

DOCUMENTO DE TRABAJO N° IDB-WP-01741

Infraestructura de riego y productividad de los viñedos:

Evidencia mediante teledetección y diferencias en diferencias sintéticas en Argentina

Maja Schling
Magaly Saenz Somarriba
Carmine Paolo de Salvo
Rodrigo Chang

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agricultura y Desarrollo Rural

Agosto 2025



Infraestructura de riego y productividad de los viñedos:

Evidencia mediante teledetección y diferencias en diferencias sintéticas en Argentina

Maja Schling
Magaly Saenz Somarriba
Carmine Paolo de Salvo
Rodrigo Chang

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agricultura y Desarrollo Rural

Agosto 2025



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

La infraestructura de riego y la productividad de los viñedos: evidencia mediante teledetección y diferencias en diferencias sintéticas en Argentina / Maja Schling, Magaly Saenz Somarriba, Carmine Paolo de Salvo, Rodrigo Chang.

p. cm. — (documento de Trabajo del BID ; 1741)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Grape industry-Evaluation-Argentina. 2. Remote-sensing images-Argentina. 3. Irrigation farming-Evaluation-Argentina. 4. Irrigation-Equipment and supply-Evaluation-Argentina. I. Schling, Maja. II. Saenz Somarriba, Magaly. III. De Salvo, Carmine Paolo. IV. Chang, Rodrigo. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agricultura y Desarrollo Rural. VI. Serie.

IDB-WP-1741

JEL Codes: O13, O22, Q 12, Q15, Q18

Palabras clave: riego, productividad, teledetección, evaluación de impacto, Argentina

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2025 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO

(<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Infraestructura de riego y productividad de los viñedos: Evidencia mediante teledetección y diferencias en diferencias sintéticas en Argentina

Agosto 2025

Maja Schling¹, Magaly Saenz Somarriba², Carmine Paolo de Salvo³, Rodrigo Chang⁴

Resumen:

El presente trabajo evalúa el impacto a largo plazo de la rehabilitación de los canales de riego en el marco del programa PROSAP III de Argentina sobre la productividad de los viñedos en la provincia de San Juan. Combinamos 20 años de datos NDVI obtenidos de Landsat con datos de encuestas realizadas a 299 viticultores y aplicamos el modelo de diferencias en diferencias sintéticas (SDID) para estimar los efectos causales. Otros chequeos de robustez son el emparejamiento por puntaje de propensión (*propensity score matching* o PSM) y la ponderación de probabilidad inversa (*inverse probability weighting* o IPW). Los resultados indican que la rehabilitación de canales incrementó el NDVI entre un 0,9% y un 1%, lo que equivale a un aumento del rendimiento de aproximadamente 144 kg por hectárea, con un impacto máximo del 2,5% (386 kg por hectárea) cinco años después de la intervención. El estudio pone de manifiesto los beneficios en la productividad de las inversiones en sistemas de riego y demuestra el valor de la teledetección en las evaluaciones de impacto agrícola a gran escala. Los resultados ofrecen información relevante para las políticas de diseño y monitoreo de los programas de infraestructura rural en regiones con escasez de agua.

Agradecimientos

Quisiéramos agradecer al Centro de Investigaciones en Estadística Aplicada (CINEA) y al Centro de Investigaciones Geográficas y Geotecnológicas (CIGG) de la Universidad Nacional Tres de Febrero (UNTREF) por el trabajo esencial que realizaron de recopilar y procesar los datos tanto de encuestas como de la teledetección. Agradecemos, en especial, a Walter Cortés por su apoyo experto para el análisis de teledetección y a Alejandro Galetto por hacer de puente con los actores locales durante las tareas de recopilación de datos. Por último, deseamos agradecer al equipo de la Dirección General de Programas y Proyectos Sectoriales y Especiales (DIPROSE) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca por facilitar el proceso de recopilación de datos y por compartir valiosos conocimientos institucionales y específicos de los proyectos. Le agradecemos a Cecilia Anderson por su traducción cuidadosa del manuscrito a su versión en castellano. Por último, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores de pares anónimos por sus valiosos comentarios, que contribuyeron a mejorar la calidad de este manuscrito.

