embargo, tampoco deben impedir su adopción partiendo del supuesto de que sustituirá a la mano de obra y generará desempleo.

Las políticas de apoyo que proporcionan bienes públicos o colectivos a través de servicios generales —contribuyendo a un entorno propicio para el sector agroalimentario y otros ámbitos— son probablemente las más eficaces para facilitar una transición suave hacia una mayor automatización sin que se genere desempleo. Estas políticas incluyen el apoyo a la investigación y el desarrollo agrícolas y los servicios de transferencia de conocimientos (en particular, mediante actividades de capacitación y asistencia técnica), así como el desarrollo y mantenimiento de infraestructura (por ejemplo, mediante la mejora de las carreteras rurales, los sistemas de riego, las instalaciones de almacenamiento y la conectividad a Internet). Los enormes avances en I+D, sobre todo en el sector privado, siguen poniendo nuevas soluciones de automatización agrícola al alcance de los agricultores a un costo cada vez menor. Esto es una buena noticia de cara a la necesidad de aumentar la producción de alimentos, habida cuenta de que la mano de obra agrícola disminuye en todo el mundo.

Fomento de las competencias digitales para la inclusión

Los agricultores y los profesionales de la agricultura deben adquirir competencias para gestionar los nuevos sistemas mediante la automatización agrícola y también para acceder a nuevos puestos de trabajo más cualificados en los sistemas agroalimentarios; este debe ser el objetivo de los gobiernos. La adquisición de competencias es especialmente pertinente para los jóvenes, que constituyen un poder transformador[25]. En algunos contextos, puede ser útil dirigirse a los niños en la escuela, ya que estos tienen la capacidad de desempeñar una función de puente tecnológico para sus padres[41], y, por su parte, las escuelas que ya imparten conocimientos agronómicos y

zootécnicos a los agricultores pueden ampliar su programa de estudios para incluir la alfabetización digital. El acceso a la información es fundamental para que los productores puedan actualizar sus conocimientos en un mundo cada vez más competitivo. Además, la información debe ser siempre un bien público y su suministro es responsabilidad de los gobiernos. Si disponen de competencias y acceso a la información adecuados, las personas que pierdan su empleo a causa de la automatización estarán preparadas para utilizar la nueva tecnología en la explotación o para encontrar un trabajo alternativo en las fases posteriores o anteriores de la cadena de suministro agroalimentario. Asimismo, los productores agrícolas a tiempo parcial también pueden adquirir mejores competencias para encontrar un empleo fuera de la explotación y mejorar y diversificar sus ingresos. ■

CONCLUSIONES

La automatización agrícola es clave para alcanzar los ODS. La edición de 2022 de *El estado mundial de la agricultura y la alimentación* se centra en el potencial de la mecanización y la automatización digital para transformar la agricultura de forma que contribuya a unos sistemas agroalimentarios más eficientes, productivos, sostenibles, inclusivos y resilientes. En el informe se analizan las diferentes limitaciones a las que se enfrentan los productores en relación con la adopción de tecnologías de automatización y se ofrece orientación sobre políticas, legislación, intervenciones e inversiones, teniendo en cuenta la heterogeneidad de los productores agrícolas (grandes y pequeños, mujeres y hombres, ancianos y jóvenes) en todos los sectores de producción, incluidos los cultivos, la ganadería, la acuicultura y la agroforestería.

En el informe también se indica cómo la automatización agrícola puede generar compensaciones recíprocas entre los objetivos económicos, ambientales y sociales, y que el equilibrio adecuado de estas compensaciones depende del contexto. La combinación de tecnologías —así como las políticas, la legislación, las intervenciones y las inversiones adecuadas— que se promuevan dependerán del nivel de desarrollo económico, las instituciones existentes, las condiciones agronómicas locales, las características de los productores y los objetivos de los responsables de la formulación de políticas. Los distintos instrumentos normativos y jurídicos presentados en este capítulo no se excluyen mutuamente. Todo lo contrario: deben complementarse a fin de crear las condiciones adecuadas para la adopción responsable de la automatización agrícola. Los responsables de la formulación de políticas deben tener en cuenta la especificidad del contexto de adopción y comprender los problemas más acuciantes que afronta una zona (por ejemplo, la conectividad, la desigualdad o la pobreza), antes de combinar los instrumentos normativos o jurídicos necesarios para adoptar medidas específicas.

Los agricultores, los proveedores de servicios y los fabricantes pueden tener un incentivo financiero para invertir en tecnologías de automatización, pero no tienen el mismo poder de mercado. Un mensaje clave es que, si bien corresponde a los agricultores elegir las tecnologías que se van a adoptar —de entre el variadísimo conjunto de tecnologías de automatización—, la función principal de las intervenciones públicas es crear un entorno propicio, en el que la innovación pueda prosperar, e incentivos para que el proceso de adopción sea lo más inclusivo posible. Las iniciativas de múltiples partes interesadas, a nivel nacional o internacional, que comparten conocimientos sobre la automatización pueden ser una forma eficaz de superar los obstáculos a la adopción.

En el informe se subraya que para crear un entorno propicio son esenciales inversiones e intervenciones públicas que miran a un amplio desarrollo económico. No obstante, las prioridades serán diferentes, dependiendo de los objetivos finales de los responsables de formular las políticas. Mientras que en los países de ingresos altos la automatización se ve impulsada por los problemas de escasez de mano, en los países de ingresos bajos y medianos la adopción de estas tecnologías puede obedecer más bien al interés por mejorar los medios de vida rurales, así como la seguridad alimentaria y la nutrición en general. Los gobiernos de estos países pueden optar por centrarse en aprovechar

la revolución digital para crear oportunidades de empleo decente que sean accesibles a los grupos vulnerables, incluidos los pequeños productores, las mujeres y los jóvenes, y de esta manera no dejar a nadie atrás mientras se avanza hacia los ODS. Para ello debe prestarse una atención especial a las necesidades específicas de estos grupos, a fin de que la transición sea inclusiva.

En resumen, esperamos que esta edición de *El estado mundial de la agricultura y la alimentación* pueda contribuir al diálogo y al debate sobre cómo aprovechar la automatización agrícola y adoptar medidas favorables a la transformación de los sistemas agroalimentarios a fin de hacerlos más sostenibles, productivos, inclusivos, eficientes y resilientes. ■

UCRANIA
Vista aérea de un campo verde con riego de cultivos circular.
©Volodymyr Rozumii/ Shutterstock.com

ANEXOS

ANEXO 1
Descripción de los estudios de casos 110

ANEXO 2
Cuadros estadísticos 138

ANEXO 1
DESCRIPCIÓN DE LOS ESTUDIOS DE CASOS

METODOLOGÍA DE BASE PARA LOS 27 ESTUDIOS DE CASOS

Los estudios de casos fueron recopilados por un equipo de investigadores de la Universidad y Centro de Investigación de Wageningen y Mariette McCampbell para hacer balance de las tecnologías de automatización agrícola en todo el mundo y analizar los obstáculos que impiden su adopción, así como los factores que la impulsan. Cada caso corresponde a una empresa u organización que ha desarrollado o aplica una o más soluciones que se ajustan a la definición de automatización agrícola presentada en el Capítulo 1. Los estudios de casos se seleccionaron expresamente atendiendo a los criterios siguientes: i) abarcar todas las regiones que cubre el informe SOFA (Ceccarelli *et al.*, 2022) o ser representativo del Sur del mundo (a saber, Asia oriental y sudoriental, Asia meridional, África subsahariana, América Latina y el Caribe) (McCampbell, 2022); ii) abarcar los siguientes sistemas de producción agrícola: cultivos, ganadería, acuicultura y agroforestería; iii) representar una solución de automatización agrícola novedosa, cuya escala es ampliable o ya se ha ampliado, y iv) estar dirigidos a productores agrícolas de pequeña a gran escala. Se recopiló información a través de entrevistas con informantes clave, que se complementó con información sobre agricultura, alfabetización, automatización y políticas y leyes obtenida de datos secundarios nacionales y la bibliografía disponible. Las entrevistas se llevaron a cabo en modalidad virtual en español o inglés y se realizaron grabaciones de sonido e imagen para su transcripción y análisis. Para cada solución, las personas entrevistadas se centraron en la sostenibilidad económica, ambiental y social y en los obstáculos y factores impulsores de la adopción de dicha solución. Se realizó un análisis temático de los datos obtenidos en las entrevistas, utilizando un marco de codificación.

Aunque puede que los 27 estudios de casos seleccionados no representen plenamente la amplia variedad de tecnologías disponibles, ofrecen una visión exhaustiva de las tendencias y adelantos mundiales en materia de automatización agrícola. Los datos relativos a los estudios de casos se emplearon como aportación para dos documentos de base, a saber, un documento elaborado por Ceccarelli *et al.* (2022), en el que se utilizaron datos de 22 casos, y un documento elaborado por McCampbell (2022), en el que utilizaron datos obtenidos de 10 casos; cinco casos se abarcaron en ambos documentos.

FUENTES: McCampbell, 20221; Ceccarelli *et al.*, 20222.

RESUMEN DE LOS ESTUDIOS DE CASOS

ABACO

Año de constitución:
2013

Número actual de usuarios:
No se indica

Opera en:
América del Sur, Asia central, Europa (con sede en Italia)

Sectores destinatarios:
Cultivos, silvicultura, ganadería

Servicios prestados

Una plataforma digital en materia de agricultura de precisión en la que se recogen y comparten datos relativos a la tierra, la agricultura y el tiempo. Otras aplicaciones corresponden al sector de la agricultura orgánica o están relacionadas con la gestión del territorio para su uso por gobiernos nacionales y locales.

Clientes y usuarios destinatarios

Organizaciones de agricultores, agricultores particulares (en pequeña y gran escala) y gobiernos nacionales y locales. Entre otros grupos destinatarios figuran compañías aseguradoras, laboratorios de suelos y operadores de vehículos aéreos no tripulados.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan por suscripciones en varios niveles (agricultores) y contratos de servicios (gobiernos). La oferta se ajusta a las necesidades del cliente y abarca desde un modelo de semipago con funcionalidades limitadas a una suscripción de pago basada en el tamaño de la explotación y otros parámetros.

Factores determinantes

La demanda de tecnologías de agricultura de precisión y la necesidad de cumplir las normas y reglamentos ambientales. En el caso de pequeños productores, existe la posibilidad de uso gratuito durante un período limitado.

Obstáculos

El tiempo necesario para aprender a manejar la plataforma y la necesidad de traducirla a distintos idiomas para su aplicación en otros países. En algunos países, por ejemplo en África, los idiomas locales, además del bajo nivel de implantación de teléfonos inteligentes y la limitada infraestructura informática, se consideran obstáculos que dificultan la adaptación de las soluciones.

Políticas como obstáculo o catalizador

No se señala ningún obstáculo relacionado con las políticas que dificulte la adopción. Los factores relacionados con las políticas que favorecen la adopción son la política agrícola común (PAC) de la Unión Europea y los objetivos en materia de políticas de su Pacto Verde con los correspondientes mecanismos de subvención, así como reglamentos específicos sobre el uso de plaguicidas.

Personas entrevistadas:
Giovanna Roversi y Fabio Slaviero

AEROBOTICS

Año de constitución:
2014

Número actual de usuarios:
300

Opera en:
18 países, incluidos Australia, Chile, España, Estados Unidos de América, Perú, Portugal, Sudáfrica

Sector destinatario:
Árboles frutales y árboles de frutos de cáscara

Servicios prestados

Utilización de sensores e imágenes de drones y vía satélite para la detección temprana de plagas y enfermedades. Aerobotics también ofrece conjuntos de datos específicos de un lugar necesarios para el uso de tecnología de dosis variable (TDV) para las necesidades de riego y fertilizantes, y mide el crecimiento y rendimiento de los árboles, realizando una estimación de los rendimientos y una planificación de la cosecha.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores de frutas y frutos de cáscara a gran escala en 18 países (principalmente de ingresos altos); compañías que ofrecen seguros a los agricultores y elaboradores y minoristas de zumo de fruta.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Basado en una suscripción anual para servicios en distintos niveles. Los productores pagan por hectárea (o por acre) anual o mensualmente. Se agrupan diferentes servicios según las necesidades del cliente y el costo depende de las características que se precisan. Se aplica un modelo de negocio diferente para las compañías aseguradoras de cultivos, que pagan una tarifa por hectárea o acre para recabar datos con fines de inspección o auditoría. En torno a un 95 % de los ingresos de la compañía se genera en los Estados Unidos de América, donde un 40 % proviene del mercado de seguros para cultivos. Las inversiones en la compañía han sido hasta el momento en forma de capital privado.

Factores determinantes

La demanda de aplicación de dosis variable de productos químicos agrícolas, economizando así en su uso y mitigando sus efectos negativos para el medio ambiente. En los Estados Unidos de América, los agricultores acogen favorablemente las innovaciones tecnológicas y las soluciones digitales y, por consiguiente, a Aerobotics.

Obstáculos

La falta de concienciación entre los productores.

Políticas como obstáculo o catalizador

En los Estados Unidos de América, los reglamentos relativos a los drones son claros y su uso está permitido, mientras que en Sudáfrica el cumplimiento de la normativa es muy costoso.

Persona entrevistada:
Benjamin Meltzer

AGRINAPSIS

Año de constitución:
2020

Número actual de usuarios:
Se desconoce

Opera en:
Bolivia (Estado Plurinacional de), Costa Rica, Ecuador, Guatemala, México

Sectores destinatarios:
Todos

Servicios prestados

Una plataforma de redes sociales especializada en agricultura, que permite que los agricultores accedan a conocimientos e información al interactuar con expertos y profesionales.
Los usuarios verifican y califican la información de modo que Agrinapsis puede asegurar que es fiable y de alta calidad. Agrinapsis también posibilita el comercio electrónico entre los agricultores para vender sus productos agrícolas y comprar insumos si es necesario (por ejemplo, semillas, fertilizantes).

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente pequeños agricultores, con especial hincapié en las mujeres y los jóvenes. Sin embargo, todos los actores que participan en la agricultura, desde entidades académicas y estudiantes hasta agrónomos, pueden beneficiarse de la solución.
El uso de la plataforma de comercio electrónico solo está habilitado para agricultores; las grandes explotaciones agrícolas empresariales no tienen permitido su uso.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Financiada por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Se trata de una organización sin fines de lucro, que no obtiene ingresos de los servicios prestados. Dado que el proyecto se encuentra en las primeras fases, es todavía difícil valorar su sostenibilidad.

Factores determinantes

Una gran cantidad de conocimientos sin compartir derivados de las experiencias de pequeños productores. Así pues, Agrinapsis pretende hacer que estos conocimientos sean accesibles en los distintos países, después de verificar su validez.

Se considera un instrumento para democratizar los conocimientos e impulsar un cambio social y ambiental. El aumento de la alfabetización digital, particularmente entre los jóvenes, la unión de las mujeres (especialmente las mujeres de más edad) y el incremento del número de personas influyentes que promueven Agrinapsis han desempeñado un importante papel en la difusión de la plataforma, sobre todo al tratarse de la primera plataforma de redes sociales especializada en agricultura en América Latina.

Obstáculos

La falta de acceso a Internet en zonas remotas y rurales, a pesar de las iniciativas nacionales e internacionales dirigidas a aumentar la conectividad. El analfabetismo digital sigue siendo alto en las zonas rurales, particularmente entre las personas mayores; la integración de los idiomas ha de ser inclusiva (por ejemplo, solo en el Estado Plurinacional de Bolivia hay ocho idiomas oficiales).

Políticas como obstáculo o catalizador

La incertidumbre política puede afectar a la sostenibilidad de la plataforma, ya que se financia con fondos del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, que depende del apoyo de sus 34 Estados miembros.

Persona entrevistada:
Santiago Velez

AQUACONNECT

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
60 000

Opera en:
India

Sector destinatario:
Acuicultura (camarones)

Servicios prestados

Soluciones digitales de acuicultura para supervisar y documentar el rendimiento en explotaciones acuícolas, establecer vínculos entre acuicultores y proveedores de insumos y compradores de producto y apoyar el acceso a financiación, seguros y mercados. Aquaconnect mantiene también centros físicos (AquaHUBs) en comunidades, lo que mejora su conectividad de último tramo, donde los productores pueden comprar insumos, vender productos y obtener servicios de asesoramiento.

Clientes y usuarios destinatarios

Camaroneros en pequeña y mediana escala.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Uso gratuito para acuicultores de soluciones como la aplicación Aquaconnect, el bazar electrónico y la tienda por Internet. Los ingresos provienen de las partes interesadas con las que están conectados los piscicultores (por ejemplo, bancos, compañías de seguros, elaboradores, proveedores de insumos). Los ingresos se generan por cada transacción, a través de los servicios de enlace y la inteligencia de datos proporcionados. Además, se obtiene financiación de capital, que se utiliza para ampliar las operaciones. Hasta el momento, el modelo de negocio es rentable.

Factores determinantes

La demanda creada a raíz del bajo nivel de productividad y la ineficacia de los vínculos de mercado. El servicio permite mejorar la sostenibilidad ambiental, así como la eficiencia, la previsibilidad y la transparencia en la cadena de valor. El interés de los acuicultores en las tecnologías digitales aumenta lentamente.

Contar físicamente con un equipo sobre el terreno facilita la adopción y proporciona respaldo técnico.

Obstáculos

La escasa capacidad de los acuicultores para manejar tecnologías digitales. El elevado costo de la tecnología avanzada, como los dispositivos de IdC, limita su asequibilidad. El volumen de préstamos que los acuicultores pueden obtener por hectárea de tierra tiene un límite máximo que no es suficiente para invertir en equipo y producción acuícola en general. Los importes de las primas de seguros para la acuicultura son considerablemente mayores que para la producción de cultivos.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de la India ha destinado 3 000 millones de USD a la modernización de la agricultura, incluidas las cadenas de valor de la acuicultura y la pesca. Existe interés por parte del Gobierno, manifestado en forma de políticas, en apoyar a empresas incipientes que apliquen tecnologías a lo largo de la cadena de valor. Sin embargo, actualmente no hay subvenciones para la acuicultura y no existe ningún subsidio específico para instrumentos del IdC.

