

Adopción de tecnologías de agricultura de precisión en los grupos CREA

Jeremías Lachman
Sebastián Gómez-Roca
Andrés López



Autores

Jeremías Lachman

jeremiaslachman@gmail.com

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. Buenos Aires, Argentina.
CONICET-Universidad de Buenos Aires. Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP). Buenos Aires, Argentina.

Sebastián Gómez-Roca

sj.gomezroca@gmail.com

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. Buenos Aires, Argentina.
CONICET-Universidad de Buenos Aires. Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP). Buenos Aires, Argentina.

Andrés López

anlopez1962@gmail.com

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. Buenos Aires, Argentina.
CONICET-Universidad de Buenos Aires. Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP). Buenos Aires, Argentina.

Como citar:

Lachman, J., Gómez-Roca, S. y López, A. (2022). Adopción de tecnologías de agricultura de precisión en los grupos CREA. Serie Documentos de Trabajo del IIEP, 79, 1-43. <https://ojs.econ.uba.ar/index.php/DT-IIEP/issue/view/427>

Los Documentos de Trabajo del IIEP reflejan avances de investigaciones realizadas en el Instituto y se publican con acuerdo de la Comisión de Publicaciones. Los autores son responsables de las opiniones expresadas en los documentos.

Coordinación editorial

Ed. Hebe Dato

Corrección de estilo

Ariana Lay y Ed. Hebe Dato

Diseño

DG. Vanesa Sangoi

El Instituto Interdisciplinario de Economía Política IIEP UBA CONICET, reconoce a los autores de los artículos de la Serie de Documentos de Trabajo del IIEP la propiedad de sus derechos patrimoniales para disponer de su obra, publicarla, traducirla, adaptarla y reproducirla en cualquier forma. (Según el art. 2, Ley 11.723).



Esta es una obra bajo Licencia Creative Commons
Se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.

Adopción de tecnologías de agricultura de precisión en los grupos CREA

Difusión de tecnologías
Agricultura de precisión
Argentina

El objetivo de este trabajo es estudiar los factores que inciden en la adopción de tecnologías para la agricultura de precisión. La agricultura de precisión (AP) constituye un conjunto de métodos y procesos basados en el uso de tecnologías digitales y electrónicas que permiten la implementación de estrategias productivas diseñadas para los diversos microambientes que conviven en una misma superficie productiva. Este tipo de “planteos agronómicos” se valen de la identificación de la heterogeneidad ambiental, para luego aplicar una “receta productiva” adaptada a los diversos microambientes que existen en una propiedad agrícola (e. g., variando así la densidad de siembra, la aplicación de fertilizantes, la aplicación selectiva de herbicidas, etc.). Si bien este nuevo paquete tecnológico lleva ya algunos años en el mercado, su proceso de difusión lejos está de ser masivo, tanto en el escenario local como internacional. En este trabajo utilizamos los datos provenientes del Censo CREA 2019 –una organización privada de productores del agro– y empleamos diversos modelos econométricos para identificar los principales determinantes del proceso de difusión de las tecnologías AP. Los principales resultados del trabajo muestran que existen características estructurales (e. g., tamaño de la superficie agrícola y régimen de tenencia de la tierra) y de capital humano (e. g., nivel de formación del dueño) que inciden en el proceso de adopción de dichas tecnologías. Adicionalmente, identificamos que el acceso a fuentes externas de información (e. g., a través de la contratación de asesores), la relevancia asignada a la implementación de buenas prácticas ambientales en el campo y la experiencia aprendida de productores vecinos (lo que en el estudio llamamos “efectos de red”) también constituyen factores relevantes para explicar el fenómeno bajo estudio. Por otro lado, y contrario a lo asumido en parte de la literatura sobre el tema, la edad del dueño de la empresa, la posibilidad de tener conectividad a Internet en áreas rurales y la tenencia de maquinaria agrícola propia no emergieron como variables relevantes para explicar la adopción de AP. Consideramos que este estudio aporta elementos novedosos a la literatura especializada en este tema a escala internacional, así como también a la discusión y al diseño de políticas públicas en el ámbito nacional.

The adoption of precision agriculture technologies among CREA's members

Technology diffusion
Precision farming
Argentina

The objective of this work is to study the factors affecting the adoption of technologies for precision agriculture. Precision agriculture (PA) is based on a set of methods and processes that uses digital and electronic technologies that allow the design and implementation of tailored strategies for the various microenvironments that coexist in a field. These technologies allow producers to identify the environmental heterogeneity within an area, for then to apply a “productive recipe” adapted to those various microenvironments (e. g., thus varying the planting density, the application of fertilizers, the selective application of herbicides, etc.). Even though these new technologies have been on the market for some years, their diffusion process is far from massive, both locally and internationally. In this paper, we use data from the CREA –a private organization of agricultural producers– 2019 Census and use different econometric models to identify the main factors affecting the diffusion process of PA technologies. The results show that producers’ structural characteristics (e. g., size of the agricultural area and land tenure regime) and human capital (e. g. owner’s level of education) affect the adoption process. Additionally, we identified that the access to external sources of information (e. g. through the hiring of advisers), the relevance assigned to sustainable practices in production processes, and neighbouring producers’ experiences (what we call ‘network effects’) are

also relevant factors to explain the diffusion of PA technologies. Likewise, and contrary to what is assumed in some previous studies, business owners' age, Internet connectivity in rural areas, and owning agricultural machinery did not emerge as relevant variables to explain the adoption of PA. This study adds novel elements to the specialized literature on this topic at an international level and broadens the discussion at a national level, also contributing to the design of public policies aimed at facilitating the diffusion of PA technologies in Argentina.

JEL CODE O33, O13, Q01

Agradecimientos

Este trabajo se realizó de forma articulada con el Ing. Agr. Gabriel Tinghitella, el Ing. Agr. Nicolás Ciancio y el Dr. en Ciencias Agropecuarias Víctor Giménez, profesionales en agronomía del Área de Innovación, en la unidad de I+D de CREA, quienes, además de gestionar el aporte de la base de datos empleada en el estudio, también contribuyeron en aspectos fundamentales de la investigación, en particular en la construcción y definición de las variables, en el análisis de los resultados alcanzados y en la misma elaboración de este documento de trabajo.

Índice

6	1. Introducción	<hr/>
8	2. La adopción de Agricultura de Precisión en el mundo y en Argentina	<hr/>
12	3. Factores que inciden en la adopción de las tecnologías de AP: una revisión de la literatura	
16	Modelización de la difusión de innovaciones	<hr/>
17	4. Población analizada, variables, datos y metodología	
17	4.1 Población de interés	
19	4.2 Definición de variables y datos utilizados	
22	4.3 Metodología	<hr/>
23	5. El perfil de los adoptantes de tecnologías de AP	<hr/>
27	6. Estimaciones y principales resultados	
31	Controles de robustez	<hr/>
33	7. Conclusiones	<hr/>
35	Referencias	<hr/>
39	Anexo I. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el estudio	<hr/>
40	Anexo II. Detalles metodológicos para no economistas	<hr/>

1. Introducción

El incremento en la producción de alimentos es importante para cumplir algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) acordados para 2030 en el marco de las Naciones Unidas y el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático. Estos objetivos sugieren que los aumentos actuales y futuros de los rendimientos agrícolas deben basarse en el uso eficiente de los recursos naturales. La agricultura de precisión (AP) es un conjunto de métodos, procesos y tecnologías que facilitan el abordaje de estos desafíos, dado que permiten incrementar la productividad -es decir, la cantidad de producto obtenido por cada unidad de superficie implantada- optimizando el uso de insumos. Esta combinación permite incrementar la producción reduciendo la presión que la actividad ejerce sobre el ambiente (Satorre y Bert, 2014; Scaramuzza *et al.*, 2016).

La AP1 incluye una amplia variedad de nuevas tecnologías, la mayoría de ellas relacionadas con las tecnologías de la información y basadas en los sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés). Como herramientas emblemáticas se destacan los dispositivos para el relevamiento de diversas características edafológicas, los mapas de rendimientos, los sistemas de guiado para la maquinaria agrícola y los dispositivos para la aplicación variable de insumos, entre otros.

En términos generales, este conjunto de nuevas herramientas habilita a los productores a implementar estrategias productivas flexibles (Finger *et al.*, 2019). Estas tecnologías permiten identificar la heterogeneidad ambiental dentro de un lote² y así implementar estrategias de producción diferenciadas las cuales se adecúan a las particularidades de cada uno de esos ambientes (*e. g.*, con respecto a los requerimientos hídricos, de nutrientes, de aplicación de insumos para la protección de cultivos). De esta forma, la AP permite a los agricultores disponer de información “sitio específica” de suelos, malezas, plagas, niveles de humedad para poder entregar la dotación óptima de insumos (*e. g.*, agua, herbicidas, semillas, fertilizantes, etc.) según los requerimientos de cada ambiente (Bongiovanni & Lowenber-Deboer, 2004) mejorando la eficiencia y la sustentabilidad de los sistemas de producción³. Estas tecnologías también facilitan a sus usuarios adaptar sus procesos productivos en función de las condiciones climáticas que exploren, mejorando sus estrategias de producción (*i.e.*, riego, fertilización, aplicación de herbicidas, etc.).

Los métodos, procesos y tecnologías de la AP comenzaron a aparecer en el mercado a principios de la década de 1990 y se fueron volviendo más sofisticados con el pasar de los años. Si bien tuvieron una gran difusión a escala global, actualmente su penetración está lejos de ser masiva (Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019). De hecho, entre y dentro de los

¹ La agricultura de precisión es definida por la International Society of Precision Agriculture como una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otra información para respaldar las decisiones de gestión de acuerdo con la variabilidad estimada para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola. <https://www.ispag.org/>

² Entendemos el concepto de “lote” como una determinada unidad productiva agrícola.

³ Cabe destacar que el impacto productivo de estas tecnologías va a estar asociado a la existencia de diversos microambientes en una misma superficie productiva. A medida que aumenta la variabilidad ambiental en una superficie, mayores podrán ser los rendimientos que se deriven de la aplicación de herramientas para la AP.

países se observan marcadas diferencias en los niveles de adopción (Melchiori *et al.*, 2013; Schimelpfenning, 2016, Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019).

El objetivo de este trabajo es contribuir a la discusión sobre los factores que afectan los niveles de adopción de las tecnologías de AP en los sistemas de producción de cultivos anuales (como soja, maíz, trigo, etc.) de Argentina. Esta contribución es relevante porque, tal como señalan Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019), el estudio de los factores que afectan la difusión de estas tecnologías en economías en desarrollo no ha sido suficientemente explorado.

Para alcanzar el objetivo mencionado realizamos diversos ejercicios econométricos en búsqueda de identificar el impacto de diversas variables explicativas y controles típicamente considerados en la literatura que estudia la difusión de tecnologías de AP en países avanzados (*e.g.*, características de las empresas, capital humano, regiones geográficas). Este trabajo, además de representar el primer estudio en su tipo para el caso argentino⁴, también incorpora al análisis otras variables de interés (es decir, con potencial de impacto sobre los niveles de adopción de AP) que raramente han sido analizadas en la literatura previa sobre el tema. En particular, nuestro trabajo considera la posible existencia de “efectos de red” -*i.e.*, cómo impacta sobre las decisiones de incorporación de tecnologías de AP el nivel de adopción en productores vinculados-, y las vinculaciones entre la difusión de la AP y las prácticas de cuidado del ambiente que llevan a cabo los productores agrícolas.

En el trabajo empleamos una base de datos única, proveniente de un censo nacional realizado a integrantes de una asociación de productores agropecuarios llamada Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA o CREA). Este censo se realizó entre el 15 de agosto y 15 de noviembre de 2019 y cubrió a 1.356 de sus miembros asociados. El censo incluyó 892 parámetros, abarcando diversos temas, entre ellos, el nivel de uso de tecnologías de AP.

CREA es una asociación civil sin fines de lucro que nuclea a empresarios agropecuarios. En la actualidad, está conformada por 2.087 empresas. Estas empresas se distribuyen en 232 grupos, los denominados “grupos CREA”. A su vez, los grupos CREA se ubican en 19 regiones, desde el Noroeste Argentino hasta la Patagonia y desde los valles cordilleranos hasta la región mesopotámica, incluyendo las áreas centrales de producción agrícola de la pampa húmeda. Todos los meses, los productores CREA, en el seno de sus grupos y acompañados por un asesor⁵ se reúnen para trabajar distintos tipos de temas relacionados con las actividades y las necesidades de sus empresas (i. e., temas técnicos, comerciales, financieros, empresariales, etc.). El objetivo último de los grupos es compartir ideas,

⁴ Si bien hay trabajos que relevaron adopción de AP y las asociaron a características estructurales de los productores, hasta el momento no se había realizado otro estudio que analice de forma conjunta el efecto de diversos factores sobre la probabilidad e intensidad de incorporación de estas herramientas.

⁵ Los asesores de grupos CREA son típicamente ingenieros agropecuarios los cuales brindan apoyo técnico especializado a los miembros del grupo. A su vez, los asesores CREA también cuentan con instancias de intercambio de conocimientos y experiencias entre ellos, así como también con la sede central de CREA, en donde se reciben consultas específicas sobre las cuales pueden intervenir especialistas en temas particulares (*e. g.*, especialistas en tiramiento de malezas resistentes, especialistas en suelos). Típicamente cada grupo CREA trabaja con un asesor.

experiencias, conocimientos, datos e información para mejorar los resultados de sus empresas.

Cabe destacar que este trabajo se realizó de forma articulada con profesionales en agronomía de la unidad de I+D de CREA, quienes, tal como se menciona en la portada del documento, aportaron elementos fundamentales para la construcción y definición de las variables, analizar los resultados provisionales y finales y a elaborar este documento de trabajo.

Los resultados demuestran que los niveles de adopción de las tecnologías de AP están afectados por una serie de factores estructurales asociados con la empresa de producción agrícola (*e. g.*, su extensión, si produce en campo propio o alquilado), el capital humano (especialmente el nivel de formación de quien toma las decisiones productivas), así como también los “efectos de red” y las “prácticas de cuidado ambiental”. El impacto de estos dos últimos factores sobre los niveles de adopción de las tecnologías de AP, como se mencionó previamente, constituye un hallazgo novedoso de este estudio.

Los “efectos de red” están ligados a los aprendizajes que puedan emerger a partir de las vinculaciones externas a la unidad productiva (*e. g.*, los vecinos) e indican que la adopción de herramientas de AP también está afectada por la información que puede ser provista desde afuera de la empresa. En el trabajo hallamos que el efecto de la dinámica de trabajo de los grupos CREA tuvo un impacto relevante sobre los niveles de adopción de las tecnologías de AP. De igual modo, los niveles de adopción de “prácticas de cuidado ambiental” en la empresa también afectaron positivamente la incorporación de las tecnologías de AP. La identificación de estos dos factores puede ser relevante para el diseño de instrumentos orientados a promover la adopción de la AP, en particular, dada la rigidez de corto plazo para modificar los factores estructurales y de capital humano de las empresas.