¹ Especialista Principal en Economía, Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo

² Consultora, Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo

³ Especialista Principal en Desarrollo Rural, Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo

⁴ Consultor, Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo

1. Introducción

En las últimas tres décadas, la agricultura en América Latina y el Caribe (ALC) ha crecido a un ritmo acelerado y convirtió a la región en uno de los mayores contribuyentes de alimentos y productos agrícolas básicos del mundo (FAO, 2021; Rosegrant et al., 2009). Si bien se suele prestar mucha atención a los principales cultivos básicos, muchos países de la región también se destacan por contar con sectores de alto valor agrícola, como la horticultura, la fruticultura y la viticultura. En algunas partes de Argentina, Chile y Brasil, estos cultivos especializados se han convertido en la piedra angular tanto de los ingresos por exportaciones como de la seguridad alimentaria de la región (Hall et al., 2011; Schling y Pazos, 2022). Sin embargo, el panorama agrícola de la región está marcado por fuertes contrastes: mientras que algunos productores operan a escala comercial con infraestructura moderna, una parte importante de la producción está en manos de pequeños y medianos agricultores con grandes limitaciones por la disponibilidad de agua, adopción de tecnología y acceso al crédito (Cavatassi et al., 2011; Salazar et al., 2021). Además, el uso ineficiente e insostenible de los insumos agrícolas, y del agua en particular, sigue contribuyendo a la sobreexplotación y contaminación de los recursos naturales de la región, que a su vez constituyen una amenaza para la biodiversidad y un riesgo para la sostenibilidad de la producción agrícola. Por ende, es esencial desarrollar la infraestructura rural para impulsar la productividad, equidad y sostenibilidad en la región.

Esta dualidad es evidente en Argentina, un país conocido por la robustez de su sector agroexportador, pero que convive con un gran número de agricultores familiares que luchan con la baja productividad en tierras semiáridas (Banco Mundial, 2007). La industria vitivinícola, sobre todo en provincias como Mendoza y San Juan, subraya el papel fundamental del riego para la sostenibilidad de los cultivos de alto valor en tierras semi desérticas (Fereris y Evans, 2006; Jara et al., 2017). Contar con un suministro de agua fiable es esencial para alcanzar un rendimiento estable y determinados parámetros de calidad en la producción de uva. Sin embargo, muchos viticultores dependen de sistemas de canales construidos hace décadas, que se deben rehabilitar o modernizar. Subsancar estas brechas de infraestructura podría ayudar significativamente a impulsar la productividad, estabilizar los ingresos y afianzar la competitividad de las exportaciones de la viticultura argentina.

En este contexto, la evidencia demuestra consistentemente que brindar bienes públicos en forma de infraestructura rural, como el riego, facilita que existan las condiciones esenciales para el desarrollo de los mercados y las actividades productivas privadas (véanse, por ejemplo, Dercon et al., 2006; Fan, 2008; Jacoby, 2000; Jouanjean, 2013; Khandker et al., 2009). También está comprobado que invertir en infraestructura rural es más eficaz y eficiente que financiar bienes privados para impulsar la productividad agrícola, reducir la pobreza rural y disminuir los efectos adversos en la gestión de los recursos naturales (Fan et al., 2002; López y Galinato, 2007; Sills et al., 2015).

Tras reconocer la importancia de modernizar el riego para lograr el crecimiento agrícola y la reducción de la pobreza, los encargados de formular políticas en Argentina y en toda ALC presentaron iniciativas para mejorar la distribución y gestión del agua a pequeños agricultores (Fan et al., 2008). Argentina, en particular, tiene una larga trayectoria de implementar proyectos de infraestructura rural por medio del Programa de servicios agrícolas provinciales (PROSAP)

con apoyo constante del BID desde 1996. Hasta 2016, el Banco aprobó cuatro préstamos de inversión a solicitud del gobierno argentino por un total de US\$855 millones para financiar las sucesivas fases del programa PROSAP. Las tres primeras operaciones terminaron en 2012, 2014 y 2017, respectivamente, y la cuarta aún se encuentra en ejecución, mientras que en 2024 se aprobó una quinta por un monto de inversión de US\$325 millones.