Persona entrevistada:
Sudhakar Velayutham

ATARRAYA

Año de constitución:
2019

Número actual de usuarios:
Se desconoce

Opera en:
Estados Unidos de América, México

Sector destinatario:
Acuicultura (camarón)

Servicios prestados

Shrimpbox: una granja de camarón automatizada y controlada, que se ubica en contenedores para transporte, cajas de camarón (shrimp boxes). En cada caja se utilizan sensores, aprendizaje automatizado, macrodatos, biotecnología y robótica para controlar las actividades acuícolas, incluida la ingesta nutricional, la calidad del agua y el contenido de oxígeno.

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente camaroneros, pero también avicultores que quieren cambiar a la cría de camarón. Se dirige también a restaurantes, universidades, corporaciones y clientes que quieren acceder y ofrecer productos alimentarios marinos frescos y sostenibles. Entre los socios de Atarraya también hay algunos restaurantes.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Todavía no es rentable, porque se encuentra aún en etapa inicial. Shrimpbox dependía anteriormente de subvenciones del Gobierno de México, aunque en la actualidad hay un interés cada vez mayor por parte de inversores privados. El modelo de negocio aún está por decidir. Atarraya no parece dispuesta a gestionar la solución directamente debido a las dificultades para ampliar la escala. La acuicultura por contrato es la opción preferida, en la que Atarraya arrienda la solución; sin embargo, para hacer que esta opción resulte atractiva, la transferencia de tecnología debe ser impecable. Clientes (de China) están interesados en comprar Shrimpbox, pero Atarraya no está preparada para asumir este cometido.

Factores determinantes

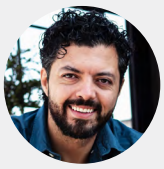
La alta demanda de camarón en todo el mundo, junto con las prácticas nocivas para el medio ambiente de la mayoría de granjas de camarón. Las actuales prácticas se asocian a pérdidas elevadas provocadas por la rápida propagación de enfermedades y causan también la destrucción de manglares, un importante fijador de carbono en el mundo. Por el contrario, el servicio de Atarraya mejora la producción de camarón de forma sostenible y flexible sin tener, por ejemplo, que estar cerca de un océano. Un factor muy importante y prometedor para aumentar la adopción es el cambio generacional: los acuicultores jóvenes están mucho más dispuestos a aplicar las nuevas tecnologías.

Obstáculos

El escepticismo de los camaroneros de más edad, junto con su ubicación remota, lo que provoca oposición a cambiar el modelo de negocio. También la deficiente infraestructura viaria constituyen un importante obstáculo dada la gran logística necesaria.

Políticas como obstáculo o catalizador

Las subvenciones públicas para investigación y desarrollo fueron de ayuda en las primeras etapas, pero actualmente se han finalizado.



Persona entrevistada:
Daniel Russek

CATTLER

Año de constitución:
2019

Número actual de usuarios:
Se desconoce

Opera en:
América Latina y el Caribe, Estados Unidos de América

Sector destinatario:
Ganadería (vacuno)

Servicios prestados

Inicialmente, dos productos independientes: i) un indicador de peso de los animales y ii) la automatización de la gestión de establos. Desde entonces, se ha desarrollado un sistema completo de gestión de explotaciones ganaderas automatizadas, en el que sensores, imágenes por satélite, marcado electrónico y sistemas de alimentación realizan actividades que van desde la alimentación automática y la predicción de tasas de crecimiento diario y nutrición hasta análisis y diagnósticos de salud.

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente ganaderos en mediana y gran escala que tienen de 2 000 a 40 000 cabezas de ganado y trabajan mayormente en el sector de la carne de vacuno (corral de engorde). Actualmente, también se podría dirigir a los operadores en los segmentos de vaca-ternero y ganado de cría en pastizales.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan aún con la venta de los dos productos independientes, accesibles a través de una plataforma informática para equipo móvil y de escritorio, pese a un aumento de la atención en la automatización de todo el sistema. Para gestionarlo, Cattler pasó a un modelo de semipago: el nivel inicial es gratuito, pero se incluyen solo características básicas del producto. Si los usuarios quieren añadir dispositivos o funciones, deben realizar una suscripción que dependerá de qué funcionalidades se incluyan. Aunque la cifra de usuarios se desconoce, se estima que el número de animales que se abarca es de 90 millones en los Estados Unidos de América, 200 millones en el Brasil y 50 millones en Argentina.

Factores determinantes

La disminución de los costos, al ayudar a automatizar varias actividades. Los agricultores en el sector deben realizar cada vez más estas operaciones de una forma más integrada para mejorar la eficiencia.

Obstáculos

El ritmo lento de adopción en los Estados Unidos de América en comparación con Argentina. El motivo aducido es que los agricultores argentinos tienen que ser más dinámicos y competitivos en el mercado internacional.

Políticas como obstáculo o catalizador

El fácil acceso de los agricultores al crédito es un catalizador. En Argentina, la incertidumbre política supone un obstáculo, mientras que, en los Estados Unidos de América, las políticas proteccionistas pueden desalentar a los agricultores para adoptar nuevas soluciones.

Persona entrevistada:
Ignacio Albornoz

COOPECAN

Año de constitución:
2008

Número actual de usuarios:
1 500

Opera en:
Perú

Sector destinatario:
Ganadería (alpaca)

Servicios prestados

Servicios digitales —desde servicios de asesoramiento, monitoreo de pastos y rastreabilidad de los animales hasta la cadena de bloques (introducida en 2020)— para mejorar y certificar los estándares de bienestar animal y la calidad de la fibra de alpaca, incrementando así su valor.

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente pequeños criadores en el altiplano del Perú con rebaños de 50 a 100 animales e ingresos anuales comprendidos entre los 1 500 USD y 1 800 USD. Se dirige también a intermediarios en la cadena de valor de la fibra de alpaca, incluidos distribuidores, proveedores y consumidores que se preocupan por el origen del producto.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Operativo desde 2008. En el último decenio, ha aumentado su alcance y ha desarrollado importantes proyectos para mejorar las condiciones de trabajo, ofreciendo salarios justos y protegiendo el bienestar animal. El servicio se sustenta con fondos externos obtenidos de donantes y no busca generar beneficios.

Factores determinantes

La creciente demanda de transparencia y normas de bienestar animal en la cadena de valor de la fibra de alpaca, que se traduce en un producto de mayor valor.

Obstáculos

La falta de acceso a Internet en zonas remotas y la ausencia de empresas nacionales de tecnologías de la información para apoyar el servicio, además del envejecimiento de los criadores de alpaca. En la actualidad, la mayoría son mujeres y personas mayores, ya que los jóvenes no están interesados en continuar con la cría de alpaca debido a las condiciones de trabajo y el aislamiento. Prefieren recibir educación en las ciudades y luego encontrar trabajos mejor remunerados.

Políticas como obstáculo o catalizador

La incertidumbre política se traduce en frecuentes cambios en las políticas y esto frena el apoyo al sector.

Persona entrevistada:
Dagoberto Fernandez

CROPIN

Año de constitución:
2010

Número actual de usuarios:
225

Opera en:
Presencia mundial (fundamentalmente en el África subsahariana y la India)

Sector destinatario:
Cultivos

Servicios prestados

Plataforma de software que ofrece un sistema completo de gestión de explotaciones agrícolas y agricultores. Utiliza tecnologías como el análisis de macrodatos, IA, sensores de IdC y teledetección para ofrecer información en diferentes niveles de la cadena de valor y ayudar a los administradores a tomar mejores decisiones.

Clientes y usuarios destinatarios

Empresas agrícolas, empresas de producción de semillas, empresas de insumos agrícolas, exportadores de frutas y hortalizas, comerciantes de productos básicos, bancos, instituciones financieras y de micropréstamos, compañías que ofrecen seguros a los agricultores, instituciones y organismos gubernamentales y de desarrollo.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

La cartera de clientes se divide entre el sector empresarial y el sector de desarrollo. La mayoría de los ingresos provienen del sector empresarial (entre el 60 % y el 65 %), que incluye a clientes que trabajan con la agricultura inteligente, el mercado digital y la rastreabilidad de la cadena de suministro. En el caso del sector de desarrollo, proporciona hiperdatos de explotaciones y agricultores locales a los gobiernos, bancos e instituciones de desarrollo a cambio de una donación. Los datos ayudan en último término a los clientes a evaluar la solvencia de los pequeños productores y contribuyen a que los bancos ofrezcan préstamos y seguros a los agricultores.

Factores determinantes

Importantes lagunas de datos e información que provocan asimetrías de información a lo largo de las cadenas de valor, de ahí que se requiera un software basado en los datos. Los clientes del sector empresarial aprovechan sus servicios en el ámbito de la automatización y mecanización de explotaciones individuales para ampliar al máximo el valor por hectárea y la rastreabilidad a nivel de la explotación. Los clientes del sector del desarrollo aprovechan sus modelos de datos agregados y la ciencia de datos y también influyen en la industria por medio de asesoramiento en materia de políticas basado en los datos.

Obstáculos

La falta de activos digitales, la deficiente alfabetización y conectividad de datos, la aversión al riesgo.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Ministerio de Agricultura y Bienestar de los Agricultores en la India ha desarrollado importantes aplicaciones digitales en el marco de la iniciativa Ecosistema Digital de Agricultura de la India para impulsar la adopción de tecnologías entre los agricultores. El mercado agrícola nacional electrónico (eNAM) constituye un portal de comercio electrónico en toda la India a fin de crear un mercado nacional unificado de productos básicos agrícolas. Por último, el Portal agrícola central de transferencia de beneficios directos, que se presentó en 2013, es un portal central unificado para planes agrícolas en todo el país. El portal ayuda a los agricultores a introducir maquinaria agrícola moderna a través de subvenciones gubernamentales.

Persona entrevistada:
Arjun Goyal

EGISTIC

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
Casi 1 500

Opera en:
Kazajstán

Sector destinatario:
Cultivos

Servicios prestados

Solución integrada para monitorear y gestionar zonas de cultivos, que utiliza tecnología de teledetección, navegación por satélite de alta precisión, sistemas de geoinformación y tecnologías de aprendizaje automático.
Los servicios incluyen: análisis (previsión del rendimiento, historial de rotación de cultivos); imágenes de los campos vía satélite; consultas de asesoramiento digital; sistema de seguimiento de posicionamiento mundial por satélite (GPS) con tractores y cosechadoras combinadas; gestión de actividades agrícolas; análisis agroquímico de los suelos.

Clientes y usuarios destinatarios

En su mayoría agricultores en gran escala, pero también distribuidores de alimentos y empresas de productos químicos agrícolas y fertilizantes. La mayoría de usuarios registrados de la plataforma forman parte del grupo de edad entre 18 y 45 años.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan mediante suscripciones anuales para la plataforma. En 2022, la plataforma es sostenible desde un punto de vista financiero y atrae inversores. En 2021, recibió la última partida de subvenciones. La suscripción incluye también apoyo técnico como seminarios web, vídeos y un manual de usuario.

Factores determinantes

El aumento de la demanda entre los agricultores a gran escala de soluciones de gestión de explotaciones agrícolas automatizada. Obtienen un elevado rendimiento de sus inversiones agrícolas gracias al ahorro de combustible en maquinaria agrícola.

Obstáculos

Mala conectividad a la red en las zonas rurales.

Políticas como obstáculo o catalizador

La compañía desea ampliar la escala de sus servicios integrando sus datos y los de los gobiernos, pero los actuales marcos de políticas no cuentan con políticas para las asociaciones entre los sectores público y privado.

Persona entrevistada:
Zhandos Kerimkulov

FOOD AUTONOMY

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
2

Opera en:
Hungría

Sectores destinatarios:
Microvegetales, verduras de hoja, plántulas y plantas para cosmética en contextos de agricultura vertical

Servicios prestados

Varias tecnologías de producción de cultivos, fórmulas y las correspondientes soluciones de equipo informático y software para agricultura vertical, además de explotaciones verticales modulares a gran escala controladas a distancia para aplicaciones industriales y de investigación. Todas las tecnologías ofrecidas están disponibles como servicios independientes o plenamente integradas en explotaciones agrícolas verticales.

Clientes y usuarios destinatarios

Usuarios en pequeña, mediana y gran escala para germinación, investigación y producción.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los actuales fondos para el negocio de agricultura vertical se obtienen fundamentalmente a través de inversiones internas provenientes de la división de negocios de iluminación de los cultivos de plantas en interior de Food Autonomy. Una subvención del Gobierno de Hungría financia el servicio agrícola de investigación. El modelo FaaS (la agricultura como servicio) gestiona la explotación en nombre del usuario, mientras que el modelo PaaS (las plantas como servicio) ofrece al cliente capacidad de producción específica.

Factores determinantes

El aumento de la demanda de productos orgánicos, sostenibles, de alta calidad y asequibles; el mayor interés por la agricultura vertical; el bajo nivel de uso de energía y agua; la posibilidad de producir alimentos localmente cerca de las ciudades y en regiones áridas.

Obstáculos

El elevado costo de inversión inicial.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de Hungría está promoviendo la automatización y las actividades agrícolas basadas en datos. Sin embargo, aunque apoya los alimentos producidos a nivel local, no apoya directamente la agricultura vertical. Asimismo, los reglamentos no reconocen la agricultura vertical como orgánica, aun cuando la producción se realiza en un entorno exento de productos químicos.

Persona entrevistada:
Zoltan Sejpes

GARBAL

Año de constitución:
2017

Número actual de usuarios:
Más de 500 000

Opera en:
Burkina Faso, Malí. (En breve, en el Níger)

Sectores destinatarios:
Ganadería (pastores), cultivos herbáceos

Servicios prestados

Una solución digital integrada que proporciona a pequeños productores y pastores de la región del Sahel información de asesoramiento con un alto grado de contextualización acerca de tierras de pastoreo aptas, migración de rebaños, condiciones meteorológicas, prácticas agrícolas y mercados. La solución utiliza datos satelitales y de otro tipo. También cuenta con un mercado digital para obtener forraje y vender leche y cereales.

Clientes y usuarios destinatarios

Pequeños agricultores, pastores, comerciantes y propietarios de rebaños. Las mujeres representan entre el 22 % y el 30 % de los usuarios.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Basado en una asociación público-privada, fundamental para superar el rechazo de donantes y financiadores al riesgo que supone desarrollar soluciones digitales innovadoras en contextos frágiles. GARBAL depende fundamentalmente de los fondos de donantes y las contribuciones de asociados en el proyecto. Los ingresos provienen de llamadas al servicio de atención telefónica (generados durante la duración de la llamada) o de pagos modestos para utilizar el servicio suplementario de datos no estructurados (USSD). A pesar de estos ingresos, que se vuelven a invertir en la solución, esta se encuentra lejos de alcanzar un punto de equilibrio financiero. La estrategia de negocio consiste en generar nuevos flujos de ingresos a través del mercado digital y una solución de financiación digital.

Factores determinantes

El desafío que el cambio climático y la inseguridad plantean para los conocimientos tradicionales de los agricultores y cuidadores de ganado y la amenaza para los medios de vida de los agricultores. La solución podría mejorar el acceso a los mercados y apoyar la resiliencia y las capacidades de adaptación de los agricultores frente a las perturbaciones. Ser una asociación público-privada es esencial para que los usuarios finales acepten la solución. El fomento de la capacidad y la implantación de teléfonos móviles, aun cuando la mayoría no son teléfonos inteligentes, también facilitan la adopción. Por último, la interacción cara a cara con los agricultores locales, los pastores y sus organizaciones es fundamental para obtener confianza y aumentar la divulgación.

Obstáculos

Las diferentes necesidades entre países, de ahí la importancia de adaptar la solución al contexto de cada país. La inestabilidad e inseguridad políticas en algunos países supone un desafío, como también la falta de infraestructura digital (por ejemplo, energía, conectividad, teléfonos inteligentes). Otros desafíos son la falta de competencias, la escasa concienciación acerca de las ventajas de la tecnología y la ausencia de calidad y gestión de los datos.

Políticas como obstáculo o catalizador

El apoyo de los ministerios locales (por ejemplo, la utilización compartida de bases de datos) ha sido un elemento crucial a la hora de dotar de contenido el servicio de asesoramiento. Sin embargo, la inestabilidad e inseguridad políticas dificultan las inversiones en algunos países.

Persona entrevistada:
Catherine Le Come

GROBOMAC

Año de constitución:
2014

Número actual de usuarios:
No aplicable (la solución todavía se está ensayando)

Opera en:
India

Sector destinatario:
Algodón

Servicios prestados

Una única máquina automática de precisión, semiautónoma, eléctrica y manejada por una sola persona para la recolección de algodón, que puede recoger el algodón sin dañar los cultivos mediante un brazo robótico de alta velocidad asistido por visión artificial y tecnología de IA. Permite realizar una cosecha de precisión de algodón de varias floraciones en sistemas de cultivo en varias hileras.

Clientes y usuarios destinatarios

Inicialmente productores de algodón en mediana y gran escala, con la posibilidad de incluir más adelante a pequeños agricultores. A largo plazo, la maquinaria puede ser gestionada por organizaciones de productores agrícolas, colectivos de agricultores y centros de arrendamiento; en la India se está promoviendo una organización de prestación de servicios para la realización de operaciones agrícolas en un modelo de pago por uso. La maquinaria está pensada para ser utilizada fundamentalmente por mujeres, que constituyen la principal mano de obra en la recolección de algodón de la India.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

No se comercializa todavía. La empresa está apoyada fundamentalmente por inversiones particulares y subvenciones. En el futuro, el objetivo es vender robots individuales directamente a los clientes y, a más largo plazo, a operadores y proveedores de servicios.

Factores determinantes

La escasez de mano de obra durante las temporadas altas.

Obstáculos

Los inversores aún no perciben totalmente los beneficios de la tecnología. Además, se puede tardar mucho tiempo en obtener rendimiento de las inversiones.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de la India apoya a las empresas agrícolas de nueva creación mediante subvenciones. Por ejemplo, GRoboMac recibió una subvención de aproximadamente 30 000 USD. La empresa envió asimismo una propuesta para la recolección de algodón en respuesta a una solicitud de propuestas de "robótica como servicio" en el estado meridional de Telangana en la India.

Persona entrevistada:
Manohar Sambandam

HARVEST CROO ROBOTICS

Año de constitución:
2013

Número actual de usuarios:
Se desconoce

Opera en:
Estados Unidos de América

Sector destinatario:
Fresas

Servicios prestados

Cosechadoras robóticas que se desplazan de manera autónoma por la explotación para recolectar, inspeccionar, limpiar y envasar fresas. Cada cosechadora tiene 16 "brazos" independientes que realizan actividades agrícolas de forma autónoma a lo largo de 16 hileras.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores de fresas a gran escala (más de 10 ha).