El trabajo se estructura en siete secciones. A continuación, en la sección 2, se presenta el panorama de la adopción de AP en el mundo y en Argentina. En la siguiente sección, se realiza una revisión de la literatura y discutimos el estado del arte respecto de los factores que inciden en los niveles de adopción de la AP. En la sección 4 se presentan los datos, las variables y se discute la metodología empleada. En la sección 5 se describe el perfil de los adoptantes de AP en CREA a partir de un análisis de los datos arrojados por el censo CREA 2019. En la sección 6 se presentan las estimaciones econométricas y los principales resultados. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones alcanzadas en el marco de este trabajo.

2. La adopción de Agricultura de Precisión en el mundo y en Argentina

Según Pierce & Nowak (1999) los orígenes de la denominada Agricultura de Precisión (AP) se remontan a la década de 1960 cuando se realizaron las primeras aplicaciones de las tecnologías de Geoposicionamiento en los Estados Unidos. Por otro lado, Lowenberg-DeBoer (2018), identifican sus orígenes en la década de 1980. Sin embargo, recién a partir de la década de 1990 se comienza a registrar un mayor nivel de difusión de las distintas tecnologías y procesos de AP a nivel global.

La AP constituye un nuevo paradigma tecnológico que involucra diversas herramientas; de hecho, Lowenberg-DeBoer (2019) la define como una caja de herramientas dentro de la cual

un productor puede elegir diversas combinaciones para emplear a campo. Entre las tecnologías asociadas o que forman parte de este paradigma se encuentran los GPS, los monitores de rendimiento y siembra, los banderilleros satelitales, los sistemas de dosificación variable, las imágenes satelitales, los pilotos automáticos y los mapas de conductividad y de suelos, entre otros.

En la literatura especializada en el tema, típicamente se destacan diversos factores que influyen sobre la adopción de las tecnologías de AP. La heterogeneidad ambiental y su variabilidad espacial, la escala de producción, la capacidad de los productores para afrontar una inversión, y hasta los cultivos que se siembran, son solo algunos de los factores que pueden influir sobre la factibilidad y/o la conveniencia de utilizar (o no) algunos de esos procesos y tecnologías. Gestionar la agricultura en un planteo de AP no implica adoptar un paquete tecnológico único que se encuentra claramente definido. Por el contrario, admite la implementación de una amplia gama de combinaciones de procesos y tecnologías, factor que también complejiza la medición de este fenómeno.

Actualmente, a nivel internacional no se dispone de una base de datos unificada con consistencia metodológica que permita comparar el grado de adopción de tecnologías de AP. No obstante, a partir de información segmentada puede realizarse una caracterización de su evolución y del estado de situación actual. En la década de 1990, en EE. UU. se encontraba el mayor grado de desarrollo de la AP. Hacia finales de la década de 1990 y principios de la década del 2000 estas prácticas y tecnologías se habían difundido a un gran número de países, de acuerdo con lo señalado por Griffin & Lowenber-DeBoer (2005). En esa época, EE. UU., Argentina y Brasil eran, a nivel global, los países con mayores niveles de adopción de monitores de rendimiento (una de las primeras tecnologías de la denominada AP). Pero en nuestro país este indicador, medido sobre la cantidad de hectáreas cultivables, era muy inferior al que se registraba en Estados Unidos (65 y 335 monitores de rendimiento por millón de hectáreas en Argentina y EE. UU., respectivamente).

Por otra parte, Lowenberg-DeBoer (2019) presentan comparaciones a nivel internacional. Un primer punto, es que la adopción de tecnologías agrícolas es menor en aquellas regiones en las que la agricultura se encuentra menos desarrollada. En Asia y África los niveles de adopción son bajos, mientras que en países como Alemania, Argentina y Brasil los niveles de adopción son relativamente altos. Estas diferencias, según postula el autor, se pueden deber a una multiplicidad de factores entre los que se destacan el costo de ciertas inversiones y la falta de adaptación de algunas tecnologías a los mercados de baja escala.

La mayor intensidad de adopción de tecnologías de AP se observa en cultivos extensivos, donde la variabilidad de los ambientes productivos es mayor. A su vez, en los sistemas de producción extensivos, algunos cultivos, los más vulnerables a los factores ambientales, pueden verse beneficiados en mayor medida por la implementación de este tipo de tecnologías. El informe del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Schimmelpfennig, 2016) destaca que arroz, maíz y soja son los cultivos en los que se registran los mayores incrementos en los niveles de adopción de la AP, mientras que en los cultivos de trigo, si bien el incremento del nivel de adopción del AP también aumenta, se limita a un número acotado de tecnologías. Por último, el algodón tiene una tasa de adopción relativamente baja.

Una fuente de variabilidad adicional es el tipo de tecnología. Lowenberg-DeBoer (2019) señala que la difusión de los sistemas de guía por Global Navigation Satellite Systems (GNSS) ha sido muy acelerada si la comparamos con las tecnologías para realizar dosificación variable de insumos. Entre los factores que explican esta diferencia, se

destacan los costos y la adaptabilidad de las tecnologías a distintas regiones. Otros aspectos que influyen sobre la intensidad del nivel de adopción de las tecnologías son su grado de madurez y el nivel de dificultad para manipularlas. En ese sentido, Scaramuzza *et al.* (2016) señala que en Argentina la volatilidad en los niveles de adopción de una herramienta en particular, los drones. Esta tecnología, en función de las altas expectativas generadas por su potencial utilidad, presentó un fuerte incremento inicial en los niveles de adopción, pero posteriormente experimentó una también fuerte caída, en función de sus utilidades reales y el complejo conjunto de habilidades que demandaba su correcta utilización.

Todos estos aspectos resultan sumamente importantes para comparar las estadísticas presentadas en diversos estudios, ya que las potenciales diferencias metodológicas o en términos de fuentes y períodos de los datos utilizados pueden conducir a resultados difícilmente comparables. Por ejemplo, los trabajos de Thompson *et al.* (2018) y Erickson *et al.* (2017), que estudian la adopción de diversas tecnologías en Estados Unidos en periodos temporales similares, encuentran resultados marcadamente distintos.

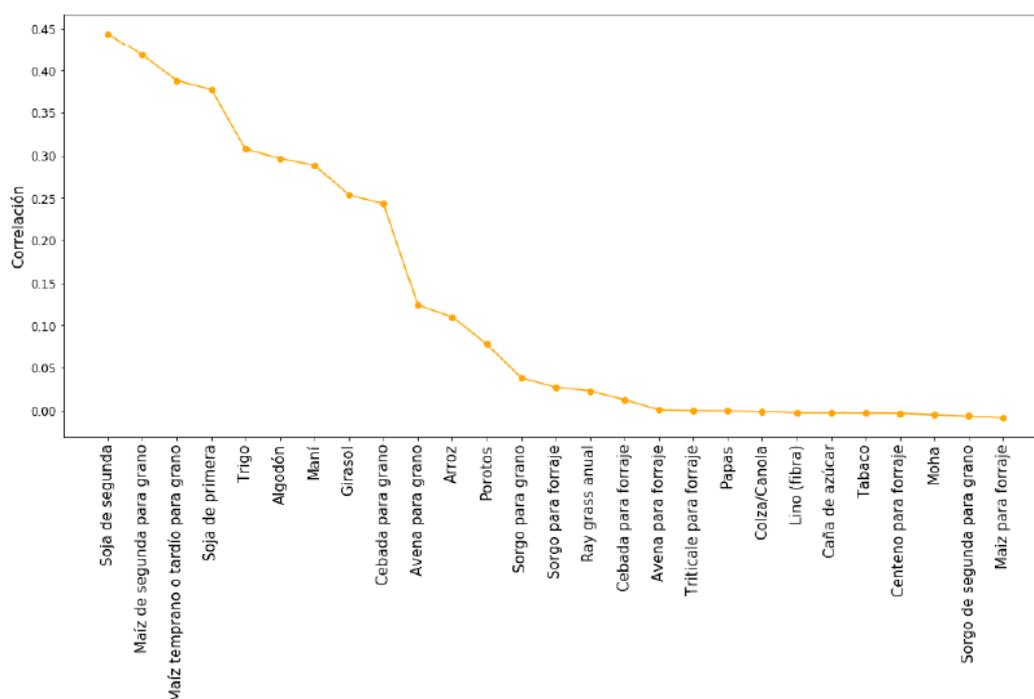
A nivel local, también existe una amplia variabilidad entre los resultados de estudios previos, aunque la evidencia es consistente en reflejar un creciente interés en estas tecnologías (Satorre y Bert, 2014; Scaramuzza *et al.*, 2016). Este aspecto se observa al comparar dos estudios de la Universidad Austral (2010; 2012), donde se encuestan cientos de productores de varias provincias⁶. Cabe destacar que entre la primera y la segunda encuesta se ve un aumento en la proporción de productores que destacaron a la AP como un desafío a ser enfrentado.

Adicionalmente, Lachman y López (2018) utilizan una base de datos de la empresa Map of Agriculture⁷ que señala un aumento en los niveles de adopción de tecnologías de AP entre 2016 y 2019 (11% y 16%, respectivamente). En cuanto a los cultivos en los que más se utilizan este tipo de tecnologías, los más reportados son soja y maíz, un resultado esperable por tratarse de cultivos extensivos para los cuales buena parte de estas tecnologías ya se encuentran maduras. Esto se presenta en el Gráfico 1.

⁶ En el estudio publicado en 2010 se relevaron 502 productores, y en el 2012, 770 productores. En ambos estudios la mayor parte de los productores relevados fueron de las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe.

⁷ Esta empresa neozelandesa se dedica a la generación de estadísticas de agricultura y ganadería realizando encuestas a productores.

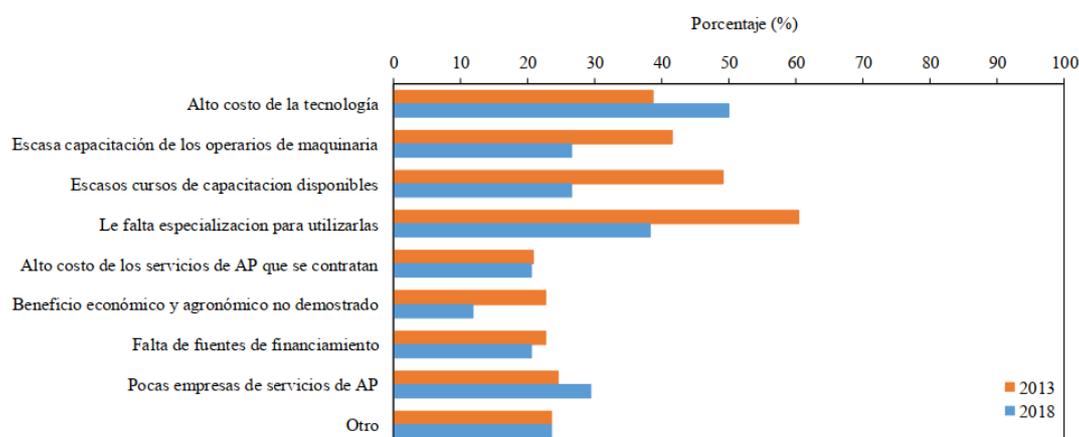
Gráfico 1. Correlación entre tipo de cultivo y la utilización de tecnologías de AP



Fuente: Lachman y López (2018).

Melchiori *et al.* (2018), a partir de encuestas realizadas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), presentan el grado de avance en los niveles de adopción de diferentes tecnologías a través del tiempo. Entre los años 2013 y 2018 las tecnologías que más crecieron en su adopción fueron los pilotos automáticos (pasando del 40 a 61%), los sistemas de corte por surco (de 7 a 21%), y los sistemas de siembra y fertilización variable (de 27 a 35% y de 29 a 41%, respectivamente). En el mismo trabajo los autores también relevaron limitantes para la adopción de tecnologías de AP (Gráfico 2).

Gráfico 2. Limitantes para la adopción de tecnologías de AP



Fuente: Melchiori *et al.* (2018).

En este sentido, la restricción presupuestaria no constituye un aspecto menor. Este factor no solo limita la demanda, sino también la oferta de este tipo de tecnologías. Lachman *et al.* (2021) señalan que un obstáculo frecuente para las empresas proveedoras de tecnologías de AP ha sido el acceso al financiamiento (ver también Melchiori *et al.*, 2018).

3. Factores que inciden en la adopción de las tecnologías de AP: una revisión de la literatura

El estudio de los factores que afectan la difusión de tecnologías en la agricultura ha sido abordado ampliamente en la literatura económica desde, por lo menos, la década de 1950 (por ejemplo, Griliches, 1957). Esta literatura continúa en desarrollo hasta la actualidad e incluye, en el período más reciente, el análisis de las tecnologías de AP.

Si bien existen estudios sobre la adopción de tecnologías de AP en una gran variedad de países, el mayor número de trabajos se ha realizado para países desarrollados. Estos trabajos principalmente cubren regiones de EE. UU., naciones europeas u otras economías de altos ingresos. En las economías en desarrollo el tema se ha investigado de forma menos exhaustiva, probablemente debido a la escasez de información.

En la Tabla 1 se presenta información resumida sobre un conjunto de trabajos que estudian empíricamente los factores que impulsan la adopción de tecnologías de AP. Esta literatura, como se puede observar, presenta cierta heterogeneidad en cuanto a su objeto de estudio específico. En efecto, los trabajos respectivos analizan distintas tecnologías o grupos de tecnologías (Michels *et al.*, 2020; Tamirat *et al.*, 2018; Kolady *et al.*, 2021; Kountios *et al.*, 2018; Bramley & Ouzman, 2019), se enfocan en distintos países y regiones (Pandit *et al.*, 2012; Akudugu *et al.*, 2012), y en distintos cultivos o grupos de cultivos (Mitchell *et al.*, 2018; Boyer *et al.*, 2016; Kountios *et al.*, 2018; Paustian & Theuvsen, 2017; Schimmelpfennig, 2017).

A su vez, esta literatura busca analizar la incidencia de diversos factores en la adopción de tecnologías de AP, incluyendo variables asociadas a características estructurales de los establecimientos agrícolas (*e. g.*, tamaño de la superficie explotada, ubicación geográfica, tenencia de maquinaria agrícola, régimen de tenencia de la tierra -campos propios o alquilados-, conectividad a Internet, forma societaria, años de vida de la empresa), variables asociadas a los rasgos de quien toma las decisiones productivas y el capital humano disponible en la empresa (*e. g.*, edad de quien toma las decisiones y de sus colaboradores, nivel de formación educativa alcanzada por estos, variables relacionadas con las perspectivas de género), así como también otras orientadas a explorar el impacto de algunos elementos específicos (*e. g.*, adopción de prácticas de cuidado medioambiental, disponibilidad de fuentes externas de información). Cabe destacar que, en todas las referencias analizadas, las estrategias para el estudio de adopción de tecnologías de AP exploraron la vinculación entre diversos factores que, potencialmente, podrían incidir en la difusión de las herramientas aquí estudiadas, en lugar de focalizar el estudio en una variable en particular.