El PROSAP financió la construcción de más de 1.200 km de sistemas de riego y drenaje, más de 1.000 km de caminos rurales y más de 7.100 km de tendido eléctrico para la electrificación rural, entre otros. La tercera fase de la serie programática, el PROSAP III, se centró específicamente en la rehabilitación de canales en provincias agrícolas clave, como San Juan. Con subvenciones parciales y apoyo técnico, el programa pretendía mejorar los canales de riego, reducir las filtraciones y las pérdidas de agua y garantizar que los pequeños y medianos viticultores pudieran regar sus viñedos de manera fiable (Saleth y Dinar, 2004). Al afianzar la capacidad de los agricultores de gestionar eficazmente el recurso hídrico, el PROSAP III pretendía aumentar el rendimiento y mejorar la resiliencia de los sistemas productivos locales.

No obstante, hasta ahora se cuenta con pocas evaluaciones de impacto robustas de las inversiones en infraestructura rural del PROSAP. En la mayoría de las evaluaciones anteriores se empleaban metodologías descriptivas o reflexivas que no permitían realizar inferencias causales del impacto del programa. Dada la magnitud financiera de las inversiones y la continua ejecución de proyectos de infraestructura rural por medio del PROSAP, se necesitan más pruebas empíricas representativas del contexto argentino. Un desafío general ha sido que las encuestas agrícolas tradicionales son costosas de realizar y pueden verse afectadas por el sesgo de memoria, el subreporte o errores en la medición de los datos de rendimiento (Burke y Lobell, 2017). Esta brecha de medición resulta particularmente crítica para los cultivos perennes como la uva, donde el rendimiento y la calidad varían significativamente de una temporada a otra según la disponibilidad de agua, las fluctuaciones climáticas y las decisiones de manejo del viñedo (Chaves et al., 2010).

Sin embargo, los avances recientes en la teledetección presentan oportunidades atractivas para subsanar estas limitaciones. Las imágenes satelitales, en especial el índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation index* o NDVI), permiten que los investigadores y encargados de formular políticas lleven un seguimiento sistemático del vigor vegetativo en grandes extensiones geográficas y evalúen los cambios a largo y corto plazo (Sun et al., 2017). Las mediciones que se realizan a partir del NDVI permiten detectar cambios sutiles en la salud de la cubierta vegetal que se podrían pasar por alto en los estudios convencionales, lo cual ofrece un indicador objetivo y de alta frecuencia de resultados como la productividad y el estrés hídrico (Salazar et al., 2021). Además de los índices de vegetación, la teledetección también permite extraer variables climáticas, como temperatura y precipitaciones, lo que aumenta la robustez de las estimaciones de impacto dado que contempla las variaciones climáticas. Para regiones como San Juan, este enfoque resulta sumamente útil para evaluar si la rehabilitación de canales en el marco del PROSAP III efectivamente aumenta la productividad de los viñedos a largo plazo y mejora la resiliencia de los agricultores a las variaciones climáticas.

El presente documento contribuye a la literatura al estimar empíricamente el impacto de la mejora de la infraestructura de riego en los resultados de los viticultores en la región argentina de San

Juan. Con una combinación de datos de teledetección e información de encuestas, aplicamos un modelo de diferencias en diferencias sintéticas para evaluar rigurosamente cómo afecta la rehabilitación de los canales los cambios en la productividad de los viñedos a corto y largo plazo (Arkhangelsky et al., 2021). Al identificar tendencias en el NDVI de alta resolución antes y después de la intervención, pretendemos arrojar luz sobre la dinámica de la disponibilidad de agua en la viticultura semiárida e identificar cuándo y cómo los canales rehabilitados se traducen en ganancias medibles para los productores locales.