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

La solución no se comercializa todavía. Los fondos provienen de inversores privados e instituciones financieras y el sector público desempeña un papel poco relevante. El modelo de negocio que sigue es el de un servicio de pago por uso, donde el importe depende del volumen cosechado. Si la demanda es alta, se prevé dar prioridad a quienes contribuyeron a la inversión en las primeras etapas.

Factores determinantes

La falta de mano de obra y el aumento de su costo, especialmente en períodos de máxima recolección. Como consecuencia, en torno a un 70 % de los productores de fresas en el país han invertido en la compañía. La tecnología se ha probado con éxito en explotaciones reales.

Obstáculos

Ampliar la escala de la fabricación del equipo y los programas informáticos necesarios.

Políticas como obstáculo o catalizador

La Fundación Nacional de Ciencias ofrece un apoyo limitado. Las políticas no se consideran ni un firme impulsor ni un obstáculo explícito.

Persona entrevistada:
Gary Wishnatzki

HORTIKEY

Año de constitución:
2015

Número actual de usuarios:
No se indica

Opera en:
Países Bajos

Sector destinatario:
Tomates

Servicios prestados

Sistema integrado que consta de un robot autodirigido provisto de cámaras, software inteligente que utiliza algoritmos e inteligencia artificial para ofrecer datos fiables y estimaciones sobre los cultivos, en particular el número de tomates y su maduración, a través de mediciones diarias sin necesidad de nueva infraestructura. La información obtenida a partir de los datos, junto con los datos climáticos y meteorológicos, se utilizan para realizar pronósticos de una a cuatro semanas sobre la cosecha específicos de un negocio.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores comerciales de tomate a mediana y gran escala en ambientes controlados, como por ejemplo invernaderos.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan a partir de las ventas de robots y las cuotas de suscripción mensual para el software. De forma alternativa, ambas opciones están disponibles por una cuota mensual total en el marco de un contrato de servicios. En la actualidad, las mejoras se financian con inversiones de los accionistas.

Factores determinantes

El valor que los productores otorgan a la información sobre la previsión de cosechas. La variabilidad de los precios del tomate requiere estimaciones precisas de la capacidad de producción y existe una necesidad de conocimientos especializados en el cultivo de tomates a medida que el tamaño de las explotaciones aumenta.

Obstáculos

El escepticismo de algunos productores de tomate con respecto a la tecnología. La confianza solo se puede ganar con el tiempo.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Programa de conocimientos e innovación de los Países Bajos fomenta la inversión en innovación. En algunos países, hay leyes que impiden el intercambio de datos con otros países, lo que dificulta la expansión a ciertos mercados.

Persona entrevistada:
Andreas Hofland

ICT4BXW

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
Más de 7 000

Opera en:
Rwanda

Sector destinatario:
Bananos

Servicios prestados

Una serie de servicios de asesoramiento e información relativos a la producción de banano, incluida la capacitación en línea. Los servicios están disponibles para teléfonos inteligentes y básicos, junto con información no digital, por ejemplo un calendario de cosechas en papel. Se hace hincapié en el diagnóstico y seguimiento de la enfermedad de marchitamiento por Xanthomonas del banano, al tiempo que se recopilan datos acerca de las tierras agrícolas. Los productores de banano se registran mediante una aplicación para Android que les permite acceder a los servicios, lo que ayuda a los agentes de extensión y funcionarios gubernamentales a vigilar las enfermedades. ICT4BXW utiliza drones para elaborar mapas de las tierras de producción de banano y recopilar información sobre las variedades utilizadas y los cultivos de banano enfermos.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores de banano en pequeña escala, agentes de extensión locales y el Gobierno de Rwanda (fundamentalmente investigadores y técnicos de la Junta de Desarrollo de la Agricultura y los Recursos Animales de Rwanda).

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Actualmente no es rentable. El servicio es gratuito y depende de las donaciones del Ministerio Federal de Cooperación y Desarrollo Económicos de Alemania y, por tanto, no genera ingresos. En el futuro, se espera que el Ministerio de Agricultura rwandés invierta en la solución con planes de avanzar hacia un servicio combinado. Hay dos posibles modelos de negocio: i) ICT4BXW se convierte en un modelo de bien público, o ii) los instrumentos pasan a formar parte de un ecosistema digital mayor en el que los agricultores pagan una pequeña cuota para su uso; un porcentaje de esos ingresos se destina a mantener los servicios de ICT4BXW. Se mantienen asociaciones con empresas con fines de lucro, a saber, Arifu y VIAMO.

Factores determinantes

El aumento de la demanda de soluciones que diagnostican y controlan la enfermedad de marchitamiento por Xanthomonas del banano, la cual amenaza la producción de un importante cultivo alimentario y de seguridad de ingresos en Rwanda. Además, el mayor uso de teléfonos inteligentes y el interés del Gobierno en la utilización de las tecnologías digitales en el sector de la agricultura facilitan la adopción.

Obstáculos

La limitada implantación de teléfonos inteligentes y la escasa alfabetización digital.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de Rwanda fomenta la introducción de teléfonos inteligentes por parte de los agricultores y la digitalización del sector agrícola a través de políticas específicas. En ocasiones también ofrece creación de capacidad sobre el desarrollo y mantenimiento de tecnologías digitales.

Persona entrevistada:
Julius Adewopo

IGARA TEA

Año de constitución:
1969 (inversión en soluciones digitales desde 2017)

Número actual de usuarios:
Más de 7 000

Opera en:
Uganda

Sector destinatario:
Té

Servicios prestados

Mediante el uso de tecnologías digitales: provisión de información sobre los perfiles de los agricultores de té, las lindes de las explotaciones agrícolas, el uso de la tierra y la cubierta terrestre; rastreo, localización y seguimiento de la producción de hojas de té; evaluación del estado de salud de las plantas de té; simulación de la capacidad de producción; transmisión de información a prestamistas; asesoramiento adaptado y servicios de extensión por medios electrónicos; facilitación del acceso al crédito. En el futuro, se contemplan pequeños dispositivos de mecanización para mejorar la precisión y reducir la mano de obra de, por ejemplo, recolectores de hojas de té.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores de té en pequeña escala. Aproximadamente un 18 % de los usuarios son mujeres y los agricultores jóvenes realizan el 65 % del trabajo agrícola. En la elaboración de las hojas de té, las mujeres y los jóvenes constituyen más de la mitad del total de mano de obra. Los bancos y los proveedores de crédito también son destinatarios.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Se financió inicialmente con subvenciones; en la actualidad, se generan ingresos con la venta de té en nombre de los agricultores de té. Igara Tea actúa como comprador, elaborador y vendedor de té. Añade valor y vende el té en mercados locales e internacionales en nombre de sus socios (agricultores de té), que le venden su materia prima. La digitalización ayuda a optimizar las compras, ahorrando hasta el 70 % de los costos asociados a talonarios de recibos, bolígrafos, papel, etc. El tiempo de amortización de las inversiones en equipo y software digitales era de 1,5 años. Hoy en día, sin financiación procedente de subvenciones, la compañía invierte en equipo informático y software.

Factores determinantes

La demanda de un mayor grado de certeza, transparencia y pertinencia temporal para compradores, agricultores y proveedores de préstamos. La evolución de los recolectores de hoja de té se ve impulsada por el aumento de los costos de mano de obra.

Obstáculos

La limitada capacidad para la elaboración de hojas de té dificulta la expansión; los bajos precios del té en todo el mundo; la falta de capacidad financiera de los agricultores para invertir en maquinaria. Igara Tea está considerando la posibilidad de desarrollar un plan de mecanización compartida.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de Uganda está decidido a avanzar en el uso de soluciones tecnológicas para resolver los desafíos del país en materia de desarrollo. Sin embargo, sigue resultando difícil obtener apoyo financiero del Gobierno. Los altos niveles de burocracia se traducen en costos más altos y hay falta de reglamentos y políticas claras sobre el uso de drones.

Persona entrevistada:
Hamlus Owoyesiga

IOCROPS

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
Más de 200

Opera en:
República de Corea

Sector destinatario:
Cultivos en interior (por ejemplo, tomates y pimientos morrones en invernaderos)

Servicios prestados

Soluciones de gestión de cultivos autónomas, que incluyen la vigilancia climática en explotaciones agrícolas en interior; una plataforma de análisis de datos y formulación de decisiones; asesoramiento sobre gestión de cultivos y previsiones; cultivo automatizado; operaciones agrícolas a distancia para gestionar explotaciones en todo el mundo sin necesidad de administradores de invernaderos especializados en cada explotación agrícola.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores de invernaderos en mediana y gran escala. Se estima que en la República de Corea menos del 10 % de los invernaderos son propiedad de mujeres y menos del 30 % de jóvenes.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan con la venta de sensores y soluciones basadas en la web. La empresa ioCrops también alquila invernaderos automatizados y controla todas las operaciones de las plantas del invernadero, que van desde la gestión climática y de cultivos hasta la gestión de la mano de obra y la logística poscosecha. La mayoría de las inversiones provienen de fondos de capital de riesgo, con una pequeña contribución procedente de subvenciones.

Factores determinantes

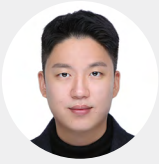
La necesidad cada vez mayor de soluciones de automatización a medida que el tamaño de las explotaciones aumenta. La superficie de cobertura de los invernaderos está aumentando, al igual que el número de productores a gran escala. La generación más joven se muestra más dispuesta a adoptar soluciones de tecnologías de la información. Los salarios aumentan y la oferta de mano de obra disminuye.

Obstáculos

El escepticismo entre algunos agricultores con respecto a las soluciones de alta tecnología. Existe también el riesgo de que esta tecnología excluya del negocio a los pequeños productores.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de la República de Corea está invirtiendo en invernaderos de alta tecnología, en particular proporcionando formación a operadores y permitiendo que las empresas como ioCrops realicen ensayos. Al mismo tiempo, el Gobierno se muestra preocupado por el hecho de que estas soluciones perjudiquen a los pequeños productores, de manera que hay iniciativas paralelas para mantener sistemas más tradicionales



Persona entrevistada:
JinHyung Cho

JUSTDIGGIT

Año de constitución:
2009

Número actual de usuarios:
Más de 700 000

Opera en:
Kenya, la República Unida de Tanzanía

Sectores destinatarios:
Árboles, hierba

Servicios prestados

Soluciones digitales y de comunicación (por ejemplo, SMS, aplicaciones para teléfonos, drones, imágenes satelitales, aprendizaje automático) para fomentar la restauración del paisaje a gran escala en África, como por ejemplo convertir los pastizales degradados por los pastores masái en Kenya en tierras verdes y fértiles. De manera específica, estas soluciones informan a los agricultores sobre la restauración del paisaje, hacen un seguimiento del crecimiento de los árboles y el cambio del paisaje con el paso del tiempo y pueden también calcular los volúmenes de fijación de carbono conexos. Justddigit también ayuda a las mujeres a vender cultivos y semillas de hierba autóctonos.

Clientes y usuarios destinatarios

Agricultores en pequeña escala y de subsistencia y pastores. Justdiggit también trabaja con capacitadores —la mitad de ellos son mujeres— que instruyen a agricultores en materia de agroforestería y reverdecimiento de tierras.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Organización sin fines de lucro que depende de la financiación procedente de subvenciones. Trabaja con una gran red de medios de comunicación asociados que ejercen su actividad en los Países bajos y África para recabar fondos y crear concienciación. Justdiggit recibe donaciones de consumidores particulares, empresas privadas, instituciones mayores y programas de financiación, así como algunas fundaciones familiares.
La organización ha registrado un crecimiento constante. La cifra de personal aumentó de cuatro a 40 en unos siete años. El objetivo es volverse menos dependiente de las donaciones a fin de facilitar la ampliación de la escala.

Factores determinantes

Mayor concienciación acerca de la aceleración del cambio climático. La solución aumenta los rendimientos de los cultivos y la disponibilidad de agua, lo que incide de forma positiva en los ingresos y medios de vida, y reduce la erosión de los suelos y la escorrentía. Hay un interés cada vez mayor en las soluciones basadas en la naturaleza y el reverdecimiento.

Obstáculos

La escasa implantación de la telefonía inteligente, el analfabetismo digital y el acceso limitado a Internet. En muchos casos es necesario el fomento de la capacidad digital de los capacitadores.

Políticas como obstáculo o catalizador

En Kenya, la subdivisión de tierras puede provocar recelo, pues los propietarios de tierras deciden si la tierra sigue siendo pública o si es propiedad privada y se subdivide en parcelas más pequeñas.

Persona entrevistada:
Sander de Haas

LELY

Año de constitución:
1948

Número actual de usuarios:
Más de 25 000

Opera en:
América del Norte, Australia, Europa

Sector destinatario:
Lácteo

Servicios prestados

Soluciones de robótica y de software (de gestión) para la ganadería lechera. De manera específica, proporciona robots estacionarios de ordeño, abono y alimentación y está desarrollando soluciones de gestión de establos (para controlar las emisiones de gases) así como robots segadores de hierba. Además, el software de gestión proporciona información y servicios de asesoramiento sobre todas las actividades agrícolas, en particular la salud y el bienestar de los animales.

Clientes y usuarios destinatarios

Productores lácteos en mediana y gran escala, pero no los de mayor tamaño.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan mediante la venta de estas soluciones y los contratos de servicios. Ofrece estructuras de alquiler financieras y operacionales, que conducen a una mayor adopción por parte de los agricultores. También recibe fondos mediante subvenciones nacionales y de la Unión Europea. El volumen de negocio se estima en 650 millones de EUR, de los cuales una parte importante se vuelve a invertir en investigación e innovación.

Factores determinantes

La demanda de calendarios de trabajo más flexibles y labores menos pesadas; la escasez de mano de obra; el cumplimiento de los reglamentos ambientales (por ejemplo, la reducción de emisiones en las explotaciones lácteas); la preocupación respecto del bienestar de los animales; la prestación de servicios financieros; mejoras en la eficiencia energética y la utilización de fuentes de energía renovable. Las soluciones ofrecidas son fáciles de integrar para las explotaciones convencionales.

Obstáculos

No se mencionan.

Políticas como obstáculo o catalizador

Por un lado, los factores relacionados con las políticas que impulsan la adopción consisten en reglamentos ambientales y de bienestar de los animales y programas de subvenciones para invertir en soluciones para establos que reducen las emisiones. Por otro lado, la adopción puede ser lenta, ya que los agricultores esperan a recibir las subvenciones antes de invertir. Los debates sobre nuevos reglamentos relativos al movimiento libre y el comportamiento natural de los animales necesitan estrategias nuevas para adaptar las soluciones de ordeño que se ofrecen actualmente.

Persona entrevistada:
Martijn Bruggeman

SEED INNOVATIONS

Año de constitución:
2019

Número actual de usuarios:
1 500

Opera en:
Nepal

Sector destinatario:
Cultivos

Servicios prestados

Una aplicación para Android —PlantSat— para que los agricultores utilicen análisis basados en satélites con el fin de hacer un seguimiento del rendimiento de los cultivos, incluida la determinación de amenazas como las carencias o excedentes de agua y nutrientes, y acceder e intercambiar información agronómica.
Los servicios integrados incluyen: la detección de amenazas para la producción, el cálculo de nitrógeno y humedad de las plantas, notificaciones del calendario agrícola, asistencia de expertos, información meteorológica y registro de datos agrícolas. Una solución simplificada de servicios combinados, que reduce la necesidad de conectividad de los datos (entrada de datos fuera de línea) y disminuye el costo de operación (por ejemplo, limitando el espacio de servidor necesario para almacenar datos).

Clientes y usuarios destinatarios

En su mayoría agricultores de mediana a gran escala para servicios de asesoramiento basado en el uso de satélites y pequeños productores orientados al mercado para servicios de asesoramiento general.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Actualmente la solución es gratis para los agricultores. En el futuro, venderá planes de suscripción anual a compañías aseguradoras, que entonces obtendrán acceso a la información recopilada y podrán así realizar un seguimiento del rendimiento de los cultivos y los agricultores y la admisibilidad de las reclamaciones al seguro. Aproximadamente el 40 % de la financiación proviene de subvenciones.

Factores determinantes

La disminución de la necesidad de conectividad y el bajo costo de la solución.

Obstáculos

El escepticismo con respecto a las nuevas tecnologías.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de Nepal apoya a los agricultores de ingresos bajos para que se afilien a planes de seguros subvencionando el 75 % de su prima. Por otra parte, no hay una protección rigurosa de la privacidad, seguridad de los datos o políticas y reglamentos sobre propiedad intelectual que frenen la adopción.

Persona entrevistada:
Suman Ghimire

SEETREE

Año de constitución:
2017

Número actual de usuarios:
Más de 3 000

Opera en:
Brasil, Chile, España, Estados Unidos de América, Grecia, México, Portugal, Sudáfrica (análisis de datos, investigación y desarrollo en Israel)

Sector destinatario:
Árboles frutales y árboles de frutos de cáscara

Servicios prestados

Soluciones digitales a través de una plataforma de inteligencia de datos para hacer el seguimiento de la salud de los árboles, la optimización y crecimiento del fruto, gestionar los inventarios y la producción, estimar el rendimiento, rastrear las operaciones agrícolas y medir su repercusión.

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente productores a gran escala, además de cooperativas de fruta a fin de llegar a los pequeños productores.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Se basa en una suscripción anual para acceder a la plataforma de inteligencia de datos a través de una aplicación basada en la web o una aplicación para móviles. Los servicios ayudan a los productores a utilizar los recursos de forma precisa, realizar la gestión de inventarios y aprovechar mejor las horas de trabajo. La plataforma genera actualmente unos ingresos anuales de entre 30 USD y 100 USD por hectárea; cuanto más grande es la propiedad de tierra, menor es el precio por hectárea.

Factores determinantes

La enorme demanda entre productores a gran escala con grandes propiedades de tierra de soluciones que aumenten la productividad y la eficiencia en el uso de los recursos y reduzcan la incertidumbre en cuanto al rendimiento y los precios de mercado. Hay asimismo un creciente interés por la fijación de carbono para obtener derechos de emisión de carbono.

Obstáculos

El escepticismo de los productores respecto de las tecnologías digitales y la limitada alfabetización digital, que impiden comprender el valor de la solución a partir de demostraciones piloto. Por otra parte, los productores esperan un centro de servicios integrados para la aplicación de las recomendaciones formuladas mediante la toma de decisiones impulsadas por los datos y el establecimiento de redes con actores de las cadenas de valor locales. En algunas regiones, los débiles vínculos de mercado entre los proveedores de insumos están frenando la adopción e impidiendo que algunos productores accedan a las recomendaciones y las apliquen.