En la Tabla 1 se incluyen especificaciones acerca de la metodología empleada por los trabajos relevados, así como también los principales resultados obtenidos en cada caso. En términos generales, resulta posible caracterizar al adoptante de AP como un productor con relativamente altos niveles de educación, o al menos dotado de habilidades computacionales que le permiten manipular o aprender a utilizar determinados tipos de

tecnologías de base digital. Estos productores suelen realizar sus actividades productivas en una superficie extensa en la que probablemente se encuentre una mayor variabilidad de ambientes productivos (*i. e.*, el tamaño de la superficie explotada emerge reiteradamente como una variable relevante para la adopción; a mayor variabilidad de ambientes, es esperable que los retornos a la inversión en este tipo de tecnologías resulten mayores ya que esa heterogeneidad permite explotar de forma más efectiva las virtudes del paradigma de AP). De forma complementaria, los productores que implementan este tipo de tecnologías suelen contar con mayores niveles de equipamiento y maquinaria y/o tener mejor acceso al mercado de crédito⁸. Adicionalmente, en estos trabajos suele verificarse la menor propensión a la adopción de estas tecnologías entre los productores que alquilan la superficie que utilizan para producir.

Respecto de las prácticas de cuidado medioambiental Kountios *et al.* (2018) destaca que los productores adoptantes de tecnologías de AP suelen llevar a cabo ese tipo de prácticas con mayor frecuencia. De hecho, estas tecnologías no solo mejoran los retornos productivos y económicos, sino que también aumentan los niveles de sustentabilidad de las actividades agropecuarias y, por lo tanto, de los sistemas de producción. Por otra parte, el acceso a fuentes de información externa parece constituir una ventaja para un productor a la hora de decidir adoptar este tipo de tecnologías. No obstante, muy pocos estudios analizan el efecto de esta variable⁹.

Las variables identificadas en la Tabla 1 constituyen la línea de base tomada como referencia para este estudio. Cabe destacar que, dadas las limitaciones de acceso a la información, hubo variables que no pudieron ser incluidas en el trabajo; por ejemplo, no consideramos los tipos de cultivos implantados, tal como hacen Paustian & Theuvsen (2017).

⁸ Cabe destacar que en Argentina existe una amplia oferta de contratistas de servicios agrícolas (Lódola y Brigo, 2013; Bisang, 2003), lo cual reduce la necesidad de que los productores sean los dueños de los bienes de capital necesarios para la ejecución de tareas agrícolas (*e. g.*, siembra, fertilización).

⁹ La agricultura de precisión supone un cambio de rutinas productivas dentro de los establecimientos, al basarse en planteos de producción que se ajustan a las características de los diversos microambientes. Esto supone una mayor dificultad técnica con respecto a los esquemas productivos que, por ejemplo, aplican insumos de forma homogénea en una superficie determinada. Dada esta mayor complejidad, sería de esperar que el acceso a fuentes de información externa pueda ser relevante a la hora de acceder a aquellos conocimientos requeridos para adoptar este tipo de procesos productivos.

Tabla 1. Revisión de factores que afectan la adopción de tecnologías de AP

Año	Autor(es)	País	Cultivos	Tecnologías cubiertas	Factores que afectan la adopción de AP	Metodología
2021	Kolady <i>et al.</i>	Estados Unidos (Dakota del Sur)	Maíz y Soja	Múltiples (piloto automático, sistemas de guía GPS, entre otras).	Superficie cultivada, percepciones de los productores sobre rentabilidad e ingresos.	Modelo binario probit y regresión de Poisson.
2020	Michels <i>et al.</i>	Alemania	No mencionado	Teléfonos inteligentes.	Edad, educación y tamaño de la finca.	Modelo binario logit.
2018	Kountios <i>et al.</i>	Grecia	Múltiples (algodón, cereales, entre otros)	Dosificación variable, Teledetección y Sistemas de información.	Educación, conciencia de la sostenibilidad ambiental, económica y social asociadas a las tecnologías de AP.	Análisis de regresión categórica.
2018	Mitchell <i>et al.</i>	Canadá	Soja	Múltiples (mapeo de campo, drones, entre otras).	Tamaño y ubicación de la explotación, equipo y maquinaria de los agricultores.	Estadísticas descriptivas.
2018	Tamirat <i>et al.</i>	Dinamarca y Alemania	No mencionado	GPS y piloto automático.	Tamaño de la explotación, edad del agricultor y eventos de demostración y creación de redes.	Modelos binarios logit y probit.
2018	Miller <i>et al.</i>	Estados Unidos	Maíz y Soja	Múltiples (piloto automático, banderillero satelital y corte por secciones, entre otras).	Aversión al riesgo, costos de producción e inversión, disponibilidad de servicios en el mercado.	Enfoque de transición de Markov.
2019	Bramley & Ouzman	Australia	Granos	Múltiples (monitores de rendimiento, relevamiento remoto de cultivos, entre otras).	Vínculos externos, educación y cuestiones agronómicas relacionadas con la ubicación geográfica.	Modelo binario logit.
2017	Paustian y Theuvsen	Alemania	Múltiples (trigo, cebada, entre otros)	No mencionado.	Educación, superficie cultivada, experiencia y tipo de cultivo.	Modelo binario logit.
2017	Schimmelpfennig	Estados Unidos	Granos	Monitores de rendimiento y dosificación variable.	Mano de obra y maquinaria utilizada, tamaño de la finca, utilidad de las tecnologías.	Modelo de efectos de tratamiento, Probit, OLS.
2016	Boyer <i>et al.</i>	Estados Unidos	Algodón	Dosificación variable georreferenciada y muestreo de suelos de precisión.	Tamaño de la granja, edad del operador y cuestiones agronómicas relacionadas con la ubicación geográfica.	Regresión probit multivariable con selección de muestra.

2016	Borghetti <i>et al.</i>	Brasil	Múltiples (soja, maíz, entre otros)	Múltiples (dosificación variable, monitor de rendimiento, entre otras).	Aspectos financieros, educación, habilidades tecnológicas y cuestiones agronómicas relacionadas con la ubicación geográfica.	Estadísticas descriptivas.
2015	Lambert <i>et al.</i>	Estados Unidos	Algodón	Múltiples (sensores remotos, monitores de rendimiento, entre otras).	Tamaño de la finca, vínculos con fuentes de información externas, equipo de riego, esquemas de rotación de cultivos.	Modelo MIMIC.
2014	Markley y Hughes	Australia	Caña de azúcar	Dosificación variable e imágenes satelitales.	Educación, asesores externos, habilidades sobre tecnologías de Información y ubicación de la granja.	Estadísticas descriptivas.
2012	Akudugu, <i>et al.</i>	Ghana	No mencionado	No mencionado.	Edad, género, educación, tamaño del establecimiento y acceso al crédito (y otros).	Modelo binario logit.
2008	Banerjee, <i>et al.</i>	Estados Unidos	Algodón	Sistemas de Guía GPS.	Tamaño y ubicación de la explotación, edad y educación, uso de computadoras (y otros).	Modelo binario logit.

Modelización de la difusión de innovaciones

Existen diferentes enfoques en la literatura para modelar la difusión de innovaciones, cada uno con supuestos y factores específicos que estarían impulsando ese proceso (Kemp & Volpi, 2008; Geroski, 2000). Stoneman & Battisti (2010) agrupan los modelos de difusión en dos categorías principales: los modelos agregados o de desequilibrio -como el modelo epidémico- que se enfoca en el proceso de difusión dentro de una población de adoptantes potenciales, explicando el patrón de difusión cómo flujos de información entre agentes, y; los modelos de equilibrio, como los modelos de rango, orden y stock, en los que la atención se centra en los atributos o comportamientos de la empresa que conducen a la adopción de innovaciones. Dado que los datos obtenidos para este estudio no posibilitan el testeo de la hipótesis supuesta en los modelos epidémicos, ya que sería necesario disponer de información sobre la temporalidad de la adopción¹⁰, a continuación, se presentan con más detalle las características de los otros dos tipos de modelos.

Modelos de rango

A diferencia de los modelos epidémicos, los modelos de rango asumen información perfecta, lo que sugiere que todos los agentes económicos conocen la nueva tecnología. En este contexto, este tipo de modelos se focaliza en el análisis de las características de los adoptantes para explicar la difusión de nuevas tecnologías. Serían estas características las que afectan directamente los rendimientos generados por el uso de una nueva tecnología (David, 1966; Davies, 1979). Por lo tanto, en un momento t , las i empresas que adoptarían la nueva tecnología serían aquellas para quienes $v_i(t) \geq p_i(t)(r + \delta)$, donde $v_i(t)$ es la ganancia bruta anual de las empresas que adoptaron la nueva tecnología, $p_i(t)$ es el costo de comprar la nueva tecnología, r la tasa de interés y δ la tasa de depreciación. Siguiendo esta lógica, dado que la adopción de una tecnología puede variar a lo largo del tiempo, la intuición que proponen los modelos de rango se basa en la caída de los costos de adquisición o por aumentos en la rentabilidad asociada a su uso. De este modo, la dinámica temporal de este modelo mostraría umbrales -asociados a la caída en los costos de la nueva tecnología o a incrementos en su impacto productivo- que justificarían la aparición de nuevos adoptantes con distintas características a lo largo del tiempo.

Modelos de stock

Una suposición crucial en los modelos de rango radica en el hecho de que la adopción de una nueva tecnología es independiente de su stock de difusión anterior. En otras palabras, los modelos de rango no contemplan los efectos de red. Por el contrario, los modelos de stock basan su análisis en la interacción estratégica entre potenciales adoptantes, donde el comportamiento de los agentes afecta la decisión de adopción de los otros agentes (Corrocher & Fontana, 2008; Ward & Pede, 2014).

Los modelos de stock contemplan tanto efectos positivos como negativos en el proceso de adopción de una tecnología (Camerani *et al.*, 2016). En determinadas circunstancias, la difusión de una tecnología puede verse afectada por el “orden de su adopción”, donde emergen ventajas

¹⁰ El modelo epidémico es comúnmente utilizado para probar la regularidad empírica del proceso de difusión y se basa en tres supuestos básicos (Geroski, 2000). En primer lugar, la innovación siempre representa una mejor opción que las opciones anteriores. En segundo lugar, los adoptantes potenciales comienzan a usar la innovación tan pronto como saben de su existencia. En tercer lugar, la información sobre la innovación se difunde entre los adoptantes potenciales por contacto personal. Por lo tanto, en este modelo, los adoptantes potenciales no tienen características distintivas que puedan acelerar o retrasar el proceso de difusión. Para este modelo, por lo tanto, la única razón por la que un adoptante potencial no ha adoptado una nueva tecnología se basa en la falta de información.

asociadas al momento de la adopción con respecto a lo hecho por otros actores. Así, las empresas podrían competir por ser las primeras en adoptar una nueva tecnología específica, tomando una posición de monopolio o, por el contrario, retrasando la adquisición de nueva tecnología a la espera de mayores retornos o de que madure más la tecnología, o bien, porque la experiencia de otros sirve de aprendizaje para la propia adopción (mejorando así los impactos positivos de aquella). Esta última situación ilustra el impacto positivo de la adopción de otros actores sobre el proceso de difusión de una tecnología y, tal como se mencionó, constituye una de las hipótesis de este trabajo.

Cabe destacar que para este estudio no disponemos del dato correspondiente al momento temporal en el cual los productores adoptan las herramientas de AP, lo que limita el testeo de las hipótesis del modelo epidémico y de stock. En consecuencia, y tal como se detalla en la siguiente sección, el estudio empírico de este trabajo se basa en los modelos de rango. Sin embargo, y dada la disponibilidad de datos, se incluyó una variable independiente específica la cual nos permitió evaluar la presencia de “efectos de red”, aunque de un modo alternativo a lo planteado por el modelo stock antes mencionado (más abajo volvemos sobre el tema).

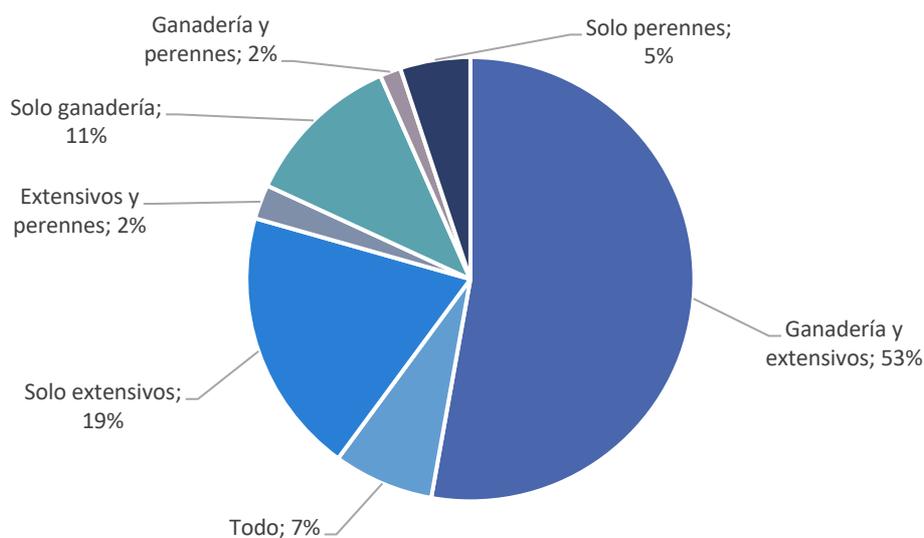
4. Población analizada, variables, datos y metodología

Como ya fue mencionado, los datos utilizados para realizar este trabajo surgen del censo CREA, una organización no gubernamental sin fines de lucro, fundada y dirigida por empresarios agropecuarios que trabajan de forma colaborativa para mejorar el desempeño de las empresas agropecuarias valiéndose de la experimentación y la difusión de tecnologías. Durante el año 2019, en el marco del censo que realiza cada cinco años, CREA relevó entre sus asociados un gran número de variables, entre las que se incluyen datos demográficos de los empresarios y sus equipos de trabajo y niveles de uso de distintas tecnologías, entre muchos otros. En todos los casos el formulario del censo fue completado por el empresario con la asistencia del asesor de su grupo CREA, para facilitar el proceso y asegurar la calidad de las respuestas.

Cada observación representa a un empresario agropecuario, que puede ser propietario o arrendatario de uno o más campos. A su vez, cada empresario puede ser independiente o el representante de una empresa. Para preservar la seguridad de los datos de los empresarios censados se ha firmado un convenio de confidencialidad con CREA en el que se establece que únicamente se difundirán resultados agregados. Por este motivo, la información que se presenta en este trabajo se restringe a estadísticas descriptivas y resultados econométricos.