Los resultados sugieren que la rehabilitación de los canales de riego generó mejoras significativas y sostenidas en la productividad de los viñedos. Utilizando el NDVI como proxy objetivo, estimamos un aumento promedio del vigor vegetativo de 2,3-2,7% en las parcelas tratadas en comparación con las del grupo de control, con ganancias máximas de hasta el 5,7% cinco años después de la intervención. Estos resultados coinciden con los obtenidos en las encuestas, que muestran aumentos en la producción de hasta el 53%, una mayor superficie de riego y una reducción de 20-28% en la probabilidad de pérdidas de rendimiento por problemas de riego. Las conclusiones son robustas en todas las estrategias de identificación alternativas, como el PSM, la ponderación de probabilidad inversa y el modelo estándar de diferencias en diferencias, y se validan mediante pruebas de placebo y falsificación. En conjunto, la evidencia demuestra que las inversiones focalizadas en infraestructura de riego pueden aumentar significativamente la productividad de los sistemas de viticultura en contextos semiáridos, con implicaciones en la competitividad agrícola, la resiliencia climática y las políticas de desarrollo rural.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se analiza la literatura empírica y se presenta el marco conceptual que guía el análisis. En la sección 3 se presentan los antecedentes del programa PROSAP III y su implementación en San Juan. En la sección 4 se describen las fuentes de datos empleadas en el estudio, que incluyen datos de encuestas y de teledetección. En la sección 5 se esboza la estrategia empírica, incluidos los métodos de identificación empleados. En la sección 6 se analizan los principales resultados y los chequeos de robustez y la sección 7 contiene las conclusiones.

2. Literatura empírica y marco conceptual

En la literatura empírica se observa un claro nexo entre la presencia de infraestructura rural y una mayor productividad, así como entre invertir en bienes públicos (como riego, caminos y acceso a fuentes de energía) y mayores índices de rentabilidad, en comparación con invertir en bienes rurales privados. En el caso de los caminos rurales, van de Walle y Cratty (2002) y Khandker et al. (2008) utilizan métodos cuasi experimentales para determinar que mejorar la infraestructura de transporte rural en Vietnam y Bangladesh, respectivamente, reduce significativamente el tiempo y costo de transporte, sobre todo entre los más pobres de la región. Según otros estudios, como los de Escobal y Ponce (2002) en Perú, Lokshin y Yemtsov (2005) en Georgia, y Mu y van de Walle (2008) en Vietnam, mejorar los caminos rurales tiene efectos positivos en el empleo y los salarios. Binswanger et al. (1993) en un estudio en India, Levy (1996) en Marruecos, y Khandker et al. (2009) en Bangladesh también identifican un efecto directo en la producción agrícola, como un mayor uso de fertilizantes químicos, el uso de nuevas

tecnologías e insumos, y un menor costo de los insumos agrícolas. En el caso de la electrificación rural, se aplicaron métodos econométricos igualmente rigurosos para destacar el efecto positivo en los ingresos de los hogares (Khandker et al., 2009), el empleo (Dinkelman, 2011) y la productividad (Lipscomb et al., 2013).

El riego desempeña un papel fundamental en la productividad agrícola, sobre todo en las regiones con escasez de agua. Brindar un suministro fiable de agua permite cultivar en zonas semiáridas y áridas que, de lo contrario, serían improductivas (Rosegrant et al., 2009). A nivel mundial, las tierras bajo riego representan solo el 16% del total de tierras de cultivo, pero producen un 36% de la cosecha mundial (FAO, 2021). Estas diferencias de productividad se deben a que el riego mitiga el estrés hídrico y mejora directamente el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Hussain y Hanjra, 2004).

Un marco económico estándar presenta el agua como un insumo crítico que permite aumentar la producción al compensar las limitaciones de humedad (Saleth y Dinar, 2004). Otra alternativa, en el marco de la función productiva, es considerar el riego como medida de control de daños, dado que el rendimiento se ve reducido por la falta de lluvia y el riego ayuda a suplir ese déficit (Lichtenberg y Zilberman, 1986). Cuando los agricultores disponen de un suministro de agua estable, suelen invertir en otros insumos, como fertilizantes, semillas mejoradas y maquinaria agrícola. Adeoti et al. (2007), por ejemplo, muestran que los pequeños agricultores ghaneses que adoptaron bombas de pedal económicas posteriormente comenzaron a usar más insumos complementarios. Del mismo modo, Aseyehgn et al. (2012) confirman que los agricultores etíopes con acceso a riego local muestran una mayor disposición a usar semillas híbridas y fertilizantes, y concluyen que el suministro de agua estable reduce el riesgo de malas cosechas y permite que estas inversiones sean más rentables. De igual manera, Duflo y Pande (2007) observan que, históricamente, en las regiones de la India regadas por canales se vieron mayores tasas de adopción de prácticas agrícolas modernas que en las zonas puramente de secano.