Políticas como obstáculo o catalizador

No aplicable.

Persona entrevistada:
Israel Talpaz

SOWIT

Año de constitución:
2017

Número actual de usuarios:
Más de 17 490

Opera en:
Etiopía, Marruecos, Senegal, Túnez

Sectores destinatarios:
Fruta, cereales, colza

Servicios prestados

Instrumentos de apoyo a la adopción de decisiones e información, principalmente en cuanto a riego, fertilización y estimación del rendimiento.

Clientes y usuarios destinatarios

Agroempresas a gran escala y agricultores en pequeña y mediana escala. En Marruecos, más del 20 % de los agricultores a los que se presta servicio son mujeres. El personal de SOWIT presenta también una gran proporción de mujeres (44 %) y todos los empleados pertenecen a la categoría de jóvenes.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Se basa en una suscripción anual. El precio anual por hectárea oscila entre 10 y 70 USD en función del número de instrumentos de apoyo para la toma de decisiones solicitado, incluidas interfaces de acceso multilingüe en dispositivos móviles y en la web. Desde su constitución, SOWIT ha obtenido financiación mediante la captación de fondos de capital y subvenciones de organismos de desarrollo como la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. En 2021, la financiación a través de subvenciones supuso el 25 % de la cifra de negocio.

Factores determinantes

Los efectos del cambio climático y otros factores en la disponibilidad de agua para riego y la necesidad cada vez mayor de optimizar su uso. De ahí la demanda de un sistema que ofrece recomendaciones diarias sobre riego específicas de cada lugar. La solución puede asimismo optimizar el uso de fertilizantes, cuyo costo también está aumentando. Cada vez más, las compañías aseguradoras tienen que ofrecer pólizas de seguros de cultivos asequibles. SOWIT ofrece una alternativa a los seguros indexados, ya que puede proporcionar estimaciones de rendimiento basándose en la situación real. Un agricultor puede asegurar un cultivo por el rendimiento previsto, que corresponde al rendimiento promedio en la zona agroclimática concreta.

Obstáculos

En Marruecos, los obstáculos a la importación de tecnología y las limitadas opciones de pago digital para los clientes.

Políticas como obstáculo o catalizador

En Marruecos, el Gobierno está invirtiendo en la innovación del sector agrícola, por ejemplo fomentando la iniciativa empresarial agrícola entre los jóvenes, reforzando el papel de las cooperativas agrícolas y desarrollando subvenciones nuevas para soluciones digitales. En concreto, la estrategia Generation Green 2020-2030 pretende conectar a dos millones de agricultores a plataformas digitales, incluida SOWIT. Por otro lado, la ausencia de reglamentos en cuanto al uso de drones supone un obstáculo para el desarrollo de la tecnología. Por este motivo, SOWIT cambió a la teledetección.

Persona entrevistada:
Hamza Rkha Chaham

TRASEABLE SOLUTIONS

Año de constitución:
2018

Número actual de usuarios:
Más de 2 000

Opera en:
Fiji, Islas Cook, Islas Salomón, Papua Nueva Guinea, Samoa, Tonga, Vanuatu

Sectores destinatarios:
Cultivos, atún, madera

Servicios prestados

Un conjunto de instrumentos digitales que proporcionan a los agricultores información sobre la industria agrícola, así como sobre sus propias explotaciones, incluidos recursos, inventario, ventas y gastos. La solución también ayuda a crear vínculos de mercado. Además, la compañía ofrece una solución centrada en la pesca del atún, que implica el etiquetado y seguimiento de cada atún a lo largo de la cadena de valor. La solución incluye la gestión de la flota, proporcionando información sobre la tripulación, los gastos de funcionamiento y mantenimiento, los detalles de la captura del atún, etc.

Clientes y usuarios destinatarios

La mayoría son pequeños productores, además de algún productor en mediana escala, así como organizaciones de agricultores y agronegocios (principalmente aquellos que participan en la exportación de productos). Las mujeres y los jóvenes representan aproximadamente un 40 % y un 15 % de los usuarios, respectivamente. Entre los clientes figuran principalmente organizaciones de desarrollo interesadas en los datos a escala regional.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los agricultores pueden descargar la solución sin costo, pero hay una suscripción por niveles que pueden pagar las organizaciones de agricultores, los agronegocios, las plantas de pescado y de elaboración que deseen acceder a los servicios. La compañía ofrece servicios de consultoría, que suponen la mayor parte de los ingresos, y ha recibido subvenciones para financiar su negocio.

Factores determinantes

El creciente interés entre los productores, especialmente exportadores, por la recopilación barata y eficaz de datos; el aumento del interés entre las organizaciones de agricultores por la creación de capacidad y los servicios de asesoramiento; la necesidad de cumplir las normativas en materia de inocuidad de los alimentos y la rastreabilidad. La pandemia de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) aceleró la aceptación de las soluciones digitales y el interés por ellas. Los organismos de desarrollo consideran que la capacidad de TraSeable Solutions de creación de redes en toda la región y recopilación de datos es una propuesta de interesante valor.

Obstáculos

Los estrictos reglamentos en materia de datos que dificultan la creación y gestión de soluciones digitales. El nivel de alfabetización digital entre los agricultores es bajo.

Políticas como obstáculo o catalizador

No se mencionan.

Persona entrevistada:
Kenneth Katafono

TROTRO TRACTOR

Año de constitución:
2016

Número actual de usuarios:
75 000

Opera en:
Benin, Ghana, Nigeria, Togo, Zambia, Zimbabwe

Sector destinatario:
Cultivos herbáceos

Servicios prestados

Plataforma digital de alquiler que pone en contacto a pequeños productores con una amplia gama de maquinaria y equipo agrícola y con los propietarios de esas máquinas, que prestan servicios de arrendamiento. Recientemente, los propietarios de drones han comenzado a ofrecer sus servicios, por ejemplo cartografía y pulverización. Todas las máquinas están provistas de dispositivos de rastreo de IdC de TROTRO.

Clientes y usuarios destinatarios

Pequeños agricultores, aunque algunos son agricultores de mediana a gran escala, y cada vez más empresas relacionadas con la agricultura por contrato. Casi un 40 % de los clientes son mujeres y a la empresa le gustaría aumentar este porcentaje.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los principales ingresos provienen de las cuotas de intermediación (10 % por cada transacción) recibidas por cada servicio de maquinaria agrícola que se contrata. Otros ingresos se generan mediante la venta de su dispositivo de seguimiento GNSS de IdC (la compra de este dispositivo es obligatoria para los propietarios que arriendan equipo a través de su plataforma). La compañía es rentable en todos los países en los que opera, salvo en Ghana, debido posiblemente a que solo cerca del 40 % de los usuarios registrados son clientes regulares. La compañía depende en parte de subvenciones, que utiliza fundamentalmente para ampliar el negocio.

Factores determinantes

Tractores inasequibles para la mayoría de pequeños agricultores, que deben alquilarlos para poder mecanizarse. La plataforma permite transparencia y acceso fiable —esto no es posible en los mecanismos de mercado tradicionales—. Las agricultoras utilizan cada vez más el servicio, ya que las protege de la discriminación derivada de las normas sociales. Los agricultores jóvenes también prefieren este servicio, pues suelen ser más dinámicos y estar más dispuestos a adoptar soluciones innovadoras; algunos jóvenes están recibiendo capacitación como operadores de maquinaria. La pandemia de la COVID-19 aceleró la digitalización de la agricultura e impulsó esta solución. El uso de drones se ve impulsado por la creciente demanda por parte de los agricultores de contar con información precisa sobre las tierras que les ayude a obtener financiación, créditos y seguros.

Obstáculos

El aumento de los precios del combustible, que hace que el servicio sea inaccesible para algunos agricultores; la falta de crédito y financiación para que los operadores compren maquinaria y luego la alquilen a agricultores. Las deficiencias en la infraestructura viaria pueden impedir el desplazamiento de la maquinaria para poder disponer del servicio en diferentes zonas.

Políticas como obstáculo o catalizador

La provisión de subsidios e incentivos para que los agricultores produzcan cultivos básicos alentó la mecanización, además de las inversiones en infraestructura y tecnologías digitales.

Persona entrevistada:
Kamal Yakub

TUN YAT

Año de constitución:
2017

Número actual de usuarios:
Más de 20 000

Opera en:
Myanmar

Sectores destinatarios:
Fundamentalmente arroz, frijoles mung, sésamo, cacahuetes, maíz

Servicios prestados

Servicios de mecanización en las regiones del delta y áridas de Myanmar. Tun Yat posee su propia flota de tractores y actúa de intermediaria entre los propietarios de maquinaria y los agricultores.

Clientes y usuarios destinatarios

Principalmente pequeños productores, pero también agricultores en mediana escala. Aproximadamente un 30 % de los usuarios son mujeres y entre el 25 % y el 30 % son jóvenes de menos de 30 años.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Los ingresos se generan mediante el pago por servicio, ya sea por acre o por hora. Los mayores márgenes se obtienen de los servicios directos en los que utilizan su propia flota. Los márgenes más pequeños provienen de los servicios de intermediación. Tun Yat también genera ingresos llevando a cabo investigaciones en el Asia sudoriental.

Factores determinantes

La falta de capacidad de los agricultores para costearse su propia maquinaria; la poca fiabilidad de la prestación de servicios de esta maquinaria; el aumento de la implantación de móviles y teléfonos inteligentes.

Obstáculos

El aumento de los precios de los insumos y el combustible y la posibilidad de los usuarios de eludir el servicio de intermediación de Tun Yat una vez que se conocen entre ellos; la escasa alfabetización digital y conectividad; los bajos niveles de confianza, por ejemplo en los pagos mediante dispositivos móviles; la necesidad de asistencia tecnológica y fomento de la capacidad.

Políticas como obstáculo o catalizador

El Gobierno de Myanmar está comprometido con las políticas digitales, pero la actual situación política de incertidumbre dificulta la innovación y la inversión. Por otra parte, las políticas existentes relativas a la digitalización y el uso de datos se centran más en la seguridad y vigilancia cibernéticas, lo que también puede frenar la adopción.

Persona entrevistada:
Hujjat Nadarajah

URBANAGROW

Año de constitución:
2019

Número actual de usuarios:
Se desconoce

Opera en:
Chile

Sector destinatario:
Hortalizas de hoja

Servicios prestados

Unidades modulares para agricultura vertical en un ambiente muy controlado. Los productos son en su mayoría hortalizas de hoja como la lechuga y la albahaca. Las explotaciones agrícolas utilizan luces LED y sensores para controlar la temperatura y la humedad, además de un sistema de reciclado de agua para reducir al mínimo el consumo.
La producción se adapta a las necesidades de los clientes.

Clientes y usuarios destinatarios

Todos los operadores al final de la cadena de suministro de alimentos, incluidos minoristas, supermercados, restaurantes, consumidores y ocasionalmente gobiernos, que quieren producir hortalizas de hoja frescas para su venta o para consumo propio.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

Se encuentra todavía en la etapa inicial, pero pronto estará disponible comercialmente.
Se mantiene también gracias a colaboradores internacionales, por ejemplo el Instituto Fraunhofer de Alemania. Tiene en proyecto vender granjas modulares en un ambiente controlado, con todo lo necesario para que los cultivos crezcan según el tipo y la cantidad de hortalizas que cada cliente necesita.

Factores determinantes

El aumento de la demanda de productos frescos, especialmente en zonas más remotas en las que la agricultura no resulta viable debido a las condiciones climáticas. La tecnología también responde al aumento de la demanda de productos frescos, inocuos, de alta calidad y sostenibles desde el punto de vista ambiental. La creciente adopción de tecnología 5G actuará como elemento facilitador, ya que se necesita buena conectividad.

Obstáculos

El escepticismo entre algunos productores agrícolas y consumidores con respecto a la agricultura controlada. Existe asimismo falta de concienciación sobre los problemas relacionados con el cambio climático y otros problemas ambientales, lo cual reduce el valor añadido del servicio.

Políticas como obstáculo o catalizador

El aumento de las normas ambientales en la agricultura impulsa la adopción; sin embargo, la falta de claridad en los reglamentos sobre el uso de productos químicos agrícolas posibilita que los competidores produzcan alimentos que, aunque son de menor calidad, tienen precios más bajos.

Personas entrevistadas:
Maricruz Larrera y Eduardo Vásquez

ZLTO

Año de constitución:
2013

Número actual de usuarios:
13 000

Opera en:
Países Bajos

Sectores destinatarios:
Horticultura, ganadería (incluida la producción láctea), cultivos herbáceos

Servicios prestados

Asistencia técnica y servicios de asesoramiento sobre digitalización y gestión de datos.
En cooperación con el Organismo de Fomento Empresarial de los Países Bajos (RVO), la organización de agricultores Organización de Agricultura y Horticultura del Sur (ZLTO) también pone en contacto a agricultores con proveedores y apoya procesos de innovación para los agricultores, teniendo la agricultura de precisión y la producción ganadera como actividades principales.

Clientes y usuarios destinatarios

Miembros de la organización. Las principales actividades a las que se dirige son la horticultura, la cría de cerdos, la producción láctea y la producción de cultivos herbáceos.

Modelo de negocio y sostenibilidad financiera

No es directamente aplicable a ZLTO, ya que no es un proveedor de soluciones.

Factores determinantes

El conocimiento de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) entre los agricultores jóvenes y su interés por estas.
La oferta de mano de obra constituye otro factor determinante: existe una falta de mano de obra poco cualificada que impulsa la adopción de la robotización y la automatización, así como una abundancia de mano de obra especializada que quiere trabajar con tecnologías digitales y tiene capacidad para ello.

Obstáculos

Los agricultores no perciben totalmente los beneficios de invertir en maquinaria y tecnologías digitales. Existe incertidumbre acerca del rendimiento económico de la inversión en nuevo equipo y la capacitación para aprender a manejarlo.

Políticas como obstáculo o catalizador

No se señala ningún obstáculo relativo a las políticas que dificulte la adopción. Por lo que respecta a los factores determinantes, la ZLTO está llevando a cabo proyectos de difusión que incorporan la agricultura de precisión, la automatización y la robótica. Asimismo, la Unión Europea está fomentando una política de intercambio de datos agrícolas y considerando la posibilidad de convertirla en un bien público.

Personas entrevistadas:
Peter Paree (ZLTO) y Folkwin Polemen (RVO)

ANEXO 2
CUADROS ESTADÍSTICOS

CUADRO A2.1 UTILIZACIÓN DE TRACTORES POR CADA 1 000 HECTÁREAS DE TIERRA CULTIVABLE, AÑO MÁS RECIENTE DISPONIBLE

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
MUNDO				
ÁFRICA				
África septentrional				
Argelia	2008	104 529	7 489	14,0
Egipto*	2009	110 304	2 884	38,2
Libia	2000	39 733	1 815	21,9
Marruecos	1999	43 226	8 818	4,9
Sáhara occidental	1975	11	2	5,5
Túnez*	2008	42 783	2 835	15,1
África subsahariana				
África oriental				
Burundi	1992	170	930	0,2
Djibouti	2006	6	1	4,6
Eritrea	2000	463	560	0,8
Kenya	2002	12 844	5 091	2,5
Madagascar	2004	550	2 950	0,2
Malawi	1968	692	1 800	0,4
Mauricio	1968	283	100	2,8
Mayotte	2003	14	7	1,9
Mozambique	1970	4 193	2 785	1,5
República Unida de Tanzanía	2002	21 207	8 600	2,5
Reunión	2005	2 941	35	84,0
Rwanda	2002	56	1 116	0,1
Seychelles	1974	30	1	30,0
Somalia	2006	1 371	1 140	1,2
Uganda	1977	2 076	4 023	0,5
Zambia	1987	5 628	2 568	2,2
Zimbabwe	1997	22 496	3 500	6,4
África central				
Angola	1971	8 108	2 900	2,8
Camerún	1991	508	5 950	0,1
Chad	1965	27	2 897	0,0
Congo	1974	647	526	1,2
República Centroafricana	1969	56	1 760	0,0
República Democrática del Congo	1971	1 062	6 470	0,2
Santo Tomé y Príncipe	1971	117	1	117,0

CUADRO A2.1 (Continuación)

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
África meridional				
Botswana	2008	3 371	279	12,1
Eswatini	2007	1 550	178	8,7
Lesotho	1995	2 000	320	6,3
Sudáfrica	2004	63 200	13 300	4,8
África occidental				
Ascensión, Santa Elena y Tristán de Acuña	1996	12	4	3,0
Benin	1998	182	2 250	0,1
Burkina Faso	1995	1 933	3 380	0,6
Cabo Verde	2004	56	48	1,2
Côte d'Ivoire	2001	8 981	2 800	3,2
Gambia*	2009	100	428	0,2
Ghana	2005	1 807	4 076	0,4
Guinea	2000	5 388	2 149	2,5
Guinea-Bissau	1996	19	270	0,1
Malí	2007	1 300	5 808	0,2
Mauritania	2006	390	400	1,0
Níger*	2006	375	14 137	0,0
Nigeria	2007	24 800	37 000	0,7
Senegal	2004	645	2 987	0,2
Sierra Leona	1997	81	484	0,2
Togo*	2008	159	2 340	0,1
AMÉRICA				
América Latina y el Caribe				
Caribe				
Antigua y Barbuda	1976	228	3	76,0
Bahamas	1996	98	6	16,3
Barbados	1989	577	16	36,1
Cuba	2007	72 602	3 573	20,3
Dominica	1968	54	7	7,7
Granada	1999	12	1	12,0
Guadalupe	2005	853	19	44,9
Haití	1998	146	900	0,2
Islas Vírgenes Británicas	1987	3	3	1,0
Islas Vírgenes de los Estados Unidos	2007	119	1	119,0
Jamaica	1970	1 745	145	12,0
Martinica	2005	873	10	87,3
Montserrat	1987	12	2	6,0
Puerto Rico	2007	3 255	37	88,2

CUADRO A2.1 (Continuación)