4.1 Población de interés

El censo CREA 2019 cuenta con un total de 1.356 observaciones. Cada observación representa a un empresario independiente que respondió la encuesta de forma total o parcial. Dentro de esta población, existen empresas en las que la agricultura extensiva es la actividad principal, secundaria, o bien, no existe como unidad de negocio dentro de su estructura (*e. g.*, productores exclusivamente ganaderos). Esta distinción no es menor, ya que alrededor del 11% del total de las empresas censadas realiza actividades ganaderas de forma exclusiva, y otro 5% se dedica únicamente a los cultivos perennes. En el Gráfico 3 se observan estos datos con mayor detalle.

Gráfico 3. Actividades que realizan las empresas CREA (proporción del total de la muestra)

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

Dado que este trabajo estuvo enfocado en los niveles de adopción de tecnologías de AP en cultivos extensivos (*e. g.*, trigo, maíz, soja), el primer desafío fue definir e identificar a los productores de estos tipos de cultivos. Para hacerlo se utilizaron dos criterios de forma combinada, los cuales fueron propuestos por especialistas de CREA. En primera instancia se identificó a las empresas que sembraron más de 150 hectáreas de cultivos extensivos. Posteriormente se descartó de la muestra a las empresas en las que esa cantidad de hectáreas representó menos del 10% de la superficie total sembrada. La aplicación de esos criterios nos permitió no contabilizar a la mayor parte de las empresas eminentemente ganaderas (*i. e.*, las que destinan más del 90% de la superficie total a la ganadería) y al mismo tiempo nos permitió incluir a la mayor parte de los productores mixtos. La aplicación de estos criterios limitó la población objeto de análisis a 937 empresas.

El segundo desafío fue definir a los “adoptantes” de tecnologías de AP, para lo cual también se siguió la recomendación de especialistas en la temática de CREA. La gestión de las superficies productivas dedicadas a la agricultura extensiva puede realizarse a escala de lote, macroambientes o microambientes. La gestión de la agricultura a escala de lote se realiza aplicando una única estrategia productiva (llamado “planteo agronómico”) en toda la superficie del lote, independientemente de la heterogeneidad ambiental que se presente en esa unidad de manejo. A escala de macroambiente, se aplican planteos agronómicos diferenciados en los grandes ambientes que se identifican dentro del lote de producción (*e. g.*, loma, media loma, bajo). La gestión de la agricultura a escala de microambientes, o “variable”, implica la identificación de la microvariabilidad ambiental dentro del lote de producción y la aplicación de planteos agronómicos ajustados a esa microvariabilidad, generalmente mediante tecnologías que permiten la gestión variable de insumos en tiempo real. De este modo, dado que el empleo de herramientas de AP es lo que posibilita el planeo agronómico de microambientación, este tipo de estrategia productiva fue el indicador utilizado para identificar a los productores “adoptantes”.

Siguiendo la propuesta elaborada por los técnicos de CREA, se empleó una definición de adoptante de AP que considera tanto la decisión de adoptar de forma binaria (*i. e.*, adoptar o no adoptar), como la intensidad de la adopción. Por un lado, se definió la variable dicotómica AP_d . Esta variable adopta el valor 1 en los casos en los cuales la proporción de la superficie destinada

a cultivos extensivos de la empresa en la que se utiliza dosificación variable de insumos supera el 10%, y es igual o mayor a 75 hectáreas (es decir, en los casos que había al menos 75 hectáreas sobre las que se hizo dosificación variable de insumos). Ese criterio restrictivo buscó marginar la mayor parte de los casos en los que un productor simplemente se encuentra testeando una tecnología de AP. En paralelo, se definió la variable AP_c para caracterizar la intensidad de adopción, es decir, la proporción de la superficie productiva total en la que se utilizaba AP. Ambos criterios fueron utilizados en los modelos econométricos que presentaremos más adelante para chequear la robustez de los resultados¹¹.

4.2 Definición de variables y datos utilizados

Para realizar este trabajo se tomaron en consideración variables relevantes para el objetivo de la investigación sustentadas en la literatura especializada. A continuación, se presenta una descripción de las variables utilizadas para realizar la estimación de los modelos y los chequeos de robustez.

Tal como emerge de la Tabla 1, un primer grupo de variables incluidas en las estimaciones disponibles a nivel internacional se asocian a las características estructurales de los productores. Este conjunto de factores corresponde a aspectos por lo general estables en el tiempo, que difícilmente puedan ser modificados en el corto plazo.

Dentro de esta categoría la primera variable tenida en cuenta fue la superficie dedicada a cultivos anuales. Esta variable se mide en hectáreas y se expresa en escala logarítmica. Es una de las variables más frecuentemente utilizadas en la literatura (Mitchell *et al.*, 2018; Kolady *et al.*, 2021; entre otros) debido a su asociación positiva con los niveles de adopción de tecnologías. La segunda variable considerada en esta categoría fue el régimen de tenencia de la tierra. Esta variable ha sido estudiada por autores como English *et al.* (2000), en donde encuentran que un productor que es dueño de la tierra, dado que puede apropiarse del retorno de la implementación de prácticas agrícolas sustentables como sería el caso de tecnologías de AP, tienen mayores incentivos para adoptar este tipo de herramientas. En este estudio consideramos una variable dicotómica; adopta el valor 1 cuando el productor es arrendatario de una porción o la totalidad de la superficie productiva y 0 cuando la totalidad de la superficie que trabaja es propia. La tercera variable fue la posesión de cosechadoras. Esta variable se utilizó para representar la dotación de capital de la empresa, aunque como se mencionará más adelante, también se estudiaron variables alternativas. Tal como se observa en la Tabla 1, diversos estudios identificaron una asociación positiva entre la dotación de capital de la empresa y la adopción de AP. En el estudio, esta variable también es dicotómica y adopta el valor 1 cuando el productor posee al menos una cosechadora propia. La última variable considerada en esta categoría fue la conectividad a Internet. Esta variable no es tan frecuentemente utilizada en la literatura especializada; no obstante, Lachman & López (2019) señalan que un obstáculo recurrente en las empresas que desarrollan y ofrecen estas tecnologías es la falta de conexión a Internet¹² (ver también Melchiori *et al.*, 2013). Sin embargo, otros trabajos señalan que varias herramientas de AP pueden prescindir de conexión a

¹¹ Los dos criterios tienen metodologías de estimación y limitaciones econométricas puntuales. Su utilización nos permite implementar una estrategia adicional de chequeo de robustez de resultados y extraer conclusiones más sólidas.

¹² De hecho, el trabajo realizado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Banco Interamericano de Desarrollo y Microsoft (2020) señala que Argentina se encuentra relativamente atrasada en su acceso a Internet en áreas rurales, si se la compara con la situación de países de altos ingresos.

Internet (Nabi *et al.*, 2022). Incluso muchas de las tecnologías que requieren conexión a Internet pueden funcionar almacenando información de modo local y luego, cuando acceden a la señal de esta red se realiza el envío de la información recolectada.

La segunda categoría reunió variables que permitieron caracterizar al capital humano en las empresas, considerando tanto al empresario CREA como a su equipo de colaboradores. Estas dimensiones son relevantes y ya han sido estudiadas en trabajos como los de Akudugu *et al.* (2012) o Markley & Hughes (2014), en donde se identifican ciertos requerimientos en términos de capital humano para la incorporación de tecnologías de AP.

Respecto del empresario CREA, la primera variable incluida en esta categoría fue la edad del productor. Diversos trabajos relevados para este estudio (ver Tabla 1) identificaron que la adopción de AP resulta más frecuente en productores más jóvenes. Sin embargo, la relación entre los niveles de adopción y la edad no necesariamente debiera ser lineal. Por ejemplo, también puede suceder que el nivel de capacidades para gestionar estas tecnologías se incrementa con el paso del tiempo. Por este motivo, la variable edad se analiza por niveles y elevada al cuadrado, para detectar una posible relación no lineal¹³ (ver Akudugu *et al.*, 2012). La segunda variable considerada fue el nivel de formación del empresario. La educación es una variable que se espera se relacione positivamente con los niveles de adopción de tecnologías ya que debería reflejar el acceso a información y la capacidad para gestionar las nuevas soluciones tecnológicas. En el Censo CREA 2019 la variable se relevó por niveles (*e. g.*, primaria incompleta, primaria completa, secundaria incompleta, etc.). Siguiendo la metodología de Trajtenberg & Johnson (2014) se utiliza la aproximación que asigna años de educación para cada nivel educativo¹⁴. Esto permite reducir la dimensionalidad del modelo. Este aspecto resulta relevante si tomamos en consideración el limitado tamaño de la muestra que estamos analizando. A su vez, esta es una de las variables que se revisa en los chequeos de robustez.

Respecto de los colaboradores, se consideró un conjunto de variables asociadas con la dotación de capital humano disponible en la empresa. Estas variables, que en la literatura de economía de la innovación se engloban dentro del término “capacidades de absorción”, consideran, de forma amplia, la base de capacidades cognitivas disponibles en la empresa. Esas capacidades cognitivas son las que van a afectar las posibilidades de reconocer el valor de la información nueva y externa, asimilarla y aplicarla a cambios en procesos o rutinas productivas (Cohen & Levinthal, 1990). Para reflejar estas capacidades se utilizaron las variables edad y educación. Dado que la edad de los colaboradores sólo fue relevada por categorías (*i. e.*, menores de 30 años, entre 30 y 45 años y más de 45 años), lo que se tomó en consideración fue la proporción de colaboradores en cada categoría. Por otro lado, la variable educación fue relevada distinguiendo tres grupos principales (primaria, secundaria y superior). Por tal motivo, la misma fue analizada considerando la proporción de colaboradores por grupo. Para esta variable también se utilizaron medidas alternativas para chequear la robustez de los resultados¹⁵.

¹³ Esto se conoce como un comportamiento bimodal, que sería un caso en el cual hay una correlación positiva con empresarios de menor y mayor edad.

¹⁴ Esta consiste en una aproximación donde se imputa una cantidad de años que refleja el nivel educativo alcanzado. Así, por ejemplo, para el nivel de educación primario completo se imputan 7 años, mientras que se imputan 9,5 años para el nivel secundario incompleto.

¹⁵ Específicamente, se usó una variable dicotómica que adopta el valor 1 si en el sector de operaciones de la empresa hay personas con nivel educativo universitario.

La tercera categoría agrupa variables que no fueron incluidas en los segmentos anteriores. La primera de esas variables fue el asesoramiento tecnológico o agronómico. En la Tabla 1 se observa que el asesoramiento externo es un factor identificado en diversos estudios (*e. g.*, Lambert *et al.*, 2015) como relevante para explicar la adopción de herramientas de AP, en tanto refleja el acceso a fuentes de información externa a la firma. En el Censo CREA se relevaron distintos tipos de asesoramiento, pero para este estudio solo se consideró el asesoramiento externo ligado a resolver dificultades técnicas, variable incorporada al modelo de forma dicotómica (1 si tuvo asesoramiento externo y 0 si no lo tuvo). Paralelamente, se incluyó otra variable de asesoramiento externo focalizado en temas ambientales¹⁶. Esta variable puede interpretarse como un indicador del nivel de la relevancia asignada por el empresario a las prácticas de cuidado ambiental, una dimensión de interés para la adopción de AP según los resultados del trabajo de Kountios *et al.* (2018). El supuesto es que el mayor grado de relevancia asignada al cuidado ambiental debería correlacionarse con un mayor nivel de adopción de prácticas sustentables, entre las que se encuentran las tecnologías de AP. Una métrica alternativa para utilizar como indicador del nivel de interés del empresario en la implementación de prácticas ambientalmente sustentables es comentada entre los chequeos de robustez. Tanto las variables de asesoramiento agronómico y tecnológico, como la de asesoramiento ambiental, se miden de forma dicotómica, y en los dos casos adopta el valor 1 cuando el productor recibe asesoramiento.

De forma similar a lo realizado en otros trabajos que estudian la difusión de otras tecnologías (Comin & Hobijn., 2010; Camerani *et al.*, 2016)¹⁷, también se construyó una última variable orientada a detectar la presencia de “efectos de red”, es decir, si la adopción de AP por parte de un productor puede depender de los niveles de adopción de otros productores vinculados a este. Dadas las interacciones entre productores, es esperable que, por ejemplo, vía recomendaciones o experiencias satisfactorias de usuarios previos, exista un “efecto red” en el proceso de difusión (*i. e.*, un productor va a tener una mayor probabilidad de adoptar tecnologías de AP cuando otros productores vinculados a él ya lo hayan hecho). Para poder identificar este efecto se analizó para cada empresario de forma individual la proporción de los integrantes de su grupo CREA que adoptan este tipo de tecnologías. Cabe destacar que los grupos CREA están integrados por productores vecinos, los cuales a su vez suelen llevar a cabo actividades productivas similares. Tal como se mencionó, se espera que esta variable se relacione positivamente con los niveles de adopción de tecnologías, es decir, que productores que estén insertos en grupos con altos niveles de uso de herramientas de AP van a tener una mayor probabilidad de también emplear estas tecnologías.

A modo de resumen, todas las variables que fueron consideradas en este trabajo para explicar los niveles de adopción de tecnologías de AP son presentadas esquemáticamente en la Tabla 2. Adicionalmente, en el Anexo I se presentan las estadísticas descriptivas de estas variables, exceptuando la distribución de valores por regiones CREA por una cuestión de extensión.

¹⁶ Si bien no tenemos información precisa sobre los temas que se abordan con los asesores ambientales, aquellos que podrían ser potencialmente de interés estarían ligados con certificación de prácticas ambientales, análisis de balances de nutrientes en el suelo, cálculo del balance de carbono del suelo, estimación de emisiones de gases de efecto invernadero, análisis de la calidad de agua superficial o freática (*e. g.*, salinidad, nitratos, arsénico) o niveles de contaminación de las mismas, entre otros.

¹⁷ Al momento de la elaboración de este trabajo no identificamos algún otro estudio que haya considerado una variable similar con respecto al proceso de difusión de tecnologías de AP.

Tabla 2. Definición de variables relevantes

Variable	Descripción
Superficie Cultivos Anuales	Logaritmo de la superficie destinada a cultivos anuales.
Alquila	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si alquila tierra para cultivos anuales.
Edad	Edad del miembro CREA.
Edad ²	Cuadrado de la edad del miembro CREA.
Edad 30 a 45	Porcentaje de empleados en directorio y gerencia de 30 a 45 años.
Operarios Universitarios	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si hay universitarios entre los trabajadores en el sector Operaciones.
Formación Empresario	Nivel de formación expresado en años de educación del miembro CREA.
Cosechadora	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si tiene cosechadora propia.
Conectividad Celular	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si hay conexión a Internet por celular en el campo.
Asesoramiento Ambiental	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si se contrata asesoramiento ambiental.
Asesoramiento	Variable dicotómica que adopta el valor 1 si se contrata asesoramiento agronómico y/o tecnológico.
Adopción Vecinos	Porcentaje de vecinos del grupo CREA que son adoptantes de AP.
Regiones	Regiones CREA.