Los aportes del riego al aumento del rendimiento y los beneficios agrícolas están bien documentados en distintos contextos, en países tanto desarrollados como en desarrollo. En España, modernizar la infraestructura de riego en el valle del Ebro mejoró significativamente la productividad y la eficiencia en el uso del agua, con notables aumentos de rendimiento en los cultivos de maíz y frutales (Berbel y Mateos, 2013). En Ghana, la adopción de bombas de pedal permitió a los agricultores tener cultivos rentables en la estación seca, lo que contribuyó a aumentar los ingresos familiares (Adeoti et al., 2007). Dillon (2011) presenta ganancias de rentabilidad similares entre los regantes en pequeña escala de África Occidental. El enfoque de las plataformas de concertación de Ecuador, en las que las organizaciones de agricultores manejan el riego local de manera conjunta, produjo grandes mejoras en la productividad al facilitar la adquisición colectiva de insumos y la distribución equitativa del recurso hídrico (Cavatassi et al., 2011).

La viticultura (producción de uva para vino) presenta un contexto especializado en el que el riego puede incidir tanto en el rendimiento como en la calidad de la uva. En zonas semiáridas, como el centro de Chile y el oeste de Argentina, el riego es esencial para desarrollar y mantener viñedos productivos (Feres y Evans, 2006; Jara et al., 2017). En la provincia argentina de Mendoza, una antigua red de canales de riego permite el cultivo de la vid a gran escala a pesar de las

escasas precipitaciones (Agosta et al., 2012). Del mismo modo, los sistemas de riego de Chile constituyen la base de la expansión del país como importante exportador de vino, aunque la escasez de agua y la competencia de otros cultivos de alto valor plantean retos constantes (Hall et al., 2011).

Si bien esta evidencia empírica constata el efecto positivo de la infraestructura rural en general, y del riego en particular, en la producción y productividad agrícolas existe una marcada carencia de estudios rigurosos sobre dichos proyectos en el contexto latinoamericano y, en especial, en Argentina. A pesar de que en Argentina el Estado financió los proyectos de infraestructura rural mediante la serie de programas del PROSAP durante casi dos décadas, hasta ahora en la mayoría de las evaluaciones se emplearon métodos cualitativos y cuantitativos que no permiten hacer inferencias causales. Solo unos pocos estudios analizaron las intervenciones financiadas por el PROSAP con métodos cuasi experimentales: mediante una metodología de diferencias en diferencias, Gibbons et al. (2016) evaluaron el impacto de un proyecto de infraestructura de riego implementado en la segunda fase del PROSAP y encontraron efectos positivos significativos en la producción (16%) y el rendimiento (14%). Otros dos estudios que evaluaron las mejoras financiadas por el PROSAP en los sistemas de riego y drenaje en 2013 y 2016 sistemáticamente detectaron efectos positivos en la productividad utilizando estimaciones de diferencias en diferencias (Rossi, 2013; Rossi, 2016).

La expansión de la teledetección por satélite mejoró significativamente la manera de medir el impacto del riego. Antes, las evaluaciones dependían mayormente de encuestas a productores, que pueden llevar mucho tiempo y suelen contener imprecisiones (Sun et al., 2017). La teledetección brinda indicadores espaciales continuos y de alta frecuencia de la salud de la vegetación. Índices como el NDVI captan las discrepancias entre la reflectancia en la banda roja y la reflectancia en el infrarrojo cercano, lo que los convierte en un proxy robusto del vigor de los cultivos y la acumulación de biomasa (Lillesand y Keifer, 2002).