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
República Dominicana*	2009	51	800	0,1
Saint Kitts y Nevis*	2009	26	4	6,5
San Vicente y las Granadinas	2003	112	2	56,0
Santa Lucía	2007	14	2	5,8
Trinidad y Tabago	2004	5 129	26	197,3
América Central				
Belice	1985	940	43	21,9
Costa Rica	1973	5 432	283	19,2
El Salvador	1971	2 642	488	5,4
Guatemala	1970	3 150	1 100	2,9
Honduras	2000	5 200	1 068	4,9
México	2007	238 830	23 519	10,2
Nicaragua	1997	2 700	1 750	1,5
Panamá	2000	8 066	548	14,7
América del Sur				
Argentina	2002	244 320	27 862	8,8
Bolivia (Estado Plurinacional de)	2000	6 000	3 144	1,9
Brasil	2006	788 053	48 914	16,1
Chile	2007	53 915	1 262	42,7
Colombia	1997	21 000	2 539	8,3
Ecuador	2000	14 652	1 616	9,1
Guayana francesa	2005	317	12	26,4
Guyana	1977	3 401	422	8,1
Paraguay	2008	25 823	3 757	6,9
Perú	1995	13 191	3 740	3,5
Suriname*	2009	1 037	58	17,9
Uruguay	2008	36 465	1 826	20,0
Venezuela (República Bolivariana de)	1977	33 888	2 964	11,4
América septentrional				
Bermudas	1998	45	0	112,5
Canadá	2006	733 182	39 283	18,7
Estados Unidos de América	2007	4 389 812	161 780	27,1
ASIA				
Asia central				
Kazajstán	2007	40 228	28 641	1,4
Kirguistán	2008	24 445	1 280	19,1
Tayikistán	2008	15 951	741	21,5
Turkmenistán	1993	52 304	1 586	33,0

CUADRO A2.1 (Continuación)

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
Asia oriental				
China*	2000	13 688 736	119 666	114,4
China, RAE de Hong Kong*	1996	4	6	0,7
China, continental*	2009	21 024 788	121 385	173,2
Japón	2005	1 910 724	4 360	438,2
Mongolia	2008	3 232	1 197	2,7
Provincia china de Taiwán	2009	47 004	595	79,0
República Popular Democrática de Corea	1984	67 500	2 285	29,5
República de Corea	2008	253 531	1 565	162,0
Asia sudoriental				
Brunei Darussalam	1983	72	3	24,0
Camboya	2008	4 611	3 700	1,2
Filipinas*	2002	1 528 053	4 935	309,6
Indonesia	2002	4 097	20 081	0,2
Malasia	1995	43 295	901	48,1
Myanmar*	2009	160 506	10 794	14,9
República Democrática Popular Lao	1981	664	780	0,9
Tailandia	2002	697 956	15 389	45,4
Timor-Leste	1997	90	127	0,7
Viet Nam	2000	162 746	6 200	26,2
Asia meridional				
Afganistán	2009	223	7 793	0,0
Bangladesh	2006	3 000	7 880	0,4
Bhután	2008	136	100	1,4
India*	2003	2 812 200	159 799	17,6
Irán (República Islámica del)	2007	308 422	16 869	18,3
Nepal*	2008	37 872	2 220	17,1
Pakistán	2006	439 741	30 320	14,5
Sri Lanka	1982	13 976	857	16,3
Asia occidental				
Arabia Saudita	1998	9 792	3 637	2,7
Armenia*	2009	14 777	449	32,9
Azerbaiyán	2009	21 542	1 874	11,5
Bahrein*	2007	21	1	15,0
Chipre	2003	11 717	112	104,6
Emiratos Árabes Unidos	2000	380	60	6,3
Georgia*	2007	40 100	463	86,6
Iraq	2001	72 775	4 300	16,9

CUADRO A2.1 (Continuación)

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
Israel*	2009	21 591	304	71,0
Jordania	2008	5 483	150	36,7
Kuwait	2008	109	11	9,6
Líbano	1999	8 256	129	64,0
Omán	2004	201	29	6,9
Palestina	2008	7 756	83	93,4
Qatar	2005	73	12	6,3
República Árabe Siria	2008	109 890	4 699	23,4
Türkiye*	2008	1 070 746	21 555	49,7
Yemen	2000	6 340	1 545	4,1
EUROPA				
Europa oriental				
Belarús	2009	48 100	5 544	8,7
Bulgaria	2008	53 100	3 088	17,2
Chequia	2007	83 813	2 626	31,9
Eslovaquia	2008	21 372	1 382	15,5
Federación de Rusia	2009	329 980	121 649	2,7
Hungría*	2005	128 250	4 601	27,9
Polonia	2009	1 577 290	12 066	130,7
República de Moldova*	2009	35 984	1 817	19,8
Rumania	2009	176 841	8 789	20,1
Ucrania*	2009	369 131	32 478	11,4
Europa septentrional				
Dinamarca	2005	113 402	2 332	48,6
Estonia	2006	33 744	559	60,4
Finlandia	2005	175 232	2 237	78,4
Irlanda	2005	174 800	1 184	147,6
Islandia	2009	11 432	124	92,2
Letonia	2007	59 562	1 188	50,1
Lituania*	2009	118 041	2 054	57,5
Noruega	2005	132 673	862	153,9
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	1989	509 780	6 702	76,1
Suecia	2005	159 590	2 687	59,4
Europa meridional				
Albania*	2009	7 883	609	12,9
Andorra	2009	353	1	458,4
Bosnia y Herzegovina	1996	29 000	900	32,2
Croacia	2002	4 242	858	4,9
Eslovenia*	2005	108 461	176	616,3

CUADRO A2.1 (Continuación)

PAÍS O TERRITORIO	Año	Tractores (unidades)	Tierra cultivable (miles de ha)	Tractores por cada 1 000 ha de tierra cultivable
España*	2009	1 320 599	12 497	105,7
Grecia	2006	259 613	2 584	100,5
Italia	2002	1 754 401	8 287	211,7
Macedonia del Norte	2007	53 606	431	124,4
Malta*	2002	2 012	9	223,6
Portugal	2005	176 394	1 305	135,1
Serbia	2008	5 844	2 661	2,2
Europa occidental				
Alemania*	2009	681 200	11 945	57,0
Austria*	2005	432 177	1 381	313,0
Bélgica	2005	95 010	843	112,7
Francia	2005	1 176 425	18 378	64,0
Liechtenstein	1990	446	4	111,5
Luxemburgo*	2009	6 527	62	105,7
Países Bajos	2005	144 600	1 111	130,2
Suiza*	2009	163 600	406	403,0
OCEANÍA				
Australia y Nueva Zelandia				
Australia	1974	332 560	14 778	22,5
Nueva Zelandia	1986	81 441	2 585	31,5
Melanesia				
Fiji	2008	5 983	169	35,4
Islas Salomón	1990	8	11	0,7
Nueva Caledonia	2002	1 941	7	285,4
Papua Nueva Guinea	1997	1 160	197	5,9
Vanuatu	1971	35	15	2,3
Micronesia				
Guam*	2007	84	1	84,0
Islas Marianas septentrionales	2007	99	0	396,0
Kiribati	1975	14	2	7,0
Polinesia				
Islas Cook	1998	165	2	82,5
Niue	1984	10	1	10,0
Polinesia Francesa	1995	273	3	91,0
Samoa	2002	94	13	7,2
Samoa Americana	2003	36	4	9,3
Tonga	2004	243	15	16,2

NOTA: Los datos recopilados se refieren a tres tipos de tractores (de ruedas, de oruga y de cadenas); en el caso de los países marcados con asterisco (*), se considera un cuarto tipo de tractor (el motocultor) desde la década de 2000.

NOTAS

GLOSARIO

1 Klerkx, L., Jakku, E. y Labarthe, P. 2019. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91: 100315. https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315

2 Schroeder, K., Lampietti, J. y Elabed, G. 2021. *What's cooking: Digital transformation of the agrifood system*. Washington D. C., Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35216

3 Birner, R., Daum, T. y Pray, C. 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260–1285. https://doi.org/10.1002/aepp.13145

4 Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2020. *Agricultura 4.0 – Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos N. 24. Roma, FAO. https://www.fao.org/3/cb2186es/CB2186ES.pdf

5 FAO. 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Nota informativa. Roma. www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf

6 FAO y Comisión de la Unión Africana (CUA). 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Abeba. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

7 FAO. 2021. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021. Lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resilientes a las perturbaciones y tensiones*. Roma. https://doi.org/10.4060/cb4476es

8 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-10 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

9 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

10 FAO. 2017. *Conservation agriculture*. Hoja de datos. Roma. www.fao.org/3/i7480en/I7480EN.pdf

11 Sociedad internacional de agricultura de precisión (ISPA). 2021. Precision Ag Definition. En: *ISPA*. Monticello, IL (Estados Unidos). [Consultado el 20 de diciembre de 2021]. www.ispag.org/about/definition

12 Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I.Y., Grigoriadis, V. y Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

13 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022, documento de antecedentes.* Documento interno.

14 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

CAPÍTULO 1

1 ISPA. 2021. Precision Ag Definition. En: *ISPA*. Monticello, IL (Estados Unidos). [Consultado el 20 de diciembre de 2021]. www.ispag.org/about/definition

2 Mazoyer, M. y Roudart, L. 2006. *A history of world agriculture: From the Neolithic Age to the current crisis*. Nueva York, NYU Press.

3 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. En: R. Evenson y P. Pingali, (coords.). *Handbook of agricultural economics*, págs. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4

4 Hurt, R.D. 1982. *American farm tools: From hand power to steam power.* Sunflower University Press. Manhattan, KS (Estados Unidos).

5 Daum, T., Huffman, W. y Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany.* Economics Working Paper. Ames (Estados Unidos), Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47

6 Johnson, D.G. 2000. Population, food, and knowledge. *The American Economic Review*, 90(1): 1–14. www.jstor.org/stable/117278

7 Michaels, G., Rauch, F. y Redding, S.J. 2012. Urbanization and structural transformation. *The Quarterly Journal of Economics*, 127(2): 535–586. www.jstor.org/stable/23251993

8 Gollin, D., Parente, S. y Rogerson, R. 2002. The role of agriculture in development. *The American Economic Review*, 92(2): 160–164. www.jstor.org/stable/3083394

9 Lewis, W.A. 1954. Economic development with unlimited supplies of labour. *The Manchester School*, 22(2): 139–191. https://doi.org/10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x

10 USDA Economic Research Service. 2021. Agriculture and its related industries provide 10.3 percent of U.S. employment. En: *USDA*. Washington D. C. [Consultado el 22 de abril de 2022]. www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=58282

11 Lowenberg-DeBoer, J. y Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552–1569. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779

12 Kumar, P., Lorek, T., Olsson, T.C., Sackley, N., Schmalzer, S. y Laveaga, G.S. 2017. Roundtable: New Narratives of the Green Revolution. *Agricultural History*, 91(3): 397–422. https://www.academia.edu/36689104/Roundtable_New_Narratives_of_the_Green_Revolution_Agricultural_History_91_3_Summer_2017_pp_397_422

13 Shiva, V. 1991. *The violence of the green revolution: Third World agriculture, ecology and politics*. Londres, Zed Books.

14 FAO. 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Hoja de datos. Roma. www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf

15 Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2020. *Agricultura 4.0 – Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos N. 24. Roma, FAO. https://www.fao.org/3/cb2186es/CB2186ES.pdf

16 Gan, H. y Lee, W.S. 2018. Development of a navigation system for a smart farm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17): 1–4. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.051

17 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. y Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

18 Trendov, N.M., Varas, S. y Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Roma, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf

19 FAO. 2022. FAOSTAT: Indicadores de empleo: Agricultura. En: *FAO*. Roma. [Consultado el 6 de febrero de 2022]. https://www.fao.org/faostat/es/#data/OEA

20 Charlton, D., Hill, A.E. y Taylor, E.J. 2022. *Automation and social impacts: winners and losers.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-09 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

21 Silva, J.V., Baudron, F., Reidsma, P. y Giller, K.E. 2019. Is labour a major determinant of yield gaps in sub-Saharan Africa? A study of cereal-based production systems in Southern Ethiopia. *Agricultural Systems*, 174: 39–51. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.009

22 Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. y Kaumbutho, P. 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5

23 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. y Kolavalli, S. 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168–181. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013

24 Fuglie, K., Gautam, M., Goyal, A. y Maloney, W.F. 2019. *Harvesting prosperity: Technology and productivity growth in agriculture*. Washington D. C., Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32350

25 Lowder, S.K., Sánchez, M.V. y Bertini, R. 2019. *Farms, family farms, farmland distribution and farm labour: What do we know today?* Documento de trabajo n.º 19-08 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO. www.fao.org/3/ca7036en/ca7036en.pdf

26 Takeshima, H. y Vos, R. 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Estudio de antecedentes. Roma, FAO. www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf

27 Johnston, D., Stevano, S., Malapit, H.J., Hull, E. y Kadiyala, S. 2018. Review: Time use as an explanation for the agri-nutrition disconnect: Evidence from rural areas in low and middle-income countries. *Food Policy*, 76: 8–18. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.12.011

28 Daum, T. y Birner, R. 2021. The forgotten agriculture-nutrition link: farm technologies and human energy requirements. *Food Security*. https://doi.org/10.1007/s12571-021-01240-1

29 Ogwuike, P., Rodenburg, J., Diagne, A., Agboh-Noameshie, A.R. y Amovin-Assagba, E. 2014. Weed management in upland rice in sub-Saharan Africa: impact on labor and crop productivity. *Food Security*, 6(3): 327–337. https://doi.org/10.1007/s12571-014-0351-7

30 Castro, Á., Pereira, J.M., Amiama, C. y Bueno, J. 2015. Typologies of dairy farms with automatic milking system in northwest Spain and farmers' satisfaction. *Italian Journal of Animal Science*, 14(2): 3559. https://doi.org/10.4081/ijas.2015.3559

31 Hansen, B.G. y Stræte, E.P. 2020. Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 92(1): 1–13. https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100328

32 Taylor, J.E. y Charlton, D. 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.

33 Daum, T. y Kirui, O. 2021. Mechanization along the value chain. En: J. von Braun, A. Admassie, S. Hendriks, G. Tadesse y H. Baumüller, (coords.). *From potentials to reality: Transforming Africa's food production.* Peter Lang, Berna.

34 Maucorps, A., Münch, A., Brkanovic, S., Schuh, B., Dwyer, J., Vigani, M., Khafagy, A. *et al.* 2019. *Research for AGRI committee - The EU farming employment: current challenges and future prospects*. Estudio y Anexo. En: *Think Tank – European Parliament*. [Consultado el 17 de febrero de 2022]. www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2019)629209

35 National Farmers' Union. 2019. *The future of food 2040*. Stoneleigh (Reino Unido). www.nfuonline.com/archive?treeid=116020

36 Charlton, D., Taylor, J.E., Vougioukas, S. y Rutledge, Z. 2019. Can wages rise quickly enough to keep workers in the fields? *Choices*, 34(2): 1–7. www.choicesmagazine.org/choices-magazine/submitted-articles/can-wages-rise-quickly-enough-to-keep-workers-in-the-fields

37 Ali, I., Nagalingam, S. y Gurd, B. 2017. Building resilience in SMEs of perishable product supply chains: enablers, barriers and risks. *Production Planning & Control*, 28(15): 1236–1250. https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1362487

38 Bourlakis, M., Maglaras, G., Aktas, E., Gallear, D. y Fotopoulos, C. 2014. Firm size and sustainable performance in food supply chains: Insights from Greek SMEs. *International Journal of Production Economics*, 152: 112–130. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.029

39 Jones, K.E., Patel, N.G., Levy, M.A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J.L. y Daszak, P. 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451: 990–993. https://doi.org/10.1038/nature06536

40 Centro para la Mecanización Agrícola Sostenible (CSAM) y Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico (CESPAP). 2020. *Mechanization solutions for improved livestock management and prevention & control of zoonotic diseases*. Beijing. www.un-csam.org/sites/default/files/2021-01/ENG.pdf

41 Ali, I. y Aboelmaged, M.G.S. 2021. Implementation of supply chain 4.0 in the food and beverage industry: perceived drivers and barriers. *International Journal of Productivity and Performance Management*.

42 Daum, T. 2021. Farm robots: ecological utopia or dystopia? *Trends in Ecology & Evolution*, 36(9): 774–777. https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.002

43 Streed, A., Tomlinson, B., Kantar, M. y Raghavan, B. 2021. How sustainable is the smart farm? Paper presented at LIMITS 2021, 14-15 de junio de 2021. https://computingwithinlimits.org/2021/papers/limits21-streed.pdf

44 Schillings, J., Bennett, R. y Rose, D.C. 2021. Exploring the potential of precision livestock farming technologies to help address farm animal welfare. *Frontiers in Animal Science*, 2: 639678. https://doi.org/10.3389/fanim.2021.639678

45 Berckmans, D. 2014. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Scientific and Technical Review – OIE*, 33(1): 189–196.

46 Werkheiser, I. 2018. Precision livestock farming and farmers' duties to livestock. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 31: 181–195. https://doi.org/10.1007/s10806-018-9720-0

47 Bos, J.M., Bovenkerk, B., Feindt, P.H. y van Dam, Y.K. 2018. The quantified animal: Precision livestock farming and the ethical implications of objectification. *Food Ethics*, 2(1): 77–92. https://doi.org/10.1007/s41055-018-00029-x

48 Miles, C. 2019. The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality. *Big Data & Society*, 6(1): 2053951719849444.

49 Duncan, E., Glaros, A., Ross, D.Z. y Nost, E. 2021. New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agriculture and Human Values*, 38: 1181–1199. https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8

50 Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A. y Jakku, E. 2019. Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91: 100301. https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.007

51 Murray, U., Gebremedhin, Z., Brychkova, G. y Spillane, C. 2016. Smallholder farmers and climate smart agriculture: Technology and labor-productivity constraints amongst women smallholders in Malawi. *Gender, Technology and Development*, 20(2): 117–148. https://doi.org/10.1177/0971852416640639

52 Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD). 2020. *Teaching Material on Trade and Gender Linkages: The Gender Impact of Technological Upgrading in Agriculture*. Nueva York, Naciones Unidas. https://unctad.org/system/files/official-document/ditc2020d1.pdf

53 FAO. 2019. *Youth employment: Youth agri-food policy assistance*. Roma. www.fao.org/3/ca3854en/ca3854en.pdf

54 Manyika, J., Chui, M., Miremadi, M., Bughin, J., George, K., Willmott, P. y Dewhurst, M. 2017. *A future that works: automation, employment, and productivity*. Nueva York, McKinsey Global Institute. www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/featured%20insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works-Executive-summary.ashx

55 Autor, D.H. 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3

56 Organización Internacional del Trabajo (OIT). 2022. *Agriculture; plantations; other rural sectors*. En: *OIT*. Ginebra. [Consultado el 14 de febrero de 2022]. www.ilo.org/global/industries-and-sectors/agriculture-plantations-other-rural-sectors/lang--en/index.htm

57 Christiaensen, L., Rutledge, Z. y Taylor, J.E. 2021. Viewpoint: The future of work in agri-food. *Food Policy*, 99: 101963.