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

4.3 Metodología¹⁸

En este trabajo se estudia la relación entre ciertas características, conductas y relaciones de los productores y su propensión a la adopción de tecnologías de AP y la intensidad con la cual las utilizan en caso de adoptarlas. Es decir, una variable dicotómica y una variable continua con dominio restringido al intervalo [0;1] (*e. g.*, si se utiliza AP en todo el terreno, sería igual a 1; si se utiliza en un 25% del terreno, sería igual a 0,25; si no se utiliza en absoluto, sería igual a 0). Para analizar estos procesos, en este trabajo se estimó un modelo de regresión lineal tradicional (Friedman, 2012; Wooldridge, 2010) y modelos no lineales (Logit y Probit) en dos variantes.

El uso de los modelos lineales es muy difundido en el campo de la econometría. Aquí se estima la probabilidad de adopción como una función lineal de las variables explicativas. Así, se propone un modelo tal que:

$$p = x'\beta$$

Este modelo es de sencilla interpretación y es estimable mediante mínimos cuadrados ordinarios. No obstante, cuenta con ciertas limitaciones que los modelos no lineales permiten sortear (ver Anexo II para más detalles). Para el caso de una variable de respuesta dicotómica, estos modelos

¹⁸ Para el lector no especializado en economía se incluyeron en el Anexo II especificaciones adicionales sobre el abordaje metodológico empleado en este estudio.

se caracterizan por proponer una modelización no lineal de la probabilidad de adopción (p) tal que:

$$p = F(x'\beta)$$

Donde x es un vector de variables explicativas y β un vector de parámetros que acompañan a estas y la función $F(\cdot)$ es tal que, evaluada en los límites de su argumento, converge al valor 0 o 1, lo cual implica que no se excede el dominio de una probabilidad. La función que se propone en el modelo Probit es:

$$F(x'\beta) = \int_{-\infty}^{x'\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2}{2}} ds$$

Alternativamente, en el caso Logit se tiene:

$$F(x'\beta) = \frac{e^{x'\beta}}{1 + e^{x'\beta}}$$

En esencia, el enfoque Logit implica la suposición de que los errores del modelo siguen una distribución logística, mientras que en el Probit seguirían una distribución normal. En la práctica, frecuentemente ambos tipos de modelos son utilizados en forma indistinta y son dos estrategias frecuentemente utilizadas en la literatura sobre adopción tecnológica en agricultura¹⁹. No obstante, dado que en este trabajo también se busca analizar la intensidad en la adopción (representada a través de la cantidad de hectáreas donde se aplican las tecnologías de AP con relación al total) se emplearon herramientas econométricas novedosas en este tipo de literatura. Puntualmente, se utilizaron dos extensiones de los modelos Logit y Probit para variables de respuesta fraccional (Papke & Wooldridge, 1996; Wooldridge, 2010); es decir, una variable continua con dominio en el intervalo [0;1]. A estos modelos nos referiremos como Logit y Probit fraccionales. Al igual que en los modelos Logit y Probit, aquí se utilizan estimadores que no son de forma cerrada²⁰, aunque en estos se utiliza el método de cuasi-máxima verosimilitud en lugar de máxima verosimilitud²¹.

5. El perfil de los adoptantes de tecnologías de AP

En esta sección se presenta de forma estilizada una caracterización del perfil de las empresas adoptantes de tecnologías de AP y su comparación con el perfil de las empresas no adoptantes. Para esto nos basamos en la estadística descriptiva que emerge del Censo CREA 2019.

Un 17% de los miembros CREA de la muestra resultaron adoptantes de tecnologías de AP. A su vez, la superficie promedio de los adoptantes de AP fue de 6.669 hectáreas, mientras que la de los no adoptantes fue de 3.053. Tal como se mencionó, en todos los casos se trató de productores de cultivos extensivos, aunque las preguntas del censo no permiten identificar qué tipo de cultivos específicos se desarrollan. Sin embargo, sabemos que el 22% de los adoptantes se dedicaba

¹⁹ A modo de ejemplo, ver Tey & Brindal (2012) para una amplia revisión de trabajos de este tipo.

²⁰ En estos casos, el valor de la estimación se obtiene a través de una optimización que se realiza en forma iterativa.

²¹ Estos métodos son similares, donde el método de cuasi máxima verosimilitud permite que la función de verosimilitud se encuentre mal especificada, de modo que el método de máxima verosimilitud, al restringir este punto, se reduce a un caso particular del primero (Kuan, 2000, cap. 9).

únicamente a la agricultura extensiva, mientras que los restantes también tenían actividades productivas de otro tipo (*e. g.*, ganadería, tambo, fruticultura, etc.)²².

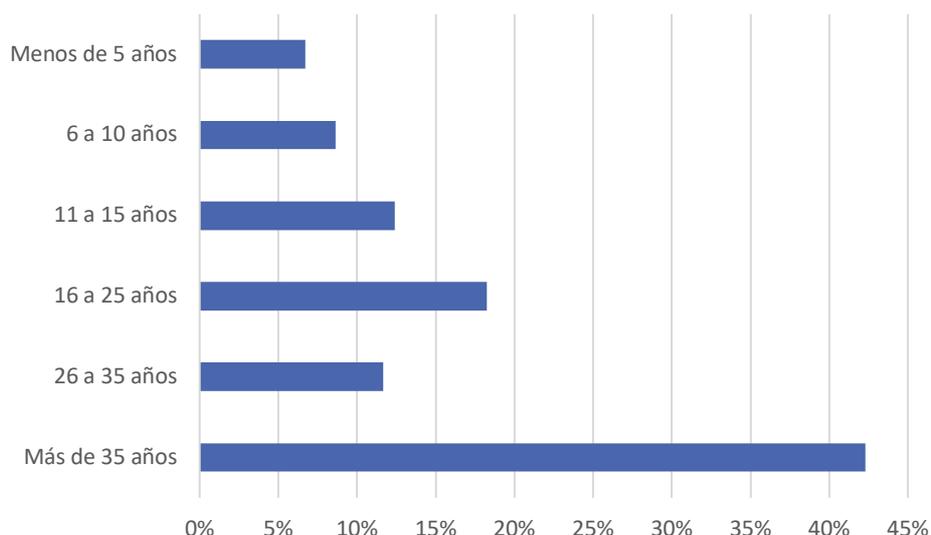
Los datos abarcan a productores de todas las regiones del país (con la única excepción de la región patagónica), cubriendo 14 provincias. Los principales distritos con observaciones son Buenos Aires (51%), Córdoba (21%) y Santa Fe (11%). En estas tres provincias se encuentran niveles de adopción en promedio más elevados que en el resto de las regiones, lo cual se encuentra en línea con otros documentos previos²³ y con los resultados del Censo Nacional Agropecuario del 2018.

En una categorización propia, CREA separa al país en 19 regiones en función de ciertas características del clima y tipos de suelo relevantes para la producción agropecuaria. En base a esto, se observa un mayor nivel de adopción en las regiones ubicadas en el Sur de Córdoba y el Noreste de San Luis, y el Noroeste de Buenos Aires. Más en general, la zona pampeana central presenta una proporción de productores adoptantes relativamente mayor vis a vis que lo que ocurre en el resto del país. No obstante, cabe señalar que no se pueden extraer conclusiones fuertes respecto al patrón de adopción en el territorio, ya que hay zonas de las que se posee una baja cantidad de observaciones.

Respecto de las características de los establecimientos hay varios puntos destacables. En primer lugar, las empresas con figuras jurídicas de mayor formalidad (*e. g.*, SA o SRL) presentaron niveles más altos de adopción de AP con respecto a empresas de otra denominación societaria (*e. g.*, unipersonales). En este sentido, del universo de adoptantes de AP, el 81% fueron SA o SRL, mientras que esa cifra baja al 66% en el caso de los no adoptantes. Otros aspectos asociados a formalidad también presentan patrones similares. Así, un 44% de los adoptantes cuenta con protocolos (formales o informales) para la toma de decisiones, los cuales se encuentran presentes en tan solo un 28% de los no adoptantes. Por otra parte, la amplia mayoría de las firmas tienen una antigüedad considerable en el mercado, así más de un 50% de estas tienen más de 25 años de trayectoria, lo cual puede observarse con mayor detalle en el Gráfico 4.

²² Tal como se menciona más adelante, en los ejercicios de robustez realizados en este estudio se consideró la variable de otras actividades productivas.

²³ Ver, por ejemplo, Lachman *et al.* (2022).

Gráfico 4. Antigüedad de las empresas

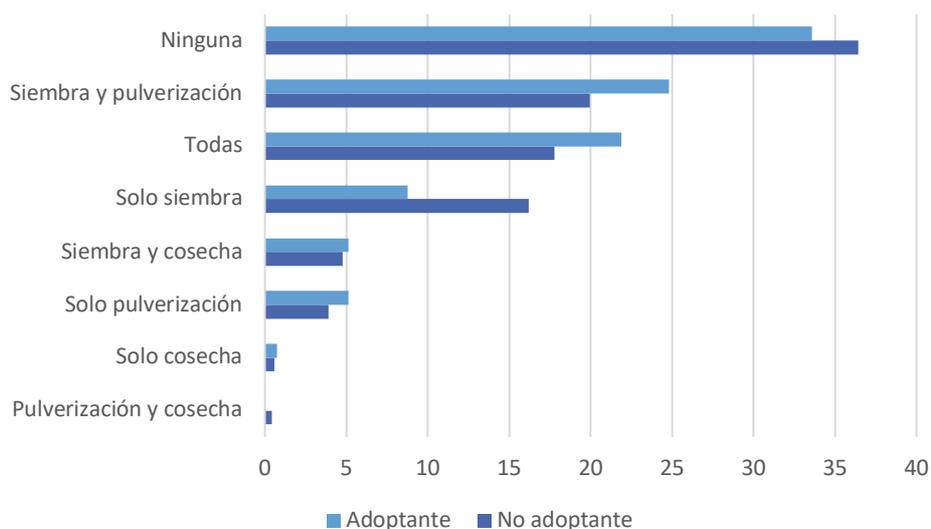
Fuente: elaboración propia en base a Censo CREA 2019.

En segundo lugar, en el grupo de adoptantes de tecnologías de AP la superficie promedio dedicada a cultivos anuales es sensiblemente mayor respecto a la superficie relevada en el grupo de no adoptantes (2.300 y 1.017 ha., respectivamente). Por otro lado, dentro del grupo de adoptantes de tecnologías de AP, el 70% mencionó haber alquilado al menos una proporción de la superficie sobre la que produce y el 30% restante señaló que solo trabaja en campo propio. Estos porcentajes son similares a los hallados en el grupo de productores que no adoptó tecnologías de AP (67 y 33% respectivamente).

El acceso a Internet en el establecimiento rural tampoco emergió como un factor en el que parecen existir diferencias entre ambos grupos. Incluso, al incluir el acceso vía teléfono móvil, el nivel de conectividad fue levemente mayor en el grupo de no adoptantes: el 74% de los adoptantes tenía conexión, mientras que este valor era del 82% en los no adoptantes. Esto sugiere que, a priori, la falta de acceso a Internet no sería una limitante para la adopción de las tecnologías de AP.

En términos de equipamiento propio, como se observa en el Gráfico 5, existen grandes similitudes entre adoptantes y no adoptantes de AP. En ambos casos la proporción de empresas que posee al menos una cosechadora o una sembradora fue similar (60% y en torno al 61%, respectivamente). En el caso de las pulverizadoras se observó una diferencia levemente mayor a favor del grupo de adoptantes, 30% frente al 24%. De todos modos, resultó frecuente en ambos grupos la no posesión de algún tipo de maquinaria (34% entre los adoptantes y 36% para los no adoptantes). Esto se explica por la presencia de los “contratistas” que tienen un rol protagónico como proveedores de servicios de siembra, fertilización, pulverización, cosecha, etc. Estos contratistas son quienes adquieren las tecnologías y ofrecen servicios (usando equipos de AP o no) a los productores.

Gráfico 5: Equipamiento propio según actividad (en %)



Fuente: elaboración propia en base a Censo CREA (2019).

En contraste, emergen algunas diferencias en términos de la cantidad de empleados contratados por unidad de superficie donde, en promedio, los adoptantes de AP contratan menos personal. El 90% de los adoptantes de tecnologías de AP empleaba, en promedio, menos de una persona cada 100 ha. (contra 71% entre los no adoptantes), ver Tabla 3. Esto podría explicarse por el hecho de que los productores que adoptan tecnologías de AP producen en extensiones más grandes, aspecto que típicamente se asocia con menores niveles de intensidad laboral por hectárea.

Tabla 3. Personal cada 100 ha.

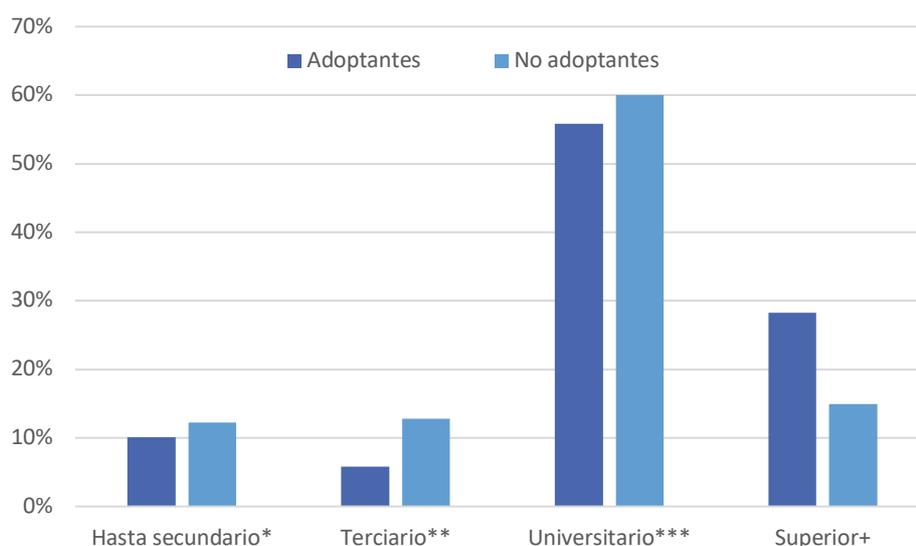
	No adoptantes	Adoptantes
Menos de 0,5	43 %	65 %
Entre 0,5 y 0,99	28 %	25 %
Entre 1 y 1,49	13 %	4 %
1,49 o más	17 %	6 %

Fuente: elaboración propia en base a Censo CREA (2019).