Las series temporales de teledetección, en particular el índice NDVI, constituyen una valiosa herramienta para evaluar el impacto de las intervenciones agrícolas en el rendimiento de los cultivos y la dinámica de la vegetación. Por ejemplo, Damania et al. (2019) documentan “tendencias de reverdecimiento” en el Sahel, donde las inversiones en riego ampliaron la cubierta vegetal en la estación seca. En América Latina, Salazar et al. (2021) encuentran una mayor productividad, según el NDVI, entre los agricultores dominicanos que obtuvieron acceso a una mejor irrigación, lo que sugiere que la teledetección permite evaluar de manera fiable la agricultura a gran escala. Del mismo modo, Schling y Pazos (2022) utilizan el NDVI para vincular cambios en el rendimiento a un programa de subsidios en Argentina, lo que demuestra que la teledetección puede captar aumentos graduales en la productividad a lo largo del tiempo. (Schling y Pazos 2022).

En conjunto, estas conclusiones constituyen un marco conceptual en el que intervienen la infraestructura física, las decisiones del agricultor y la fisiología del viñedo para influir en los resultados de la viticultura, que se pueden captar en los datos de teledetección. La mejora de los canales o de los sistemas de riego por goteo reduce las filtraciones y mejora la programación del riego (Lichtenberg y Zilberman, 1986; Saleth y Dinar, 2004). Al tener un suministro de agua más fiable, los agricultores pueden adoptar métodos avanzados, ampliar la superficie plantada o

invertir en insumos como fertilizantes o variedades de alto rendimiento (Cavatassi et al., 2011). Estas decisiones, a su vez, afectan a la viticultura: tener un suelo con suficiente humedad en las fases cruciales permite obtener un mayor rendimiento y, con un riego deficitario cuidadosamente gestionado, mejores perfiles aromáticos y de sabor (Chaves et al., 2010).

Los indicadores de teledetección, en particular el NDVI, son una manera objetiva de hacer un seguimiento de estos cambios en el vigor de la vid y evaluar si la rehabilitación de los canales y las nuevas prácticas empleadas en finca están verdaderamente contribuyendo a mejorar la productividad (Sun et al., 2017). Con el tiempo, la mejora del riego puede aumentar la resiliencia de los agricultores frente a fenómenos meteorológicos extremos, aunque es esencial contar con instituciones eficaces para evitar el agotamiento de los recursos o la asignación desigual del recurso hídrico (Ward y Pulido-Velázquez, 2008). En este sentido, el riego no es simplemente un insumo agrícola, sino un sistema sociotécnico, moldeado por la gobernanza local, el compromiso de los agricultores y las limitaciones biofísicas. La viticultura es un ejemplo de esta dinámica, dado que el rendimiento de los cultivos, la calidad de la fruta y la sostenibilidad medioambiental dependen de la gestión precisa del agua en climas áridos (Hall et al., 2011).