58 Daum, T. y Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393

59 FAO y CUA. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Abeba. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

60 Clarke, C. 2017. Farmers in Myanmar are using 3D printing to improve farming production. En: *3D Printing Industry*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. https://3dprintingindustry.com/?s=myanmar

61 Fielke, S.J., Botha, N., Reid, J., Gray, D., Blackett, P., Park, N. y Williams, T. 2018. Lessons for co-innovation in agricultural innovation systems: a multiple case study analysis and a conceptual model. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 24(1): 9–27. https://doi.org/10.1080/1389224X.2017.1394885

62 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

63 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

64 Daum, T. 2022. *Agricultural mechanization and sustainable agri-food system transformation in the Global South.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-11 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

65 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-10 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

66 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022, documento de antecedentes.* Documento interno.

CAPÍTULO 2

1 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

2 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

3 White, W.J. 2001. An unsung hero: the farm tractor's contribution to twentieth-century United States economic growth. *The Journal of Economic History*, 61(2): 493–496. https://EconPapers.repec.org/RePEc:cup:jechis:v:61:y:2001:i:02:p:493-496_23

4 Binswanger, H. 1986. Agricultural mechanization: a comparative historical perspective. *The World Bank Research Observer*, 1(1): 27–56. https://doi.org/10.1093/wbro/1.1.27

5 Mrema, G., Soni, P. y Rolle, R.S. 2015. A Regional Strategy for Sustainable Agricultural Mechanization. Sustainable Mechanization across Agri-Food Chains in Asia and the Pacific region. RAP Publication n.º 2014/24. Roma FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/78c1b49f-b5c2-43b5-abdf-e63bb6955f4f

6 Diao, X., Takeshima, H. y Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington D. C., IFPRI (Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias). https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095

7 Daum, T. y Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393

8 Kirui, O. 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy n.º 272. Universidad de Bonn. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103

9 FAO. 2021. FAOSTAT: Series de datos y archivos suspendidos: Maquinaria. En: *FAO*. Roma. [Consultado el 1 de diciembre de 2021]. https://www.fao.org/faostat/es/#data/RM

10 Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), FAO e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2017. *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2017-2018*. San José, Costa Rica, IICA. https://www.fao.org/3/i8048es/I8048ES.pdf

11 Elverdin, P., Piñeiro, V. y Robles, M. 2018. *Agricultural mechanization in Latin America.* Documento de debate del IFPRI n.º 1740. Washington D. C., IFPRI.

12 Cramb, R. y Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 165-201. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf

13 Justice, S. y Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013

14 Belton, B., Win, M.T., Zhang, X. y Filipski, M. 2021. The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar. *Food Policy*, 101: 102095. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095

15 FAO y CUA. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Abeba. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

16 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. En: R. Evenson y P. Pingali, (coords.). *Handbook of agricultural economics*, págs. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4

17 Banco Mundial. 2022. Living Standards Measurement Study - Integrated Surveys on Agriculture (LSMS-ISA). En: *El Banco Mundial*. Washington D. C. [Consultado el 5 de enero de 2022]. https://www.worldbank.org/en/programs/lsms/initiatives/lsms-ISA

18 Abeyratne, F. y Takeshima, H. 2020. The evolution of agricultural mechanization in Sri Lanka. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 139-163. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_04

19 Ahmed, M. y Takeshima, H. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Bangladesh: The case of tractors for land preparation. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 235-261. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_07

20 Win, M.T., Belton, B. y Zhang, X. 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 263-284. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08

21 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. y Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 97-138. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090

22 Antle, J.M. y Ray, S. 2020. *Sustainable agricultural development: An economic perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing. http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-34599-0

23 Veimar da Silva, A., Michelle da Silva, C., Wagner, Soares Pessoa, W.R.L, Almeida Vaz, M., Matos de Oliveira, K. y Ribeiro dos Santos, F.S. 2018. Agricultural mechanization in small rural properties in the State of Piauí, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 13(33): 1698–1707. https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/7E9E9CA58112

24 Mrema, G.C., Kahan, D.G. y Agyei-Holmes, A. 2020. Agricultural mechanization in Tanzania. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 457-496. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_14

25 Takeshima, H. y Lawal, A. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 423-456. Washington D. C., IFPRI.

26 Herrero, M., Thornton, P.K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Benton, T.G., Bodirsky, B.L., Bogard, J.R. *et al.* 2020. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. Nature Food, 1: 266–272. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1

27 Ehlers, M.-H., Finger, R., El Benni, N., Gocht, A., Sørensen, C.A.G., Gusset, M., Pfeifer *et al.* 2022. Scenarios for European agricultural policymaking in the era of digitalisation. *Agricultural Systems*, 196: 103318. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103318

28 Fleming, A., Jakku, E., Lim-Camacho, L., Taylor, B. y Thorburn, P. 2018. Is big data for big farming or for everyone? Perceptions in the Australian grains industry. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 24. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0501-y

29 Sistema Mundial de Comunicaciones Móviles (GSM). 2020. *The mobile economy 2020*. www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf

30 Onukwue, A. 2022. Google's subsea cable for Africa is making its first landing in Togo. En: *Quartz Africa*. Nueva York. [Consultado el 24 de julio de 2022]. https://qz.com/africa/2143897/googles-equiano-cable-is-making-its-first-landing-in-togo

31 Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. y Müller, A. 2022. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. *Agricultural Systems*, 195: 103313. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103313

32 McCampell, M. 2021. *More than what meets the eye: Factors and processes that shape the design and use of digital agricultural advisory and decision support in Africa*. Universidad de Wageningen, (Países Bajos). https://research.wur.nl/en/publications/388eb987-15f2-4fb0-b9c1-f0f6ff342e98

33 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. y Addom, B. 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageninghen (Países Bajos). CTA (Centro Técnico de Cooperación Agrícola y Rural). www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa

34 FAO y Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). 2022. *Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries*. Roma. www.fao.org/3/cb7943en/cb7943en.pdf

35 Trendov, N.M., Varas, S. y Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Roma, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf

36 Viet Nam News. 2021. Hà Nội aims to develop smart agriculture. En: *Viêt Nam News*. Hanói. [Consultado el 1 de mayo de 2022]. https://vietnamnews.vn/economy/1082482/ha-noi-aims-to-develop-smart-agriculture.html

37 Musoni, M. 2020. Smart farming in Rwanda – How farmers can increase crop yields through an IoT-based irrigation system. En: *Digital Transformation Center*. Kigali. [Consultado el 1 de mayo de 2022]. https://digicenter.rw/smart-farming-in-rwanda-with-an-iot-based-irrigation-system

38 GSMA. 2020. *Digital agriculture maps: 2020 state of the sector in low and middle-income countries*. Londres. www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2020/09/GSMA-Agritech-Digital-Agriculture-Maps.pdf

39 FAO y Academia China de Agronomía (CAAS). 2021. *Carbon neutral tea production in China – Three pilot case studies*. Roma, FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/cb4580en

40 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. y Söderström, M. 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217–1236. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w

41 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. y Piikki, K. 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158. https://doi.org/10.3390/su13031158

42 Instituto Africano de Nutrición Vegetal (APNI). 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguérir (Marruecos), 8–10 de diciembre de 2020. En: *APNI*. www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture

43 Witt, C. y Dobermann, A. 2002. A site-specific nutrient management approach for irrigated, lowland rice in Asia. *Better Crops International*, 16(1): 20–24. https://www.researchgate.net/publication/237258623_A_Site-Specific_Nutrient_Management_Approach_for_Irrigated_Lowland_Rice_in_Asia

44 Agrocares. 2022. Manage soil fertility: Informed fertilization decisions in the field. En: *Agrocares*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.agrocares.com/soilcares

45 Lowenberg-DeBoer, J. y Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552–1569. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779

46 Van Beek, C. 2020. Adoption level is the most underestimated factor in fertiliser recommendations. En: *Agrocares*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.agrocares.com/wp-content/uploads/2020/10/whitepaper-christy-van-beek-1.pdf

47 GoMicro. 2022. Phone QC. En: *GoMicro*. Singapur. [Consultado el 1 de mayo de 2022]. www.gomicro.co

48 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-10 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

49 UIT. 2020. *Measuring digital development: Facts and figures 2020*. Ginebra, UIT. www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/FactsFigures2020.pdf

50 Hanton, J.P. y Leach, H.A. 1974. *Electronic livestock identification system*. Patente estadounidense 4,262,632. https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/49/f1/e746f5f7bca33e/US4262632.pdf

51 Brustein, J. 2014. GPS as we know it happened because of Ronald Reagan. En: *Bloomberg News*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.bloomberg.com/news/articles/2014-12-04/gps-as-we-know-it-happened-because-of-ronald-reagan

52 Rip, M.R. y Hasik, J.M. 2002. *The precision revolution: GPS and the future of aerial warfare*. Annapolis, MD (Estados Unidos), Naval Institute Press.

53 Sheets, K.D. 2018. The Japanese impact on global drone policy and law: Why a laggard United States and other nations should look to Japan in the context of drone usage. *Indiana Journal of Global Legal Studies*, 25(1): 513–537. www.repository.law.indiana.edu/ijgls/vol25/iss1/20

54 Mulla, D. y Khosla, R. 2016. Historical evolution and recent advances in precision farming. En: R. Lal y B.A. Stewart, (coords.) *Soil-specific farming – Precision farming*. Boca Ratón, FL (Estados Unidos), CRC Press.

55 Lely. 2022. Our history. En: *Lely*. Maassluis (Países Bajos). [Consultado el 1 de marzo de 2022]. www.lely.com/gb/about-lely/our-company/history

56 Sharipov, D.R., Yakimov, O.A., Gainullina, M.K., Kashaeva, A.R. y Kamaldinov, I.N. 2021. Development of automatic milking systems and their classification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 659: 012080. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/659/1/012080

57 Rural Retailer. 2002. Arro ™ targets growing need for Steering Assist®. In: *Rural Retailer*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.ccimarketing.com/farmsupplier_com/pages/html1.asp

58 Reusch, S. 1997. Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen [Desarrollo de un sensor óptico de reflexión para registrar el suministro de nitrógeno en los cultivos agrícolas]. Tesis doctoral. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI [Grupo de trabajo de investigación y docencia de la Sociedad Max Eyth de Ingeniería Agrícola en la VDI].

59 Trimble. 2006. Trimble combines GPS guidance and rate control to automate agricultural spraying operations. En: *Trimble*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. https://investor.trimble.com/news-releases/news-release-details/trimble-combines-gps-guidance-and-rate-control-automate

60 Ag Leader. 2022. History timeline. En: *Ag Leader.* [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.agleader.com/our-history

61 Ecorobotix. 2022. A bit of history. En: *Ecorobotix*. [Consultado el 1 de marzo de 2022]. https://ecorobotix.com/en/a-bit-of-history

62 Naïo Technologies. 2022. Naïo Technologies, agricultural robotics pioneers. En: *Naïo Technologies*. [Consultado el 1 de marzo de 2022]. http://www.naio-technologies.com/en/naio-technologies/ #:~:text=Founded%20in%202011%2C%20Na%C3%AFo%20Technologies,use%20of%20chemical%20weed%20killers

63 Claas. 2022. Product history. The combine harvester. En: *Claas.* [Consultado el 1 de marzo de 2022]. www.claas.co.uk/company/history/products/combines/lexion

64 Hands Free Hectare. 2018. Timeline. En: *Hands Free Hectare*. [Consultado el 1 de marzo de 2022]. https://www.handsfreehectare.co.uk/timeline.html

65 Smart Ag. 2018. Smart Ag unveils autocart driverless tractor technology at 2018 Farm Progress Show. En: *OEM Off-highway*. [Consultado el 1 de marzo de 2022]. www.oemoffhighway.com/trends/gps-automation/news/21020794/smart-ag-unveils-autocart-driverless-tractor-technology-at-2018-farm-progress-show

66 John Deere. 2022. John Deere reveals fully autonomous tractor at CES 2022. En: *John Deere*. [Consultado el 1 de marzo de 2022]. www.deere.com/en/news/all-news/autonomous-tractor-reveal

67 Birner, R., Daum, T. y Pray, C. 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260–1285. https://doi.org/10.1002/aepp.13145

68 Knight, C.H. 2020. Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers. *Animal*, 14: s187–s195. https://doi.org/10.1017/S1751731119003276

69 Eastwood, C.R. y Renwick, A. 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24. www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024

70 Hansen, B.G. 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109–117. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004

71 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. y Oude Lansink, A.G.J.M. 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391–7398. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482

72 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. y Degani, A. 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134–141.

73 Verified Market Research. 2020. Global milking robots market size by type, by herd size, by geographic scope and forecast. En: *Verified Market Research*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.verifiedmarketresearch.com/product/milking-robots-market

74 Markets and Markets. 2018. Milking robots market by offering (hardware, software, service), milking robots system type (single-stall unit, multi-stall unit, automated milking rotary), herd size (below 100, between 100 and 1,000 and above 1,000), geography - Global forecast to 2023. En: *Markets and Markets*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/milking-robots-market-170643611.html

75 Rodenburg, J. 2017. Robotic milking: Technology, farm design, and effects on work flow. *Journal of Dairy Science*, 100(9): 7729–7738. https://doi.org/10.3168/jds.2016-11715

76 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022, documento de antecedentes.* Documento interno.

77 Ordolff, D. 2001. Introduction of electronics into milking technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 125–149.

78 Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tscharke, M. y Berckmans, D. 2012. Precision Livestock Farming: An international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3): 1–9.

79 Lowenberg-DeBoer, J. 2018. The economics of precision agriculture. In J. Stafford, ed. *Precision agriculture for sustainability*, págs. 461–494. Londres, Burleigh Dodds Science Publishing. https://doi.org/10.1201/9781351114592

80 Colaço, A.F. y Bramley, R.G.V. 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218: 126–140. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007

81 Lachia, N., Pichon, L. y Tisseyre, B. 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. En: J.V. Stafford, ed. *Precision agriculture '19*. págs. 851–857. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105

82 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. y Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

83 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. *et al.* 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848–864. https://doi.org/10.1002/aepp.13177

84 Elias, M., Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K. y Franklin, K. (en prensa). *Economically optimal farmer supervision of crop robots*.

85 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. y Mark, T. 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865–878. https://doi.org/10.1002/aepp.13178

86 Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2020. *Agricultura 4.0 – Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos N. 24. Roma, FAO. https://www.fao.org/3/cb2186es/CB2186ES.pdf

87 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. y Shakil, S.R. 2015. A brief overview and systematic approach for using agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88–101. https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf

88 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavadithya, S. y Kumar, J. 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183–188. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf

89 Autor, D.H. 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3

90 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. y Antuniassi, U.R. 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83–88. http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07

91 Wang, C., Herbst, A., Zeng, A., Wongsuk, S., Qiao, B., Qi, P., Bonds, J. *et al.* 2021. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of The Total Environment*, 777: 146181. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181

92 Erickson, B. y Lowenberg-DeBoer, J. 2021. 2021 precision agriculture dealership survey confirms a data driven market for retailers. En: *CropLife*. [Consultado el 24 de julio de 2022]. www.croplife.com/precision/2021-precision-agriculture-dealership-survey-confirms-a-data-driven-market-for-retailers/#slide=87709-87729-3).

93 Kendall, H., Clark, B., Li, W., Jin, S., Jones, G.D., Chen, J., Taylor, J., Li, Z. y Frewer, Lynn, J. 2022. Precision agriculture technology adoption: a qualitative study of small-scale commercial "family farms" located in the North China Plain. *Precision Agriculture*, 23: 319–351. https://doi.org/10.1007/s11119-021-09839-2

94 Kumar, G., Engle, C. y Tucker, C. 2018. Factors driving aquaculture technology adoption. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49(3): 447–476. https://doi.org/10.1111/jwas.12514

95 FAO. 2020. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. Roma. https://doi.org/10.4060/ca9229es

96 Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H. *et al.* 2018. Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173: 176–193. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014

97 Shrimpbox. 2021. The Shrimpbox launch: The world's first robotic shrimp farm. En: *Atarraya*. Ciudad de México. [Consultado el 24 de julio de 2022]. https://atarraya.ai/assets/pdf/ShrimpboxENG.pdf

98 Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J. y van Henten, E. 2016. *Robotics in agriculture and forestry*. SpringerLink. [Consultado el 8 de diciembre de 2021]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32552-1_56

99 Nitoslawski, S.A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J.W.N., Witherspoon, K., Nesbitt, L. y Konijnendijk van den Bosch, C.C. 2021. The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9(8): e2021EF002123. https://doi.org/10.1029/2021EF002123

100 Boitsov, A., Vagizov, M., Istomin, E., Aksenova, A. y Pavlov, V. 2021. Robotic systems in forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 806: 012034.

101 Allott, J., O'Kelly, G. y Pendergraph, S. 2020. Data: The next wave in forestry productivity. En: *McKinsey & Company*. [Consultado el 5 de enero de 2022]. www.mckinsey.com/industries/paper-forest-products-and-packaging/our-insights/data-the-next-wave-in-forestry-productivity

102 Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. y Ringdahl, O. 2009. Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering*, 20(1): 31–38. https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702573

103 Visser, R. y Obi, O.F. 2021. Automation and robotics in forest harvesting operations: Identifying near-term opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42(1): 13–24.

104 Parker, R., Bayne, K. y Clinton, P.W. 2016. Robotics in forestry. *New Zealand Journal of Forestry*, 60(4): 8–14.

105 Finer, M. y Mamani, N. 2020. MAAP #31: Power of free high-resolution satellite imagery from Norway Agreement. En: *Monitoring of the Amazon Andean Project*. [Consultado el 24 de junio de 2022]. www.maaproject.org/2021/norway-agreement

106 Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K.C., Thorp, K.R., Hameed, I.A., Weltzien, C., Ahmad, D. y Shad, Z.M. 2018. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11: 1. https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3210

107 Mrema, G.C., Baker, D. y Kahan, D. 2008. *Agricultural mechanization in sub-Saharan Africa: time for a new look*. Agricultural Management, Marketing and Finance Occasional Paper n.º 22. Roma, FAO. www.fao.org/3/i0219e/i0219e00.pdf

108 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. y Tamru, S. 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. Documento de trabajo del ESSP n.º 105. Washington D. C., IFPRI y Addis Abeba, EDRI. http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146

109 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. y Luginaah, I. 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11–24.