En términos de edad de los colaboradores, en ambos grupos la composición etaria es similar: un 15% de los colaboradores tiene menos de 30 años, un 50% entre 30 y 45 años y un 35% más de 45 años. Respecto de la educación, los niveles de formación del personal de las empresas que integran el grupo de adoptantes de tecnologías de AP son levemente más altos; en promedio el 61% de las plantillas de las empresas de adoptantes tiene nivel de educación secundario o superior, mientras que en el caso de las empresas no adoptantes ese valor cae al 54%.

Relativo al nivel de formación del empresario CREA, los mayores niveles de educación formal (*i. e.*, formación superior al nivel universitario) se observaron en el grupo de adoptantes (Gráfico 6). No obstante, otras características como la edad no presentan diferencias entre los grupos. Así, la edad media es de 50 años en ambos casos.

Gráfico 6. Niveles de formación de los miembros CREA



Fuente: elaboración propia en base a Censo CREA (2019).

* Incluye secundario completo y niveles inferiores.

** Incluye terciario completo e incompleto.

*** Incluye universitario completo e incompleto.

+ Incluye posgrado, maestría o doctorado completo o incompleto.

En el grupo de adoptantes de tecnologías de AP, el relevamiento y la utilización de indicadores ambientales fue más frecuente. El 21% de los miembros del grupo de adoptantes utilizó indicadores ambientales, mientras que en el grupo de no adoptantes este nivel fue del 10%. De forma complementaria, en el grupo de adoptantes hubo una mayor proporción de productores que reciben asesoramiento agronómico, tecnológico y ambiental. Así, un 84% de los adoptantes recibió asesoramiento agronómico o tecnológico, y un 26% recibió asesoramiento ambiental; en el grupo de no adoptantes estos valores fueron del 65% y 10% respectivamente.

6. Estimaciones y principales resultados

En la Tabla 4 se presentan los resultados de seis estimaciones que fueron realizadas con distintos tipos de modelos, según la descripción previa. En las Columnas (1), (2) y (3) se presentan los resultados de las estimaciones realizados con modelos de variable dependiente dicotómica (adopción o no de tecnologías de AP) y en las Columnas (4), (5) y (6) las estimaciones de modelos en los que la variable dependiente es continua (proporción de la superficie sobre la cual se emplearon tecnologías de AP). Se trata de modelos lineales estimados mediante mínimos cuadrados ordinarios (Columnas 1 y 4), Probit y Probit fraccional (Columnas 2 y 5, respectivamente) y Logit y Logit fraccional (Columnas 3 y 6, respectivamente).

Los resultados obtenidos en general van en línea con las hipótesis previas derivadas de los estudios empíricos disponibles sobre el tema. La extensión de la explotación es una variable que sistemáticamente aparece como un factor que afecta positivamente la adopción de tecnologías de AP, tanto en términos de probabilidad como como de intensidad de adopción (el porcentaje de superficie sobre la cual se aplican tecnologías de AP).

De igual modo, la posesión de bienes de capital -en este caso, medida a través de la tenencia de cosechadoras propias- se asocia positivamente con el nivel de adopción de tecnologías de AP.

Sin embargo, la evidencia es menos robusta, ya que en los modelos Probit y Logit la vinculación encontrada fue estadísticamente significativa, pero no ocurrió lo mismo con en el modelo lineal.

En cuanto a la variable alquiler, se encuentra que hay una relación negativa entre dicha variable y la intensidad de adopción de tecnologías AP; sin embargo, la relación entre alquilar y adoptar tecnologías de AP no resulta estadísticamente significativa. Respecto a la conectividad, no se encontró que tenga influencia sobre la adopción de tecnologías de AP; esto es explicable si consideramos que varias de las tecnologías aquí estudiadas pueden prescindir de la conexión a Internet durante su uso a campo. Finalmente, las variables de control regionales resultan relevantes, aunque por motivos de exposición no son incluidas en la tabla.

El nivel de formación formal del empresario CREA emergió como una variable explicativa relevante. Los mayores niveles de formación de quien toma las decisiones productivas en la empresa se correlacionan positivamente con los niveles de adopción de tecnologías de AP, en todas las especificaciones utilizadas. En cambio, no ocurre lo mismo con los niveles de formación de los operarios. Esto último podría sugerir que para el manejo del equipamiento específico de la AP no resulta necesario la presencia de operarios con niveles de calificación relativamente altos²⁴. Una explicación alternativa de este resultado puede estar dado por la elevada tendencia a la contratación de servicios externos.

Por otra parte, la edad del miembro CREA no emerge como una variable relacionada con la adopción de este tipo de tecnologías (esto ocurre tanto para la edad absoluta como elevada al cuadrado). Estos resultados refutarían el preconcepto que postula que el nivel de adopción de las nuevas tecnologías es mayor entre los “productores jóvenes”. No obstante, en los modelos en los cuales se consideró como variable dependiente la intensidad de la adopción de tecnologías de AP, la edad de los operarios sí resultó ser un factor de peso; en particular, para las empresas en las cuales la proporción de empleados de entre 30 y 45 años es mayor se halló una mayor intensidad en los niveles de adopción de este tipo de tecnologías.

La variable de asesoramiento externo adopta el signo esperado (positivo) y resultó estadísticamente significativa. Esto indicaría que disponer de fuentes externas de información y/o de asistencia técnica se correlaciona positivamente con la adopción de tecnologías de AP. Un resultado análogo emerge al considerar el asesoramiento ambiental.

Finalmente, el nivel de adopción por parte de los vecinos/compañeros de grupo se correlaciona positivamente tanto con la probabilidad como con la intensidad de la adopción de AP entre los empresarios de CREA. Este resultado es uno de los más novedosos del estudio dado que sugiere que factores tales como la experiencia de terceros o el acceso a información sobre las prestaciones que reporta la implementación de este tipo de tecnologías inciden positivamente en sus niveles de difusión; en otras palabras, se confirma la existencia de efectos de red, donde la adopción de las tecnologías se acelera a medida que hay más actores cercanos que las utilizan.

²⁴ Cabe destacar que también fueron incluidas especificaciones alternativas para aproximar el nivel de capital humano en el personal de la empresa, por ejemplo, mediante variables *dummies* y también considerando la proporción de empleados con nivel universitario en las áreas de gerencia (tanto operativa como de otras áreas del negocio) y también entre los directivos. Los resultados en todos los casos fueron similares a los alcanzados con la variable que se presenta en este trabajo. Dado que los resultados no variaron, optamos por utilizar aquella variable que contara con un mayor número de respuestas de modo tal de no perder observaciones en las estimaciones.

Tabla 4. Resultados de los modelos econométricos

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Dependiente binaria			Dependiente continua		
VARIABLES	Mod. Lineal	Probit	Logit	Mod. Lineal	Probit frac.	Logit frac.
Estructurales						
Superficie Cultivos Anuales	0.088*** (0.017)	0.459*** (0.101)	0.806*** (0.181)	0.049*** (0.011)	0.337*** (0.066)	0.587*** (0.127)
Cosechadora	0.052 (0.035)	0.403* (0.208)	0.733** (0.364)	0.022 (0.022)	0.272* (0.146)	0.523* (0.282)
Alquila	-0.058* (0.032)	-0.321* (0.177)	-0.569* (0.32)	-0.040** (0.02)	-0.342** (0.145)	-0.630** (0.28)
Conectividad Celular	-0.034 (0.035)	-0.128 (0.186)	-0.229 (0.323)	-0.021 (0.022)	-0.126 (0.142)	-0.271 (0.27)
Capital humano						
Edad	-0.003 (0.008)	-0.039 (0.045)	-0.07 (0.08)	0.003 (0.005)	0.002 (0.038)	0.005 (0.078)
Edad ²	0 (0)	0 (0)	0.001 (0.001)	0 (0)	0 (0)	0 (0.001)
Formación Empresario	0.014** (0.007)	0.115*** (0.044)	0.211*** (0.079)	0.008** (0.004)	0.099*** (0.034)	0.197*** (0.07)
Edad 30 a 45	0.053 (0.039)	0.254 (0.225)	0.487 (0.404)	0.053** (0.025)	0.377** (0.18)	0.720** (0.35)
Operarios Universitarios	0.032 (0.03)	0.179 (0.165)	0.347 (0.293)	-0.008 (0.019)	-0.05 (0.134)	-0.104 (0.267)
Vinculaciones y ambiente						
Asesoramiento	0.058* (0.031)	0.446** (0.196)	0.841** (0.364)	0.022 (0.02)	0.266* (0.153)	0.550* (0.33)
Asesoramiento Ambiental	0.126*** (0.042)	0.435* (0.225)	0.696* (0.384)	0.109*** (0.027)	0.490*** (0.162)	0.872*** (0.299)
Adopción Vecinos	0.003*** (0.001)	0.010*** (0.003)	0.018*** (0.005)	0.002*** (0.000)	0.010*** (0.002)	0.017*** (0.004)
Intercepto y controles por región CREA	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	575	467	467	575	575	575
R ² /Pseudo-R ²	0.284	0.283	0.285	0.276	0.276	0.274

Errores estándar entre paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

Cabe realizar una aclaración con respecto a la interpretación del valor de los coeficientes en los modelos Probit y Logit. Dado que esos modelos no son lineales, el incremento del valor de una variable explicativa no tiene un impacto constante y puede diferir en función del valor de la variable que se analiza y de las demás variables. A modo ilustrativo, los resultados del modelo lineal sugieren que si la superficie dedicada a cultivos anuales aumenta un 1% (manteniendo todo lo demás constante), la probabilidad de adopción esperada aumentaría aproximadamente un 9%. Esto es independiente de qué valores tengan las demás variables explicativas. En los modelos no lineales (Logit y Probit) la interpretación es menos clara, dado que la intensidad de la vinculación de una variable depende del nivel de partida de esta y del nivel en el que se sitúan las demás.

Por ende, en estos modelos resulta útil reportar los efectos marginales promedio, tal como se hace en la literatura que utiliza dichas herramientas. A grandes rasgos, los efectos marginales se calculan promediando el efecto del cambio de una variable y dejando las demás constantes. Adelantando los resultados, se observa que las estimaciones de estos efectos marginales resultan similares en los tres tipos de modelos utilizados.

En efecto, nuestras estimaciones reflejan que un aumento de una unidad porcentual en la superficie cultivada se asocia en promedio con un aumento en la probabilidad estimada de adopción de tecnologías de un 0,1%, y un aumento de un 0,04% de la intensidad de la adopción. Asimismo, alquilar superficie para cultivar deriva en una probabilidad estimada de adopción en promedio un 7% menor y una intensidad de adopción un 4% menor. Por otra parte, un año adicional de educación del empresario CREA se vincula con un aumento de la probabilidad de adopción de un 2% y un aumento de la intensidad en los niveles de adopción de un 1%. Adicionalmente, un productor que recibe asesoramiento ambiental es en promedio entre un 8% y un 9% más proclive a adoptar tecnologías, y su nivel de intensidad de adopción esperado es un 4% mayor. Finalmente, un aumento de un punto porcentual en la proporción de adoptantes en el círculo más cercano del empresario CREA, se asocia con aumentos del 0,2% en la probabilidad de adopción, y un 0,1% en su intensidad.

Tabla 5. Efectos marginales promedio²⁵

VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Dependiente binaria			Dependiente continua		
	Mod. Lineal	Probit	Logit	Mod. Lineal	Frac Probit	Frac Logit
Estructurales						
Superficie Cultivos Anuales	0.088***	0.094***	0.093***	0.049***	0.042***	0.039***
Cosechadora	0.052	0.083*	0.084**	0.022	0.034*	0.035*
Alquila	-0.058*	-0.066*	-0.066*	-0.040**	-0.042**	-0.042**
Conectividad Celular	-0.034	-0.026	-0.026	-0.021	-0.016	-0.018
Capital humano						
Edad	-0.003	-0.008	-0.008	0.003	0.000	0.000
Edad ²	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000
Formación Empresario	0.014**	0.024***	0.024***	0.008**	0.012***	0.013***
Edad 30 a 45	0.053	0.052	0.056	0.053**	0.047**	0.048**
Operarios Universitarios	0.032	0.037	0.040	-0.008	-0.006	-0.007
Vinculaciones y ambiente						
Asesoramiento	0.058*	0.092**	0.097**	0.022	0.033*	0.037*
Asesoramiento Ambiental	0.126***	0.090**	0.080*	0.109***	0.061***	0.058***
Adopción Vecinos	0.003***	0.002***	0.002***	0.002***	0.001***	0.001***

Errores estándar omitidos por extensión: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

Controles de robustez

Para robustecer los hallazgos del estudio se utilizaron una serie de variables de control alternativas a las presentadas en los modelos de las Tablas 4 y 5, al tiempo que también se incluyeron otros controles adicionales utilizados con frecuencia en la literatura (ver Tabla 1). Estos ejercicios no modificaron significativamente los resultados de las estimaciones previamente presentadas. No obstante, a continuación, se comentan brevemente algunos de los hallazgos obtenidos a partir de estos ejercicios alternativos²⁶.

Para medir alternativamente la adopción de los otros miembros del grupo CREA, se estimaron los modelos usando como variable de estudio la cantidad de vecinos adoptantes, y no la proporción de adoptantes dentro del grupo. Los resultados de las estimaciones del resto de los coeficientes se mantienen relativamente estables; y la probabilidad esperada de que el productor sea adoptante es entre un 3% y un 5% mayor si otro miembro del grupo CREA pasa a ser adoptante,

²⁵ Por motivos de extensión, se omiten los errores estándar. Los efectos marginales se desprenden de los modelos ya presentados en la Tabla 4, de modo que la cantidad de observaciones y variables incluidas son equivalentes.

²⁶ De ser solicitados, estos resultados están a disposición del lector.

y la intensidad de adopción esperada pasa a ser entre un 2% y un 4% más grande. Esto se detalla con mayor profundidad en el Anexo III.

En cuanto a la dotación de capital, la variable cosechadora fue reemplazada por otros bienes de capital como pulverizadoras y sembradoras, y por variables sintéticas a partir de la combinación en la tenencia de estos bienes (*i. e.*, propietarios de todas, de al menos una máquina, etc.). En todos estos casos, la adopción de tecnologías de AP presentó una vinculación positiva con estas variables; sin embargo, los efectos no son robustos ya que no todas las estimaciones son estadísticamente significativas.

La conectividad en el campo también se midió a través de la capacidad de conectarse a Internet desde el teléfono celular, como también desde otros dispositivos. Los resultados señalan consistentemente que no existe una correlación estadísticamente significativa entre estas variables y la adopción de las tecnologías de AP. Los modelos también fueron estimados utilizando como variable de control la provincia en la cual se encuentra registrado el centro operativo de la empresa, en lugar de las regiones CREA, sin que haya cambios relevantes en los resultados respecto de la especificación presentada previamente.