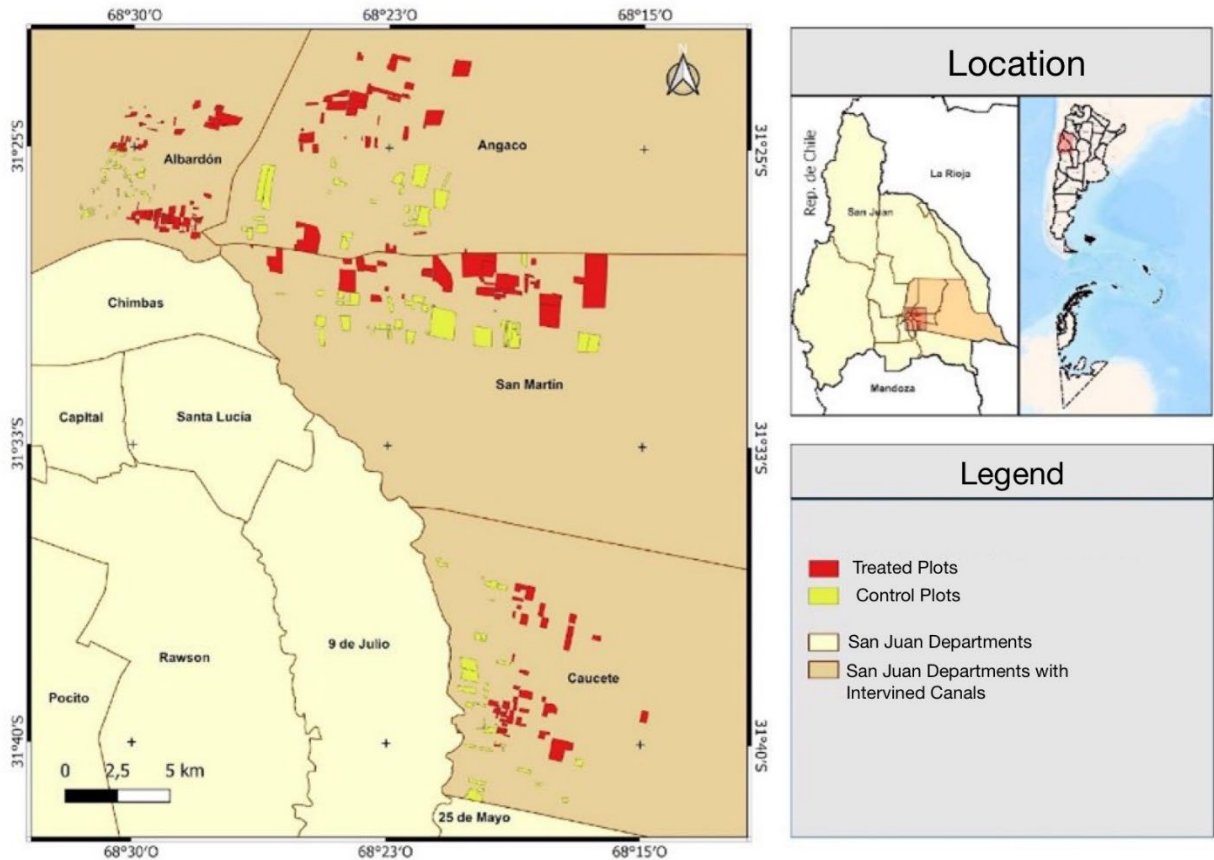
3. PROSAP III

En general, el sector agrícola de Argentina, con excepción de la Llanura Pampeana, sufre importantes limitaciones por la falta de infraestructura rural, lo cual reduce significativamente la productividad y la competitividad. Si bien Argentina goza de reconocimiento mundial como importante exportador agrícola, con una fuerte ventaja comparativa en los productos de la Pampa Húmeda, sumamente productiva, las regiones fuera de esta zona medular están bastante rezagadas. Estas regiones, caracterizadas por un clima árido o semiárido⁵, necesitan infraestructura de riego fiables para lograr una producción agrícola sostenible, especialmente en cultivos de alto valor como la uva.

Para atender estas limitaciones, desde 1996 el Programa de servicios agrícolas provinciales es el principal instrumento para acompañar el desarrollo rural en Argentina. La Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, con financiamiento parcial del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), implementó la tercera fase de este programa: el PROSAP III. Dicho programa, ejecutado entre 2011 y 2017, pretendía mejorar la competitividad y la productividad de las economías agrícolas regionales con mejoras específicas de infraestructura y apoyo técnico. Entre sus componentes clave, el PROSAP III priorizó la rehabilitación y modernización de los canales de riego, lo cual benefició en especial a los viticultores de pequeña y mediana escala en las regiones de Mendoza y San Juan. La Figura 1 ilustra la zona de intervención.

⁵ La Figura A2 del apéndice muestra las precipitaciones acumuladas de la zona.