110 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. y Or, D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293

111 Wang, X., Yamauchi, F., Otsuka, K. y Huang, J. 2016. Wage growth, landholding, and mechanization in Chinese agriculture. *World Development*, 86: 30–45. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.05.002

112 Yamauchi, F. 2016. Rising real wages, mechanization and growing advantage of large farms: Evidence from Indonesia. *Food Policy*, 58(5): 62–69.

113 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. *et al.* 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. Agronomy for Sustainable Development, 40: 47. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2

114 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuuire, V. y Luginaah, I. 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422–1440. https://doi.org/10.1002/ldr.3490

115 Torero, M. 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. En: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg y M. Sánchez Sorondo, (coords.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, págs. 99-107. Springer.

CAPÍTULO 3

1 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. En: R. Evenson y P. Pingali, (coords.). *Handbook of agricultural economics*, págs. 2779-2805. Amsterdam, Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4

2 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. y Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 97-138. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090

3 Kirui, O. 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy n.º 272. Universidad de Bonn. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103

4 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. y Tamru, S. 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. Documento de trabajo del ESSP n.º 105. Washington D. C., IFPRI y Addis Abeba, EDRI. http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146

5 Houssou, N. y Chapoto, A. 2014. *The changing landscape of agriculture in Ghana: Drivers of farm mechanization and its impacts on cropland expansion and intensification*. Documento de debate del IFPRI n.º 1392. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/128706/filename/128917.pdf

6 Adu-Baffour, F., Daum, T. y Birner, R. 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133–145. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007

7 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuuire, V. y Luginaah, I. 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422–1440. https://doi.org/10.1002/ldr.3490

8 Ma, W., Renwick, A. y Grafton, Q. 2018. Farm machinery use, off-farm employment and farm performance in China. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 62(2): 279–298. https://doi.org/10.1111/1467-8489.12249

9 Daum, T., Capezzone, F. y Birner, R. 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411–429. https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3

10 Haggblade, S., Hazell, P. y Reardon, T. 2010. The rural non-farm economy: prospects for growth and poverty reduction. *World Development*, 38(10): 1429–1441. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.06.008

11 Christiaensen, L., Demery, L. y Kuhl, J. 2011. The (evolving) role of agriculture in poverty reduction—An empirical perspective. *Journal of Development Economics*, 96(2): 239–254. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2010.10.006

12 Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T. y Müller, T. 2017. Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3): 269–282. https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2444

13 Elbehri, A. y Sadiddin, A. 2016. Climate change adaptation solutions for the green sectors of selected zones in the MENA region. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 4(3): 39–54. www.thefutureoffoodjournal.com/index.php/FOFJ/article/view/79

14 Jayne, T.S., Mather, D. y Mghenyi, E. 2010. Principal challenges confronting smallholder agriculture in sub-Saharan Africa. *World Development*, 38(10): 1384–1398. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002

15 Yahaya, R. (en prensa). *Market analysis for agricultural mechanisation in Ethiopia*. Addis Abeba, CIMMYT.

16 FAO. 2022. *Technical support for sustainable agricultural mechanization of smallholder farms for enhancing agricultural productivity and production, and reducing drudgery of women and young farmers*. Proyecto de la FAO n.º TCP/NEP/3703. Roma. Documento interno.

17 FAO. 2022. *Thinking about the future of food safety – A foresight report*. Roma. https://doi.org/10.4060/cb8667en

18 Daum, T., Seidel, A., Getnet, B. y Birner, R. 2022. *Animal traction, two-wheel tractors, or four-wheel tractors? A best-fit approach to guide farm mechanization in Africa*. Hohenheim Working Papers on Social and Institutional Change in Agricultural Development. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4092687

19 Diao, X., Takeshima, H. y Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095

20 Win, M.T., Belton, B. y Zhang, X. 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 263-284. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08

21 Baudron, F., Sims, B., Justice, S., Kahan, D.G., Rose, R., Mkomwa, S., Kaumbutho, P. *et al.* 2015. Re-examining appropriate mechanization in Eastern and Southern Africa: two-wheel tractors, conservation agriculture, and private sector involvement. *Food Security*, 7: 889–904. https://doi.org/10.1007/s12571-015-0476-3

22 Kahan, D., Bymolt, R. y Zaal, F. 2018. Thinking outside the plot: Insights on small-scale mechanisation from case studies in East Africa. *The Journal of Development Studies*, 54(11): 1939–1954. https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1329525

23 Daum, T., Huffman, W. y Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany.* Economics Working Paper. Ames (Estados Unidos), Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47

24 FAO. 2019. *Mechanization services in rural communities. Enhancing the resilience of smallholder farmers and creating job opportunities*. Roma. www.fao.org/3/ca7139en/ca7139en.pdf

25 Alwang, J., Sabry, S., Shideed, K., Swelam, A. y Halila, H. 2018. Economic and food security benefits associated with raised-bed wheat production in Egypt. *Food Security: The Science, Sociology and Economics of Food Production and Access to Food*, 10(3): 589–601. https://EconPapers.repec.org/RePEc:spr:ssefpa:v:10:y:2018:i:3:d:10.1007_s12571-018-0794-3

26 Swelam, A. 2016. *Raised-bed planting in Egypt: an affordable technology to rationalize water use and enhance water productivity*. Amman, ICARDA (Centro internacional de investigación agrícola en las zonas secas). https://hdl.handle.net/20.500.11766/5900

27 Sims, B. y Kienzle, J. 2006. *Farm power and mechanization for small farms in sub-Saharan Africa*. Informe Técnico sobre Ingeniería Agrícola y Alimentaria N.º 3. Roma, FAO. www.fao.org/3/a0651e/a0651e.pdf

28 Flores Rojas, M. 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf

29 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-10 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

30 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

31 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

32 Eastwood, C.R. y Renwick, A. 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24. www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024

33 Hansen, B.G. 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109–117. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004

34 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. y Oude Lansink, A.G.J.M. 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391–7398. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482

35 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. y Degani, A. 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134–141.

36 Lowenberg-DeBoer, J. 1999. GPS based guidance systems for farmers. *Purdue Agricultural Economics Report*, págs. 8–9. Universidad Purdue. https://ag.purdue.edu/commercialag/home/paer-article/gps-based-guidance-systems-for-farmers

37 IoF. 2020. *Internet of Food and Farm (IoF) 2020*. www.valoritalia.it/wp-content/uploads/2019/08/IOF2020-Booklet-UseCases-2019-vDEF.pdf

38 FAO y CUA. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Abeba. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

39 de Brauw, A. y Bulte, E. 2021. *African Farmers, Value Chains and Agricultural Development: An Economic and Institutional Perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing. https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-88693-6

40 Daum, T. y Birner, R. 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959–979. https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9

41 Cramb, R. y Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 165-201. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf

42 Justice, S. y Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013

43 Feder, G., Just, R.E. y Zilberman, D. 1985. Adoption of agricultural innovations in developing countries: A survey. *Economic Development and Cultural Change*, 33(2): 255–298. www.jstor.org/stable/1153228

44 Binswanger, H. y Donovan, G. 1987. *Agricultural mechanization: issues and options*. Estudio de políticas del Banco Mundial. Washington D. C., Banco Mundial.

45 Elverdin, P., Piñeiro, V. y Robles, M. 2018. *Agricultural mechanization in Latin America*. Documento de debate del IFPRI n.º 1740. IFPRI.

46 Takeshima, H. 2016. *Market imperfections for tractor service provision in Nigeria: International perspectives and empirical evidence*. Documento de trabajo del NSSP n.º 32. Washington D. C., IFPRI. http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/130446

47 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. y Kolavalli, S. 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168–181. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013

48 Takeshima, H. y Lawal, A. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 423-456. Washington D. C., IFPRI.

49 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. y Mark, T. 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865–878. https://doi.org/10.1002/aepp.13178

50 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. *et al.* 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. Agronomy for Sustainable Development, 40: 47. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2

51 Daum, T. y Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393

52 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. y Luginaah, I. 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11–24.

53 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. y Or, D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293

54 Dahlin, A.S. y Rusinamhodzi, L. 2019. Yield and labor relations of sustainable intensification options for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39: 32. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0575-1

55 FAO. 2021. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021. Lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resilientes a las perturbaciones y tensiones*. Roma. https://doi.org/10.4060/cb4476es

56 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022, documento de antecedentes.* Documento interno.

57 Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V. y Bernoux, M. 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203: 127–139. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027

58 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. y Tittonell, P. 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23–34. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017

59 CSAM. 2022. Climate resilience practice. En: *CSAM*. Beijing. [Consultado el 24 de junio de 2022]. www.un-csam.org/KI-climate

60 Winkler, B., Lemke, S., Ritter, J. y Lewandowski, I. 2017. Integrated assessment of renewable energy potential: Approach and application in rural South Africa. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24: 17–31. https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.10.002

61 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. y Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

62 Lowenberg-DeBoer, J. 2019. Making Technology Pay on Your Farm. Future Farm Technology Expo. Birmingham (Reino Unido).

63 Shockley, J.M., Dillon, C.R. y Shearer, S.A. 2019. An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. *Precision Agriculture*, 20: 1068–1085. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09638-w

64 Al-Amin, A.K.M.A., Lowenberg-DeBoer, J., Franklin, K. y Behrendt, K. 2021. *Economic implications of field size for autonomous arable crop equipment*. Land, Farm and Agribusiness Management Department, Universidad Harper Adams, Newport (Reino Unido).

65 Baudron, F., Nazare, R. y Matangi, D. 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. En: R. Sikora, E. Terry, P. Vlek y J. Chitja, (coords.). *Transforming agriculture in Southern Africa*, págs. 152-159. Londres, Routledge. www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi

66 Justice, S., Flores Rojas, M. y Basnyat, M. 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Roma, FAO. www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf

67 APNI. 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguérir (Marruecos), 8–10 de diciembre de 2020. En: *APNI*. www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture

68 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. y Piikki, K. 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158. https://doi.org/10.3390/su13031158

69 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. y Söderström, M. 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217–1236. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w

70 Pouya, M.B., Diebre, R., Rambaldi, G., Zomboudry, G., Barry, F., Sedogo, M. y Lompo, F. 2020. *Analyse comparative de l'agriculture de précision incluant l'utilisation de la technologie drone et de l'agriculture classique en matière de production de riz et de revenu des agriculteurs au Burkina Faso*. Wageningen (Países Bajos), CTA. https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108460

71 Annor-Frempong, F. y Akaba, S. 2020. *Socio-economic impact and acceptance study of drone-applied pesticide on maize in Ghana*. Wageningen (Países Bajos), CTA. https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108594

72 Niyitanga, F., Kazungu, J. y Mamy, I.M. 2020. Willingness to pay and cost-benefit analyses for farmers acting on real-time, actionable UAS-based advice when growing wheat or potato in Gataraga sector, Musanze district, Rwanda. Wageningen (Países Bajos), CTA. https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108602

73 Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2020. *Agricultura 4.0 – Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos N. 24. Roma, FAO. https://www.fao.org/3/cb2186es/CB2186ES.pdf

74 Yawson, G. y Frimpong-Wiafe, B. 2018. The socio-economic benefits and impact study on the application of drones, sensor technology and intelligent systems in commercial scale agricultural establishments in Africa. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 6(2): 18–36. www.academia.edu/40998630/The_Socio-Economic_Benefits_and_Impact_Study_on_the_Application_of_Drones_Sensor_Technology_and_Intelligent_Systems_in_Commercial-Scale_Agricultural_Establishment_In_Africa

75 Ayamga, M., Tekinerdogan, B. y Kassahun, A. 2021. Exploring the challenges posed by regulations for the use of drones in agriculture in the African context. *Land*, 10(2): 164. https://doi.org/10.3390/land10020164

76 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. y Antuniassi, U.R. 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83–88. http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07

77 Sissoko, A. 2020. Malian architect fights climate change with digital greenhouse. En: *Reuters*. [Consultado el 23 de junio de 2022]. www.reuters.com/article/us-climate-change-mali-agriculture-idUSKBN20713N

78 Elsäßer, R., Hänsel, G. y Feldt, T. 2021. *Digitalizing the African livestock sector: Status quo and future trends for sustainable value chain development*. Bonn (Alemania), GIZ. www.giz.de/de/downloads/giz2021_en_Digitalizing%20the%20African%20livestock%20sector.pdf

79 Okinda, B. 2020. Pastoralists turn to apps to find grazing fields. En: *Nation*. [Consultado el 1 de junio de 2022]. https://nation.africa/kenya/healthy-nation/pastoralists-turn-to-apps-to-find-grazing-fields-12554

80 Daum, T., Villalba, R., Anidi, O., Mayienga, S.M., Gupta, S. y Birner, R. 2021. Uber for tractors? Opportunities and challenges of digital tools for tractor hire in India and Nigeria. *World Development*, 144: 105480. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105480

81 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. y Shakil, S.R. 2015. A brief overview and systematic approach for using agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88–101. https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf

82 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavadithya, S. y Kumar, J. 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183–188. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf

83 Autor, D.H. 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3

84 Aune, J.B., Coulibaly, A. y Giller, K.E. 2017. Precision farming for increased land and labour productivity in semi-arid West Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37: 16. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0424-z

85 Nouhoheflin, T., Coulibaly, J.Y., D'Alessandro, S., Aitchédji, C.C., Damisa, M., Baributsa, D. y Lowenberg-DeBoer, J. 2017. Management lessons learned in supply chain development: the experience of PICS bags in West and Central Africa. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(3): 427–438. https://doi.org/10.22434/IFAMR2016.0167

86 Micle, D.E., Deiac, F., Olar, A., Drenţa, R.F., Florean, C., Coman, I.G. y Arion, F.H. 2021. Research on innovative business plan. Smart cattle farming using artificial intelligent robotic process automation. *Agriculture*, 11(5): 430. https://doi.org/10.3390/agriculture11050430

87 Gorbunova, A.V., Kostin, V.E., Pashkevich, I.L., Rybanov, A.A., Savchits, A.V., Silaev, A.A., Silaeva, E.Y. y Judaev, Y.V. 2020. Prospects and opportunities for the introduction of digital technologies into aquaculture governance system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422(1): 012125. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012125

88 Saha, S., Hasan Rajib, R. y Kabir, S. 2018. IoT based automated fish farm aquaculture monitoring system. *2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, págs. 201–206.

89 Neethirajan, S. y Kemp, B. 2021. Digital Livestock Farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 32: 100408. https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100408

90 FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2022. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles*. Roma, FAO. https://doi.org/10.4060/cc0639es

CAPÍTULO 4

1 FAO. 2021. *Engaging with small and medium agrifood enterprises to guide policy making. A qualitative research methodological guide.* Roma. www.fao.org/3/cb4179en/cb4179en.pdf

2 FAO. 2022. *Cross cutting theme on inclusivity. Marco estratégico de la FAO para 2022–2025.* Roma Documento interno.

3 Charlton, D., Hill, A.E. y Taylor, E.J. 2022. *Automation and social impacts: winners and losers.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 22-09 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

4 Morton, J.F. 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19680–19685. www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0701855104

5 Davidova, S., Fredriksson, L., Gorton, M., Mishev, P. y Petrovici, D. 2012. Subsistence farming, incomes, and agricultural livelihoods in the new Member States of the European Union. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 30(2): 209–227.

6 Sibhatu, K.T., Krishna, V.V. y Qaim, M. 2015. Production diversity and dietary diversity in smallholder farm households. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34): 10657–10662. https://doi.org/10.1073/pnas.1510982112

7 Sibhatu, K.T. y Qaim, M. 2017. Rural food security, subsistence agriculture, and seasonality. *PLOS ONE*, 12(10): e0186406. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186406

8 Frelat, R., Lopez-Ridaura, S., Giller, K.E., Herrero, M., Douxchamps, S., Djurfeldt, A.A., Erenstein, O. *et al.* 2016. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2): 458–463. https://doi.org/10.1073/pnas.1518384112

9 Hall, R., Scoones, I. y Tsikata, D. 2017. Plantations, outgrowers and commercial farming in Africa: agricultural commercialisation and implications for agrarian change. *The Journal of Peasant Studies*, 44(3): 515–537. https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1263187

10 Barnett, T. 1996. Subsistence agriculture. En: T. Barnett, E. Blas y A. Whiteside, (coords.). *AIDS Brief for sectoral planners and managers*, págs. 6-10. Ginebra, OMS. https://corpora.tika.apache.org/base/docs/govdocs1/153/153175.pdf

11 Mendoza, E.E., Rigor, A.C., Mordido, C.C. y Marajas, A.A. 1982. *Grain quality deterioration in on-farm level of operations. Proceedings of 5th Annual Grains Postharvest Technology Workshop, Los Baños, 1982*. Manila, South East Asia Cooperative Postharvest Research and Development Programme.

12 Proctor, D.L. 1994. *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*. Boletín del Servicio Agrícola de la FAO n.º 10. Roma, FAO.

13 de la Peña, C. 2013. Thinking through the tomato harvester. En: *Boom California*. [Consultado el 25 de julio de 2022]. https://boomcalifornia.org/2013/06/24/thinking-through-the-tomato-harvester

14 Gazzola, P., Grechi, D., Martinelli, I. y Pezzetti, R. 2022. The innovation of the cashierless store: a preliminary analysis in Italy. *Sustainability*, 14(4): 2034. https://doi.org/10.3390/su14042034

15 Rudd, J. 2019. Checking out productivity in grocery stores. *Beyond the Numbers: Productivity*, 8(15). (U.S. Bureau of Labor Statistics, diciembre de 2019). www.bls.gov/opub/btn/volume-8/checking-out-productivity-in-grocery-stores.htm

16 Reinartz, W., Wiegand, N. e Imschloss, M. 2019. The impact of digital transformation on the retailing value chain. *International Journal of Research in Marketing*, 36(3): 350–366. https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2018.12.002

17 Spruit, D. y Almenar, E. 2021. First market study in e-commerce food packaging: Resources, performance, and trends. *Food Packaging and Shelf Life*, 29: 100698.

18 Zhang, Y. y Huang, L. 2015. China's e-commerce development path and mode innovation of agricultural product based on business model canvas method. *WHICEB 2015 Proceedings*, 9. https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1076ycontext=whiceb2015

19 Zeng, Y., Jia, F., Wan, L. y Guo, H. 2017. E-commerce in agri-food sector: a systematic literature review. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(4): 439–460.