También se analizó el efecto de la antigüedad de la empresa y la dedicación a otras actividades productivas, considerando diversas actividades específicas (*e. g.*, ganadería, lechería). A su vez, se incorporó al estudio el efecto del nivel de formalidad de las empresas, considerando aspectos como la forma jurídica (*e. g.*, diferenciando sociedades anónimas y de responsabilidad limitada frente a personas físicas) o algunas variables organizacionales²⁷ (*e. g.*, el nivel de formalización de procedimientos de toma de decisiones). Ninguno de los ejercicios arrojó resultados robustos para estas variables.

También se realizaron controles de robustez tomando en consideración características de los empresarios CREA y de los colaboradores de las empresas. Sobre los empresarios CREA, uno de los controles de robustez que se realizó tomó en consideración al género, lo cual es un ejercicio relevante, tanto para analizar si existen diferencias significativas entre grupos, como para estudiar la estabilidad del resto de los coeficientes. No obstante, y a diferencia de los resultados obtenidos por Akudugu *et al.* (2012), esta variable no mostró poder explicativo en ningún modelo ni se tradujo en cambios relevantes en los modelos. Adicionalmente, se utilizaron variables dicotómicas que reflejan el nivel educacional por género, pero los resultados tampoco fluctuaron.

En cuanto a los atributos del personal de las empresas, se estudiaron distintas variables y especificaciones. Para esto se incorporaron en forma separada y conjunta el nivel de formación según diversas áreas de jerarquía (*i. e.*, dirección y gerencia) de modo tal de distinguirlo de los que desempeñan tareas a campo (*i. e.*, operaciones). El nivel de formación entre los diversos niveles jerárquicos no presentó un poder explicativo relevante. El hecho de que la formación del personal no resulte una variable significativa para explicar la adopción puede deberse a que el manejo de estas tecnologías no requiere de niveles de educación formal elevados, o que la gestión de estas tareas se delega y, por lo tanto, no son llevadas a cabo por miembros del equipo de la empresa.

Finalmente, en cuanto a los temas de sostenibilidad, se analizó una medida alternativa que consiste en la utilización de indicadores ambientales por parte de los productores, la cual

²⁷ Dado que la implementación de un planteo agronómico micro-ambientado supone una mayor complejidad técnica, intuitivamente, sería posible de esperar que esto sea más frecuente entre firmas que dispongan de esquemas organizacionales más sofisticados. De hecho, existe evidencia empírica que muestra cómo la innovación en procesos de gestión organizacional afecta positivamente la innovación en los ámbitos técnicos de las empresas (Hollen *et al.*, 2013; Haneda & Ito, 2018).

consideramos que puede reflejar el interés por parte de estos sobre la dimensión ambiental. Al igual que en la especificación previa, el efecto estimado tiene el signo esperado y muestra una relación estadísticamente significativa con los niveles de adopción de tecnologías de AP.

7. Conclusiones

En este trabajo estudiamos la incidencia de distintos factores sobre la adopción de tecnologías de AP a partir del empleo de una base de datos única, generada en el marco del Censo CREA de 2019. Esta base puede presentar limitaciones para extrapolar los resultados al universo de los productores agrícolas del país, dado que los miembros CREA no necesariamente son representativos del productor promedio. No obstante, nos permitió incluir en el análisis una serie de variables que hasta el momento fueron escasamente consideradas en la literatura a nivel internacional (*e. g.*, efectos de red y variables relacionadas con el cuidado del impacto ambiental que generan las actividades productivas). De hecho, se trata del primer estudio en su tipo realizado en Argentina.

El objetivo de los distintos ejercicios econométricos presentados en este trabajo es entender cuáles son las variables que influyen en la probabilidad e intensidad de adopción de tecnologías de AP. Los hallazgos sugieren que las decisiones sobre adopción (probabilidad e intensidad) están asociadas positivamente con la extensión de la superficie, algo previsible dado que en estos casos también resulta más factible explotar mayores niveles de heterogeneidad ambiental. A su vez, el alquiler de tierras tiene un impacto negativo, lo cual podría sugerir que los retornos a la inversión por el uso de estas tecnologías son menores a medida que el horizonte temporal de la explotación de una determinada superficie se acorta. Así, dada la alta tasa de rotación que puede haber en tierras alquiladas, los incentivos a emplear herramientas de AP disminuyen.

Cabe destacar que en la producción agrícola argentina de cultivos extensivos el uso de tierras arrendadas a terceros es una práctica muy generalizada. Si bien no es posible acceder a la base de datos del Censo Nacional Agropecuario del 2018 de modo tal de poder precisar con detalle este fenómeno, diversos especialistas en la materia que fueron consultados coinciden en que alrededor de 2/3 de la superficie cultivada corresponde a este tipo de esquema.

En contraste con estos hallazgos, que van en línea con la literatura previa sobre el tema a nivel internacional, en nuestro caso no encontramos evidencia positiva ligada a la tenencia de maquinaria agrícola. Tal como se mencionó, esto podría deberse a la amplia oferta de contratistas de servicios agrícolas (Lódola y Brigo, 2013), lo cual reduce la necesidad de que los productores sean los dueños de los bienes de capital necesarios para la ejecución de tareas agrícolas (*e. g.*, siembra, fertilización, etc.) -ver Bisang (2003)-. Adicionalmente, tampoco se encontró que la conectividad a Internet facilite la adopción de tecnologías de AP. La justificación en este caso puede estar asociada a que más allá del limitado acceso a Internet que se registra en zonas muy poco pobladas del país (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Banco Interamericano de Desarrollo y Microsoft, 2020), la amplia mayoría de los equipos de AP pueden funcionar en modo *offline*, almacenando los datos de manera local y transmitiéndolos una vez que se accede a la conexión (Nabi *et al.*, 2022).

En el estudio también se incluyeron variables orientadas a evaluar efectos vinculados con el capital humano de los productores y sus empleados. Para tal fin se consideró el nivel educativo y la edad de quienes toman las decisiones productivas (los miembros CREA), el nivel de formación alcanzado por los operarios y el porcentaje de empleados de la plantilla según nivel etario. Los resultados muestran que el nivel de formación de quien toma las decisiones productivas está positivamente correlacionado con el nivel de adopción. En cambio, el nivel de formación de los

operarios no resultó ser una variable significativa, sugiriendo que el uso de estas tecnologías no necesariamente requiere mayores niveles de formación profesional, o bien, porque su implementación a campo está a cargo de los contratistas de servicios. Por otro lado, la edad -tanto de quien toma las decisiones productivas como del resto de empleados en la empresa- tampoco emergió como un factor relevante, lo cual sugiere que no solo las personas jóvenes tienen posibilidad de utilizar estas tecnologías.

Otro hallazgo relevante de nuestro trabajo es el análisis de los impactos que generan las vinculaciones externas y el nivel de asesoramiento técnico recibido por parte de los productores. La utilización de las tecnologías de AP resultó ser más frecuente entre los productores que contrataron algún tipo de asesoramiento externo para abordar problemas productivos. Adicionalmente, la dinámica de trabajo en el marco de los grupos de productores también se asocia positivamente con la adopción de AP, en tanto se verificó que dentro de un grupo CREA, a medida que aumenta la incorporación de estas tecnologías, también lo hace la probabilidad de que otros miembros del grupo la adopten.

Dado que la contratación de asesores externos a la firma para la resolución de temas productivos y la dinámica de los grupos CREA están asociadas positivamente con la adopción de AP, esto sugiere la presencia de “efectos de red”, donde las vinculaciones con otros actores podrían potenciar la incorporación de estas herramientas. Esto podría deberse a la existencia de información relevante asociada al uso de tecnologías de AP que no necesariamente sea fácilmente asimilable y/o posible de incorporar de forma autónoma por parte de las empresas, motivos por los cuales la disponibilidad de fuentes externas de información adquiere un rol importante en el proceso de difusión de estas tecnologías.

Finalmente, la consideración de las cuestiones ambientales también emergió como otro factor que incidió en la adopción de tecnologías de AP. En este estudio aproximamos esta variable analizando el efecto de la contratación de técnicos externos a la empresa para recibir asesoramiento en cuestiones ambientales, así como también a través de la utilización de indicadores ambientales en reuniones CREA. Una interpretación posible de estos resultados indicaría que, dado que las tecnologías de AP contribuyen de forma directa y/o indirecta con el cuidado del ambiente, aquellas empresas que están más interesadas en estos tipos de problemáticas tendrán más incentivos para adoptar herramientas de AP.

Las características estructurales de las empresas y del capital humano de sus dueños y empleados son elementos relativamente estables, al menos en el corto plazo. Por el contrario, las vinculaciones con otros actores y la implementación de buenas prácticas agrícolas con foco en el cuidado del ambiente son factores mucho más susceptibles de ser afectados por políticas públicas orientadas a la innovación. En consecuencia, consideramos que la adopción de tecnologías de AP podría verse incentivada a través de instrumentos que incrementen las interacciones y potencien los flujos de intercambios de información y conocimiento entre productores, así como también por otros que introduzcan incentivos a la implementación de prácticas agronómicas relacionadas con el cuidado ambiental (*e. g.*, mejora en la eficiencia del uso de recursos e insumos, reducción de riesgos de contaminación, etc.).

Referencias

- Akudugu, M. A., Guo, E., & Dadzie, S. K. (2012). Adoption of modern agricultural production technologies by farm households in Ghana: What factors influence their decisions. UDSspace.
- Banerjee, S., y Martin, S. (2008). A binary logit analysis of factors impacting adoption of genetically modified cotton. *AgBioForum*, 12.
- Bisang, R. (2003). Apertura económica, innovación y estructura productiva: La aplicación de la biotecnología en la producción agrícola pampeana argentina. *Desarrollo Económico*, 43(171), 413. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/3455892>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. M. (2004). Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*, 5, 359-387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>.
- Borghetti, E., Avanzi, J. C., Bortolon, L., Luchiarini Junior, A., & Bortolon, E. S. O. (2016). Adoption and Use of Precision Agriculture in Brazil: Perception of Growers and Service Dealership. *Journal of Agricultural Science*, 8(11), 89. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n11p89>.
- Boyer, C. N., Lambert, D. M., Velandia, M., English, B. C., Robert, R. K., Larson, J. A., Larkin, S. L., Paudel, K. P., & Reeves, J. M. (2016). Cotton producer awareness and participation in cost-sharing programs for precision nutrient-management technology. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 41(1), 81-96.
- Bramley, R. G. V., & Ouzman, J. (2019). Farmer attitudes to the use of sensors and automation in fertilizer decision-making: nitrogen fertilization in the Australian grains sector. *Precision Agriculture*, 20, 157-175. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9589-y>.
- Camerani, R., Corrocher, N., & Fontana, R. (2016). Drivers of diffusion of consumer products: empirical evidence from the digital audio player market. *Economics of Innovation and New Technology*, 25(7), 731- 745. <https://doi.org/10.1080/10438599.2016.1142125>
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152. <https://doi.org/10.2307/2393553>.
- Comin, D., & Hobijn, B. (2010). An Exploration of Technology Diffusion. *American Economic Review* 100 (December 2010), 2031-2059.
- Corrocher, N., & Fontana, R. (2008). Expectations, network effects and timing of technology adoption: some empirical evidence from a sample of SMEs in Italy. *Small Business Economics*, 31(4), 425-441. <https://doi.org/10.1007/s11187-007-9062-1>.
- David, P. A. (1966). "The Mechanization of Reaping in the Ante-bellum Midwest." In *Industrialization in Two Systems: Essays in Honor of Alexander Gerschenkron*, Ed. H. Rosovsky, 3-39. New York: Wiley and Sons.
- Davies, S. (1979). "The Diffusion of Process Innovations", Cambridge: Cambridge University Press.
- English, B. C., Roberts, R. K., y Larson, J. A. (2000). A logit analysis of precision farming technology adoption in Tennessee. *Knoxville: The University of Tennessee Agricultural Experiment Station, Department of Agricultural Economics*, 1-22.
- Erickson, B., Lowenberg-DeBoer, J., & Bradford, J. (2017). 2017 Precision agriculture dealership survey. Departments of Agricultural Economics and Agronomy, Purdue University, West Lafayette, IN.

- Finger, R., Swinton, S. M., Benni, N. E., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1). <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>.
- Friedman, J. (2012). Whether to probit or to probe it: in defense of the linear probability model. *Development Impact*, 18. Descargado de <https://blogs.worldbank.org/impacitevaluations/whether-to-probit-or-to-probe-it-in-defense-of-the-linear-probability-model>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Geroski, P. A. (2000). Models of technology diffusion. *Research Policy*, 29(4), 603-625
- Griffin, T., & Lowenberg-DeBoer, J. M. (2005). Worldwide adoption and profitability of precision agriculture: Implications for Brazil. *Revista de Política Agrícola*, 14(4), 20-38. Disponible en: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/549/498>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Griliches, Z. (1957). Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change. *Econometría*, 25(4), 501. <https://doi.org/10.2307/1905380>.
- Haneda, S., & Ito, K. (2018). Organizational and human resource management and innovation: Which management practices are linked to product and/or process innovation? *Research Policy*, 47(1), 194-208. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.10.008>.
- Hollen, R. M. A., Van Den Bosch, F. A. J., & Volberda, H. W. (2013). The Role of Management Innovation in Enabling Technological Process Innovation: An Inter-Organizational Perspective. *European Management Review*, 10(1), 35-50. <https://doi.org/10.1111/emre.12003>.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Banco interamericano de Desarrollo y Microsoft. (2020). Autores: BID, Ziegler, S., Arias-Segura, J., Bosio, M., Camacho, K., Microsoft Corporation, IICA, y Eje Transversal Innovación y Tecnología (ETIT). Conectividad rural en América Latina y el Caribe. Un puente al desarrollo sostenible en tiempos de pandemia. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/12896>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Kemp, R., & Volpi, M. (2008). The diffusion of clean technologies: a review with suggestions for future diffusion analysis. *Journal of Cleaner Production*, 16(1), S14-S21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.10.019>.
- Kolady, D. E., Van der Sluis, E., Uddin, M. M.; & Deutz1, A. P. (2021). Determinants of adoption and adoption intensity of precision agriculture technologies: evidence from South Dakota. *Precision Agriculture*, 22, 689-710. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09750-2>
- Kountios, G., Ragkos, A., Bournaris, T., Papadavid, G., & Michailidis, A. (2018). Educational needs and perceptions of the sustainability of precision agriculture: survey evidence from Greece. *Precision Agriculture*, 19(3), 537-554. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9537-2>.
- Kuan, C. M. (2000). Introduction to Econometric Theory. Taipei. Academia Sinica. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/99153954/Kuan-C-m-Introduction-to-Econometric-Theory-LN-Taipei-2002-202s-GL#>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Lachman, J., Braude, H., Monzón, J., López, S., y Gómez-Roca, S. (2022). El potencial del agro 4.0 en Argentina, Diagnóstico y propuestas de políticas públicas para su promoción. Ministerio de Desarrollo Productivo, Argentina Productiva 2030.
- Lachman, J., López, A., Tinghitella, G., & Gómez-Roca, S. (2021). Agtech in Argentina. *Documentos de trabajo del Instituto Interdisciplinario de Economía Política*, (57), 1-51.

- Lachman, J., y López, A. (2018). Nuevas oportunidades y desafíos productivos en la Argentina: resultados de la primera encuesta nacional a empresas de agricultura y ganadería de precisión (N° 2018-38). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Económicas, Instituto Interdisciplinario de Economía Política.
- Lachman, J., & López, A. (2019). Innovation obstacles in an emerging high tech sector. *Journal of the Iberoamerican Academy of Management*, 17(4), 474-493. <https://doi.org/10.1108/mrjiam-11-2018-0883>.
- Lambert, D. M., Paudel, K. P., & Larson, J. A. (2015). Bundled adoption of precision agriculture technologies by cotton producers. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 40(2), 325-345.
- Lódola, A., & Brigo, R. (2013). Contratistas de servicios agropecuarios, difusión tecnológica y redes agroalimentarias: una larga y productiva relación. *Claves para repensar el agro argentino*, 203-258.
- Lowenberg-DeBoer, J. M. (2018). The economics of precision agriculture. In: J. Stafford, editor, Precision agriculture for sustainability. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2017.0032.19>.
- Lowenberg-DeBoer, J. M. (2019). The economics of precision agriculture. In: Precision agriculture for sustainability, Ed. John Stafford. London: Burleigh Dodds Science Publishing.
- Lowenberg-DeBoer, J. M., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4). <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>.
- Markley, J., & Hughes, J. (2014). Understanding the barriers to the implementation of precision agriculture in the central region. *International Sugar Journal*, 116(1384), 278-285.
- Melchiori, R., Albarenque, S., y Kemerer, C. (2013). *Uso, Adopción y Limitaciones de la Agricultura de Precisión en Argentina*. Documento de trabajo, EEA INTA Paraná.
- Melchiori, R. J. M., Albarenque, S. M., y Kemerer, A. C. (2018). Uso, adopción y limitaciones de la Agricultura de Precisión en Argentina. 12º Curso de Agricultura de Precisión.
- Michels, M., Fecke, W., Feil, J.-H., Musshoff, O., Pigisch, J., & Krone, S. (2020). Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. *Precision Agriculture*, 21, 403-425. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09675-5>.
- Miller, N. J., Griffin, T. W., Ciampitti, I. A., & Sharda, A. (2018). Farm adoption of embodied knowledge and information intensive precision agriculture technology bundles. *Precision Agriculture*, 20, 348-361. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9611-4>.
- Mitchell, S., Weersink, A., & Erickson, B. (2018). Adoption of precision agriculture technologies in Ontario crop production. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(6), 1384-1388. <https://doi.org/10.1139/cjps-2017-0342>. Consultado el 13 de febrero de 2023.
- Nabi, F., Jamwal, S., & Padmanbh, K. (2022). Wireless sensor network in precision farming for forecasting and monitoring of apple disease: a survey. *International Journal of Information Technology*, 14, 769-780 <https://doi.org/10.1007/s41870-020-00418-8>.
- Papke, L. E., & Wooldridge, J. M. (1996). Econometric methods for fractional response variables with an application to 401 (k) plan participation rates. *Journal of applied econometrics*, 11(6), 619-632.
- Pandit, M., Paudel, K. P., Mishra, A. K., & Segarra, E. (2012). Adoption and nonadoption of precision farming technologies by cotton farmers. *Agricultural & Applied Economics Association*. Seattle, Washington.
- Paustian, M., & Theuvsen, L. (2017). Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. *Precision Agriculture*, 18(5), 701-716. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9482-5>.

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1-85. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60513-1).

Satorre, E., y Bert, F. (2014). Agricultura por ambiente: Conceptos para su incorporación eficaz en el manejo de nuestros campos. *Cultivar Decisiones*, 13. Disponible en: https://www.agroconsultasonline.com.ar//documento.html?op=v&documento_id=439.

Consultado el 13 de febrero de 2023.

Scaramuzza, F., Vélez, J., y Villarroel, D. (2016). “Adopción de Agricultura de Precisión en Argentina: Evolución en los principales segmentos”, en “Agricultura y Ganadería de precisión y agregado de valor en origen”. Ediciones INTA.

Schimmelpfennig, D. (2017). “Farm Profits and Adoption of Precision Agriculture”, ERR-217, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.

Stoneman, P., & Battisti, G. (2010). “The diffusion of new technology”, in Hall, B. H., & Resenberg, N. (Eds.). *Handbook of the Economics of Innovation*, 2, 734-757, chapter 17.

Tamirat, T. W., Pedersen, S. M., & Lind, K. M. (2018). Farm and operator characteristics affecting adoption of precision agriculture in Denmark and Germany. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 68(4), 349-357. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1402949>.

Tey, Y. S., y Brindal, M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision agriculture*, 13(6), 713-730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>.

Thompson, N., Bir, C., Widmar, D., & Mintert, J. (2018). Farmer perceptions of precision agriculture benefits. *Journal of Agriculture and Applied Economics*. 51:142–163. <https://doi.org/10.1017/aae.2018.27>.

Trajtenberg, L., y Johnson, G. (2014). Curva de salarios en argentina 1996-2012: un estudio econométrico por medio de pseudo-paneles. Mimeo.

Universidad Austral. (2010). Encuesta sobre las Necesidades del Productor Agropecuario Argentino. Centro de Estudios en Agronegocios y Alimentos. Disponible en: <https://www.austral.edu.ar/cienciasempresariales/wp-content/uploads/2017/07/Informe-ENPA-2009>

Universidad Austral. (2012). Encuesta sobre las Necesidades del Productor Agropecuario Argentino. Centro de Estudios en Agronegocios y Alimentos. Disponible en: <https://www.austral.edu.ar/cienciasempresariales/wp-content/uploads/2017/07/Informe-ENPA-2012.pdf>. Consultado el 13 de febrero de 2023.

Ward, P. S., & Pedde, V. O. (2014). Capturing social network effects in technology adoption: the spatial diffusion of hybrid rice in Bangladesh. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 59(2), 225-241. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12058>.

Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT press.

Wooldridge, J. M. (2015). *Introductory econometrics: A modern approach*. Cengage learning.

Anexo I. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el estudio

Variable	Observaciones	Media	Desvío Estándar	Mínimo	Máximo
Superficie Cultivos Anuales	838	7.14	0.98	5.08	10.82
Cosechadora	833	0.24	0.43	0	1
Alquiler	838	0.67	0.47	0	1
Conectividad Celular	783	0.81	0.39	0	1
Edad	828	49.77	11.74	22	91
Edad ²	828	2614.68	1229.74	484	8281
Formación Empresario	829	16.13	2.29	7	22
Edad 30 a 45	673	0.50	0.37	0	1
Operarios Universitarios	838	0.39	0.49	0	1
Asesoramiento	810	0.68	0.47	0	1
Asesoramiento Ambiental	815	0.12	0.33	0	1
Adopción Vecinos	813	16.48	23.47	0	100

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

Anexo II. Detalles metodológicos para no economistas

Una primera aproximación para identificar los factores que determinan la adopción de tecnologías de AP podría basarse en la utilización de diversas variables para caracterizar a distintos grupos de productores, calcular valores de adopción promedio y analizar descriptivamente las diferencias encontradas. Esta aproximación podría ayudarnos a contestar preguntas tales como ¿el promedio de adopción de tecnologías de AP es mayor en el grupo de empresarios propietarios de la tierra en la que producen o en el grupo de empresarios que alquila? Y sería sumamente útil para describir y comprender ciertos patrones. No obstante, para analizar diversas características de forma simultánea o incluir variables donde la división en grupos no sea fácil de aproximar, esta estrategia de estudio se volvería más engorrosa y perdería utilidad. Para estos casos se recurren a herramientas más complejas que provienen del campo de la econometría.

En econometría una de las alternativas más difundidas es el modelo de regresión lineal. En este modelo se supone que el valor esperado de una variable de interés depende linealmente de ciertas variables explicativas. Bajo ciertas condiciones, se puede analizar y hacer inferencia sobre cómo cambia ese valor esperado conforme varía el valor de una o más variables explicativas. Por ejemplo, el valor esperado del nivel de adopción de tecnologías de AP por parte de un productor dependerá linealmente de si el campo es propio, de la extensión de ese campo, y de otras variables, de forma simultánea. A su vez, al cambio de este valor esperado ante un cambio en una variable explicativa, se lo denomina efecto marginal.

El modelo de regresión lineal es una herramienta sumamente útil a la hora de contestar preguntas empíricas utilizando datos. Sus resultados son claros y no dejan de ser aplicables a un amplio espectro de situaciones. No obstante, en muchas ocasiones resulta útil recurrir a modelos no lineales. En esencia, en estos casos se supone que los impactos de las variables explicativas no son constantes (en esencia, el efecto marginal mencionado previamente no es siempre el mismo). Por ejemplo, supóngase que se propone un modelo donde la intensidad de la adopción depende linealmente del tamaño de la superficie productiva. Si esta relación es positiva, entonces si el tamaño del campo en cuestión creciera indefinidamente, la intensidad esperada de adopción también lo haría, a tal punto que superaría el 100% del terreno, algo que no tendría sentido lógico. Esto se traduce en la conveniencia de no restringir las estimaciones a situaciones en las que sea constante el efecto marginal de las variables explicativas del modelo. Aquí es donde los modelos no lineales juegan un rol crucial, ya que permiten sortear estas dificultades. Los modelos no lineales utilizados en este trabajo son los aquí llamados “Logit”, “Logit fraccional”, “Probit” y “Probit fraccional”.

No obstante, aun en estos casos donde la variable dependiente se encuentra acotada a un rango de valores limitado, el modelo lineal puede ser una gran herramienta. Esto es así, porque es un modelo de fácil interpretación que puede estimar los efectos locales de las variables en forma consistente si valen ciertas condiciones, como que la proporción de predicciones fuera de los valores posibles sea baja (Friedman, 2012). No obstante, si estas condiciones no fueran válidas, los estimadores utilizados podrían ser inconsistentes. Dado que, a pesar de sus limitaciones, el modelo lineal presenta estas ventajas, en este trabajo se lo utiliza junto con los modelos no lineales antes mencionados a fines de identificar los determinantes de la adopción de tecnologías de AP y su nivel de intensidad.

Una limitación de los modelos no lineales es que sus coeficientes no tienen una interpretación tan directa como los del modelo lineal. Por esto, una estrategia usual en la literatura es reportar los efectos marginales promedio. Dado que la relación entre la adopción y las variables explicativas deja de ser constante, no es lo mismo un cambio de una variable partiendo de una

situación o de otra (*e. g.*, un aumento en la superficie para un productor que alquila el terreno y para uno que no lo alquila). En otras palabras, el cambio en el valor esperado de cada observación (también llamado efecto marginal) no será uniforme (*e. g.*, para algunas observaciones la probabilidad estimada de adopción crece mucho y para otras crece poco). Por lo tanto, lo que se presenta es el valor promedio obtenido a partir de cada uno de estos cambios. Este procedimiento se realiza con cada variable. En esencia, este ejercicio nos permite disponer de una aproximación del impacto medio de un cambio en una variable de forma tal de que el valor de los coeficientes pueda ser utilizado para comprender la magnitud de posibles cambios en la adopción de AP.

En caso de desear profundizar más sobre estos contenidos, el texto entero de Wooldridge (2015) es un manual estándar de la literatura, y en los capítulos 7 y 17 se analizan en los puntos mencionados en este anexo.

Anexo III. Medición alternativa de la adopción de vecinos

En el trabajo, la medición sobre la adopción de las personas cercanas al productor se consideró en forma relativa. Esto implica que en un grupo reducido se tenderá a tomar como más intensas las relaciones entre individuos. En otras palabras, el impacto esperado de un aumento de la adopción de otro productor será más fuerte en un grupo de menor tamaño que en uno más grande. En este anexo, se incorpora una estrategia alternativa, en la cual la medición propuesta es en términos absolutos. En el modelo, esto implicará un mismo impacto esperado si un productor cercano pasa a ser adoptante, más allá de la dimensión del grupo.

Este ejercicio es presentado en la Tabla 6, donde se reportan los efectos marginales promedio estimados. Como se puede observar, los resultados se encuentran en línea con los ya presentados. A modo ilustrativo, aquí se sugiere que, si otro miembro del grupo CREA adoptara tecnologías de AP, se espera que el productor sea un 3% más proclive a ser adoptante (Columnas 2 y 3) y que su nivel de adopción esperada pasa a ser un 2% más elevado (Columnas 5 y 6).

Tabla 6. Efectos marginales promedio, especificación alternativa²⁸

VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Dependiente binaria			Dependiente continua		
	Mod. Lineal	Probit	Logit	Mod. Lineal	Frac Probit	Frac Logit
Estructurales						
Superficie Cultivos Anuales	0.088***	0.097***	0.094***	0.045***	0.038***	0.035***
Cosechadora	0.052	0.084**	0.085**	0.025	0.036**	0.039**
Alquila	-0.061*	-0.075**	-0.075**	-0.044**	-0.048***	-0.048**
Conectividad Celular	-0.033	-0.023	-0.023	-0.013	-0.011	-0.014
Capital humano						
Edad	-0.002	-0.007	-0.007	0.004	0.001	0.001
Edad ²	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000
Formación Empresario	0.013**	0.023***	0.024***	0.008*	0.012***	0.013***
Edad 30 a 45	0.056	0.056	0.059	0.055**	0.050**	0.052**
Operarios Universitarios	0.030	0.034	0.037	-0.008	-0.007	-0.006
Vinculaciones y ambiente						
Asesoramiento	0.064**	0.098**	0.106**	0.026	0.036**	0.040*
Asesoramiento Ambiental	0.125***	0.090**	0.082*	0.110***	0.065***	0.063***
Cantidad de vecinos adoptantes	0.049***	0.033***	0.032***	0.040***	0.020***	0.019***

Errores estándar omitidos por extensión: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: elaboración propia en base a censo CREA (2019).

²⁸ Por motivos de extensión, se omiten los errores estándar. Los efectos marginales se desprenden de los modelos ya presentados en la Tabla 4, de modo que la cantidad de observaciones y variables incluidas son equivalentes.



INSTITUTO INTERDISCIPLINARIO DE ECONOMÍA POLÍTICA

Universidad de Buenos Aires | Facultad de Ciencias Económicas

Av. Córdoba 2122 - 2º piso (C1120 AAQ)
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
+54 11 5285-6578 | www.iiep.economicas.uba.ar

  @iiep_oficial