20 Cai, Y., Lang, Y., Zheng, S. y Zhang, Y. 2015. Research on the influence of e-commerce platform to agricultural logistics: An empirical analysis based on agricultural product marketing. *International Journal of Security and Its Applications*, 9(10): 287–296. http://article.nadiapub.com/IJSIA/vol9_no10/26.pdf

21 FAO e Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT). 2022. *Digital agriculture in action: selected case studies from India*. Country Investment Highlights n.º 17. Roma, FAO e ICRISAT. www.fao.org/3/cc0017en/cc0017en.pdf

22 FAO y Universidad de Zhejiang. 2021. *Rural e-commerce development: experience from China*. Informe sobre agricultura digital. Roma, FAO. www.fao.org/3/cb4960en/cb4960en.pdf

23 FAO. 2015. *Entendiendo el empleo rural decente*. Roma. https://www.fao.org/3/bc270s/bc270s.pdf

24 Takeshima, H. y Vos, R. 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Estudio de antecedentes. Roma, FAO. www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf

25 Deichmann, U., Goyal, A. y Mishra, D. 2016. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? Policy Research Working Paper n.º 7669. Washington D. C., Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24507

26 Nakasone, E. y Torero, M. 2016. A text message away: ICTs as a tool to improve food security. *Agricultural Economics*, 47: 49–59. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/75854/1/MPRA_paper_75854.pdf

27 Sekabira, H. y Qaim, M. 2017. Can mobile phones improve gender equality and nutrition? Panel data evidence from farm households in Uganda. *Food Policy*, 73: 95–103.

28 Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2020. *Agricultura 4.0 – Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos N. 24. Roma, FAO. https://www.fao.org/3/cb2186es/CB2186ES.pdf

29 Bonacich, E. y De Lara, J.D. 2009. *Economic crisis and the logistics industry: Financial insecurity for warehouse workers in the inland empire*. Documento de trabajo del IRLE n.º 2009–13. UCLA, Los Angeles (Estados Unidos). https://escholarship.org/uc/item/8rn2h9ch

30 Gittleman, M. y Monaco, K. 2020. Truck-driving jobs: Are they headed for rapid elimination? *ILR Review*, 73(1): 3–24.

31 England, P. 2010. The gender revolution: Uneven and stalled. *Gender and Society*, 24(2): 149–166.

32 Scott, A. y Davis-Sramek, B. 2021. *Driving in a man's world: Intra-occupational gender segregation in the trucking industry*. Documento de trabajo. www.researchgate.net/publication/349104605_Driving_in_a_Man%27s_World_Intra-occupational_Gender_Segregation_in_the_Trucking_Industry

33 U.S. Bureau of Labor Statistics. 2022. Labor force statistics from the current population survey. En: *U.S. Bureau of Labor Statistics*. [Consultado el 18 de marzo de 2022]. www.bls.gov/cps/cpsaat11.htm

34 Rapsomanikis, G. 2015. *The economic lives of smallholder farmers: An analysis based on household data from nine countries*. Roma, FAO. www.fao.org/3/i5251e/i5251e.pdf

35 Adu-Baffour, F., Daum, T. y Birner, R. 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133145. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007

36 Ogutu, S.O., Ochieng, D.O. y Qaim, M. 2020. Supermarket contracts and smallholder farmers: Implications for income and multidimensional poverty. *Food Policy*, 95: 101940. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101940

37 Chege, C.G.K., Andersson, C.I.M. y Qaim, M. 2015. Impacts of supermarkets on farm household nutrition in Kenya. *World Development*, 72: 394–407. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.03.016

38 Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. y Kaumbutho, P. 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5

39 Guilhoto, J.J.M., Barros, A., Marjotta-Maistro, M. e Istake, M. 2002. *Mechanization process of the sugar cane harvest and its direct and indirect impact over the employment in Brazil and in its 5 macro regions*. Documento del MPRA n.º 38070. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/38070/1/MPRA_paper_38070.pdf

40 Charlton, D. y Kostandini, G. 2021. Can technology compensate for a labor shortage? Effects of 287(g) immigration policies on the U.S. dairy industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(1): 70–89. https://doi.org/10.1111/ajae.12125

41 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. y Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

42 Ortega, A.C., de Jesus, C.M. y Mouro, M. de C. 2009. Mecanização e emprego na cafeicultura do Cerrado Mineiro [Mecanización y empleo en la caficultura de Cerrado Mineiro]. *Revista Da ABET*, 8(2). https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/abet/article/view/15268/8674

43 Posadas, B.C., Knight, P.R., Coker, R.Y., Coker, C.H., Langlois, S.A. y Fain, G. 2008. Socioeconomic impact of automation on horticulture production firms in the Northern Gulf of Mexico region. *HortTechnology*, 18(4): 697–704. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.4.697

44 Charlton, D. y Taylor, J.E. 2020. Rural school access and the agricultural transformation. *Agricultural Economics*, 51(5): 641–654. https://doi.org/10.1111/agec.12583

45 Taylor, J.E. y Charlton, D. 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.

46 Lachia, N., Pichon, L. y Tisseyre, B. 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. En: J.V. Stafford, ed. *Precision agriculture '19*. págs. 851–857. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105

47 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 19-08 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

48 Ma, M., Saitone, T.L., Volpe, R.J., Sexton, R.J. y Saksena, M. 2019. Market concentration, market shares, and retail food prices: Evidence from the U.S. Women, Infants, and Children Program. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 41(3): 542–562. https://doi.org/10.1093/aepp/ppy016

49 Torero, M. 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. En: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg y M. Sánchez Sorondo, (coords.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, págs. 99-107. Springer.

50 Banco Mundial. 2020. *Poverty and shared prosperity 2020: Reversals of fortune*. Washington D. C., Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34496

51 FAO. 2022. *Inclusion of persons with disabilities in FAO's work: Information Note*. Roma. (no publicado).

52 Filipski, M., Aboudrare, A., Lybbert, T.J. y Taylor, J.E. 2017. Spice price spikes: Simulating impacts of saffron price volatility in a gendered local economy-wide model. *World Development*, 91: 84–99. https://arefiles.ucdavis.edu/uploads/filer_public/e3/9d/e39d6c38-56a6-4f56-8831-8947ef0648e2/2017_filipski_et_al_wd_spice_price_spikes.pdf

53 Diiro, G.M., Fisher, M., Kassie, M., Muriithi, B.W. y Muricho, G. 2021. How does adoption of labor saving agricultural technologies affect intrahousehold resource allocations? The case of push-pull technology in Western Kenya. *Food Policy*, 102: 102114. http://oar.icrisat.org/11845/1/Impact%20of%20Push%20Pull%20Technology%20on%20Intra-Household%20Labour%20Allocation%20in%20Kenya.pdf

54 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

55 Vemireddy, V. y Choudhary, A. 2021. A systematic review of labor-saving technologies: Implications for women in agriculture. *Global Food Security*, 29: 100541.

56 GIZ (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional). 2020. *Gender-transformative change in practice: 6 case studies*. Agricultural Technical Vocational Education and Training for Women (ATVET4W). Pretoria. www.giz.de/en/downloads/giz2020_en_GTC%20in%20Practice_6%20Case%20Studies_Interactive.pdf

57 Majumder, J. y Shah, P. 2017. Mapping the role of women in Indian agriculture. *Annals of Anthropological Practice*, 41(2): 46–54. https://doi.org/10.1111/napa.12112

58 Theis, S., Sultana, N. y Krupnik, T.J. 2018. *Overcoming gender gaps in rural mechanization: Lessons from reaper-harvester service provision in Bangladesh*. GCAN Project Note 8. CSISA Research Note 9. Washington D. C., IFPRI. http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/132358

59 Flores Rojas, M. 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf

60 FAO. 2019. *Fostering the uptake of labour-saving technologies: How to develop effective strategies to benefit rural women*. Roma. www.fao.org/3/CA2731EN/ca2731en.pdf

61 Daum, T., Adegbola, P.Y., Adegbola, C., Daudu, C., Issa, F., Kamau, G., Kergna, A.O. *et al.* 2022. Mechanization, digitalization, and rural youth - Stakeholder perceptions on three mega-topics for agricultural transformation in four African countries. *Global Food Security*, 32: 100616. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100616

62 Kim, J. 2019. Innovative technology in the agricultural sectors: Opportunities for green jobs or exacerbation of rural youth unemployment? *Proceedings of the Future of Work in Agriculture Conference*. Washington D. C. https://farmlabor.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk5936/files/inline-files/Jeongha%20Kim%3B%20Ag%20Tech.pdf

63 Khanna, M. 2021. Digital transformation of the agricultural sector: Pathways, drivers and policy implications. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1221–1242. https://doi.org/10.1002/aepp.13103

CAPÍTULO 5

1 Rose, D.C., Lyon, J., de Boon, A., Hanheide, M. y Pearson, S. 2021. Responsible development of autonomous robotics in agriculture. *Nature Food*, 2: 306–309. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00287-9

2 Klerkx, L. y Rose, D. 2020. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24: 100347. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347

3 Ag-Incentives. 2022. En: *Ag-Incentives*. [Consultado el 4 de mayo de 2022]. http://ag-incentives.org

4 FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2022. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles*. Roma, FAO. https://doi.org/10.4060/cc0639es

5 Daum, T. y Birner, R. 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959–979. https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9

6 Cramb, R. y Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 165-201. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf

7 Justice, S. y Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013

8 Corporación Financiera Internacional (IFC). 2019. *The market opportunity for Productive Use Leveraging Solar Energy (PULSE) in sub-Saharan Africa*. Washington D. C. www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2019/09/PULSE-Report.pdf

9 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022, documento de antecedentes.* Documento interno.

10 Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Finlandia. 2011. *Communications Market Act*. www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2003/en20030393.pdf

11 Comisión Europea. 2020. *Facing the challenges of broadband deployment in rural and remote areas: A handbook for project promoters and policy makers*. www.byanatsforum.se/wp-content/uploads/2020/05/Broadband-handbook-2020pdf.pdf

12 Van Loon, J., Woltering, L., Krupnik, T.J., Baudron, F., Boa, M. y Govaerts, B. 2020. Scaling agricultural mechanization services in smallholder farming systems: Case studies from sub-Saharan Africa, South Asia, and Latin America. *Agricultural Systems*, 180: 102792. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102792

13 Diao, X., Takeshima, H. y Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095

14 Kwet, M. 2019. Digital colonialism is threatening the Global South. En: *Aljazeera*. [Consultado el 25 de julio de 2022]. www.aljazeera.com/opinions/2019/3/13/digital-colonialism-is-threatening-the-global-south

15 Ávila Pinto, R. 2018. ¿Soberanía digital o colonialismo digital?. Revista internacional de derechos humanos, 15(27): 15-27. https://sur.conectas.org/en/digital-sovereignty-or-digital-colonialism/

16 Unión Africana. 2020. *The digital transformation strategy for Africa (2020-2030)*. Addis Abeba. https://au.int/sites/default/files/documents/38507-doc-dts-english.pdf

17 Smart Africa. 2022. *AgriTech blueprint for Africa*. https://smart.africa/board/login/uploads/71613-continental-agritech-blueprint-eng.pdf

18 FAO y UIT. 2017. *E-agriculture strategy guide: A summary*. Bangkok. www.fao.org/3/i6909e/i6909e.pdf

19 Ströh de Martínez, C., Feddersen, M. y Speicher, A. 2016. *Food security in sub-Saharan Africa: A fresh look on agricultural mechanisation. How adapted financial solutions can make a difference*. Estudio n.º 91. Bonn (Alemania), German Development Institute. www.die-gdi.de/uploads/media/Study_91.pdf

20 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. y Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India: Status, evolution, implications, and lessons learned. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 97-138. Washington D. C., IFPRI. https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090

21 FAO y CUA. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Abeba. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

22 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

23 Win, M.T., Belton, B. y Zhang, X. 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. En: X. Diao, H. Takeshima y X. Zhang, (coords.). *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* págs. 263-284. Washington D. C., IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08

24 Meyer, R. 2011. *Subsidies as an instrument in agriculture finance: a review*. Washington D. C., Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/bitstreamhandle/10986/12696/707300ESW0P1120ies0as0an0Instrument.pdf?sequence=1yisAllowed=y

25 Houssou, N., Diao, X., Cossar, F., Kolavalli, S., Jimah, K. y Aboagye, P.O. 2013. Agricultural mechanization in Ghana: Is specialization in agricultural mechanization a viable business model? American Journal of Agricultural Economics, 95(5): 1237–1244. https://doi.org/10.1093/ajae/aat026

26 Daum, T., Huffman, W. y Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany.* Economics Working Paper. Ames (Estados Unidos), Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47

27 Grain Producers Australia (GPA), Tractor and Machinery Association (TMA) y Society of Precision Agriculture Australia (SPAA). 2021. *Code of practice. Agricultural Mobile Field Machinery with Autonomous Functions in Australia*. www.graincentral.com/wp-content/uploads/2021/08/Code-of-Practice.pdf

28 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. *et al.* 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848–864. https://doi.org/10.1002/aepp.13177

29 Justice, S., Flores Rojas, M. y Basnyat, M. 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Roma, FAO. www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf

30 Flores Rojas, M. 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf

31 Comité de Seguridad Alimentaria Mundial (CSA). 2014. *Principios para la inversion responsable en la agricultura y los sistemas alimentarios*. Roma. https://www.fao.org/3/au866s/au866s.pdf

32 Alves, B.J.R., Madari, B.E. y Boddey, R.M. 2017. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108: 1–4. https://doi.org/10.1007/s10705-017-9851-0

33 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

34 Northrup, D.L., Basso, B., Wang, M.Q., Morgan, C.L.S. y Benfey, P.N. 2021. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row–crop production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(28): e2022666118.

35 FAO. 2020. Agricultura de conservación. En: *FAO*. Roma. [Consultado el 1 de agosto de 2022]. https://www.fao.org/conservation-agriculture/es

36 Jaleta, M., Baudron, F., Krivokapic-Skoko, B. y Erenstein, O. 2019. Agricultural mechanization and reduced tillage: antagonism or synergy? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17(3): 219–230. https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1613742

37 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. y Tittonell, P. 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23–34. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017

38 Baudron, F., Nazare, R. y Matangi, D. 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. En: R. Sikora, E. Terry, P. Vlek y J. Chitja, (coords.). *Transforming agriculture in Southern Africa*, págs. 152-159. Londres, Routledge. www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi

39 FAO. 2022. Conducta empresarial responsable en la agricultura. En: *FAO*. Roma. [Consultado el 29 de junio de 2022]. https://www.fao.org/responsible-business-conduct-in-agriculture/es/

40 Comisión Europea. 2022. *Economía justa y sostenible: la Comisión establece normas para que las empresas respeten los derechos humanos y el medio ambiente en las cadenas de suministro mundiales*. Comunicado de prensa. Bruselas. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_22_1145

41 Torero, M. 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. En: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg y M. Sánchez Sorondo, (coords.). *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, págs. 99-107. Springer.

42 Adu-Baffour, F., Daum, T. y Birner, R. 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133–145. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007

43 Daum, T., Capezzone, F. y Birner, R. 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411–429. https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3

44 Sims, B., Hilmi, M. y Kienzle, J. 2016. *Agricultural mechanization. A key input for sub-Saharan African smallholders*. Manejo integrado de cultivos n.º 23. Roma, FAO. www.fao.org/3/i6044e/i6044e.pdf

45 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. y Addom, B. 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageninghen (Países Bajos). CTA. www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa

46 Trendov, N.M., Varas, S. y Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Roma, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf

47 Charlton, D., Hill, A.E. y Taylor, E.J. 2022. *Automation and social impacts: winners and losers. Documento de antecedentes para El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Documento de trabajo n.º 19-09 de la División de Economía del Desarrollo Agrícola de la FAO. Roma, FAO.

48 Mapiye, O., Makombe, G., Molotsi, A., Dzama, K. y Mapiye, C. 2021. Towards a revolutionized agricultural extension system for the sustainability of smallholder livestock production in developing countries: The potential role of ICTs. *Sustainability*, 13(11): 5868. https://doi.org/10.3390/su13115868

49 Bhattacharyya, T., Wani, S.P. y Tiwary, P. 2021. Empowerment of stakeholders for scaling-up: digital technologies for agricultural extension. En: S.P. Wani, K.V. Raju y T. Bhattacharyya, (coords.). *Scaling-up solutions for farmers*, págs. 121-147. Cham, Springer International Publishing. https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-77935-1_3

ANEXO 1

1 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 25 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

2 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. y McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies.* Documento de antecedentes para *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022.* Estudio técnico de la FAO n.º 24 sobre Economía del Desarrollo Agrícola. Roma, FAO.

EL ESTADO DEL MUNDO

2022
EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN

APROVECHAR LA AUTOMATIZACIÓN DE LA AGRICULTURA PARA TRANSFORMAR LOS SISTEMAS AGROALIMENTARIOS

La automatización ha ido conformando la agricultura mundial desde comienzos del siglo XX. La mecanización motorizada ha producido importantes beneficios en lo relativo a la mejora de la productividad, la reducción del trabajo pesado y una asignación más eficiente de la mano de obra, pero también ha ocasionado algunos impactos ambientales negativos. Más recientemente, ha aparecido una nueva generación de tecnologías de automatización digital de la agricultura que ofrece posibilidades de mejorar aún más la productividad, así como la resiliencia, abordando al mismo tiempo los problemas relacionados con la sostenibilidad ambiental causadas por la mecanización en el pasado.

En *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022* se examinan los factores determinantes de la automatización agrícola, incluidas las tecnologías digitales más recientes. Sobre la base de 27 estudios de casos, en el informe se analizan los argumentos a favor de la adopción de tecnologías de automatización digital en diferentes sistemas de producción agrícola de todo el mundo. Se señalan varios obstáculos que impiden la adopción inclusiva de estas tecnologías, especialmente por los pequeños productores. Los obstáculos principales son el bajo nivel de alfabetización digital y la falta de infraestructura de apoyo, como conectividad y acceso a la electricidad, junto con limitaciones financieras. Basándose en este análisis, en la publicación se proponen políticas para conseguir que los grupos desfavorecidos de las regiones en desarrollo puedan beneficiarse de la automatización agrícola y que la automatización contribuya a crear sistemas agroalimentarios sostenibles y resilientes.

ISBN 978-92-5-137020-9 ISSN 0251-1371

9 789251 370209

CB9479ES/1/12.22