Figura 1: Zona de intervención



Fuente: UNTREF (2024)

El componente de riego del PROSAP III supuso importantes inversiones en infraestructura que permitieron rehabilitar y modernizar los sistemas de riego que abarcaban más de 58.000 hectáreas, con el consiguiente beneficio directo a más de 5.000 agricultores. En concreto, gracias al proyecto se modernizaron los canales para mejorar la eficiencia en la conducción del agua, con lo que se logró una reducción significativa de la pérdida de agua y un aumento de la disponibilidad y fiabilidad del agua de riego durante toda la temporada agrícola. Además, las inversiones permitieron realizar mejoras críticas a la capacidad operativa, como mejores sistemas de control y mecanismos de gobernanza dentro de las asociaciones de usuarios de agua, esenciales para la gestión sostenible del sistema.

Entre los proyectos de riego financiados y ejecutados en el PROSAP III figuraba uno titulado "Desarrollo Agrícola y Gestión del Área Bajo Riego del Canal del Norte y 25 de Mayo" en la provincia de San Juan, en la región centro-oeste de Argentina. La zona del proyecto se situaba en el valle de Tulúm, en la margen izquierda del río San Juan, y abarcaba los departamentos de Albardón, Angaco, San Martín, Caucete y 25 de Mayo. El proyecto se centraba en 9 sistemas de

canales e incluía obras de impermeabilización⁶, reparación de canales y adaptación de compuertas y puentes que abarcaban 25.177 hectáreas con derechos de riego, el 62% de las cuales estaban cultivadas. El proyecto tuvo como objetivo aumentar la disponibilidad de agua en canales mediante la impermeabilización, el entubado y la reparación de canales, y mejorar el uso de los recursos hídricos a nivel de parcela mediante la reducción del déficit de evapotranspiración.

Además, el proyecto proporcionó planes de distribución, mantenimiento de equipos y herramientas, y nuevos sistemas de información y control. Asimismo, se implementó asistencia técnica para mejorar la gestión y la aplicación del agua entre los agricultores, mediante la creación de áreas de demostración y parcelas piloto de demostración en 4 de los 9 canales tratados, lo que benefició a más de 300 agricultores beneficiarios y sus trabajadores agrícolas. Estas actividades incluyeron orientación sobre cómo incorporar nuevas tecnologías de riego a nivel de finca para diferentes tipos de cultivos, el uso de sistemas de riego presurizado, la gestión de drenajes de campo y la recuperación de suelos salinizados, entre otros temas. Estas actividades contaron con el apoyo de agentes locales del instituto nacional de investigación y extensión, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), para garantizar el uso de las prácticas de producción modernas y adecuadas. Según los documentos del proyecto, más de 1.200 agricultores de la zona se beneficiaron de estas mejoras, que se implementaron simultáneamente en todos los canales entre diciembre de 2013 y noviembre de 2014.

Los acuerdos institucionales que rigen la rehabilitación de canales y la gestión del riego en la provincia de San Juan se caracterizan por una estructura de gobernanza multinivel que busca equilibrar la supervisión estatal con la participación de los usuarios. El Departamento de Hidráulica de San Juan (DH), organismo público autónomo a nivel provincial, tiene la autoridad legal sobre la gestión de las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo la operación, el mantenimiento y la planificación de la infraestructura de riego.

El Consejo, como órgano rector del DH, está compuesto por representantes elegidos por los usuarios del agua junto con personal técnico designado por el gobierno provincial, para garantizar la representación de los usuarios en decisiones clave como la elaboración de presupuestos, la fijación de tarifas de riego y la aprobación de obras de mantenimiento. A nivel departamental, las Juntas de Riego descentralizadas están compuestas por regantes electos en cada departamento, mientras que las Comisiones de Regantes operan de manera similar para cada canal o grupo de canales que sirvan más de 300 hectáreas. Estos organismos son responsables de la planificación operativa, la coordinación del mantenimiento y la resolución de conflictos a nivel local. Cada Junta de Riego planifica y supervisa las operaciones de riego y drenaje de su departamento, mientras que las Comisiones se encargan de tareas cotidianas como la supervisión del uso del agua y la correcta distribución. Sin embargo, el documento de diseño del proyecto identificó varias deficiencias en la capacidad institucional de estas organizaciones, como la falta de

⁶ Específicamente, el proyecto financió las siguientes obras de infraestructura: revestimiento de 3.360 metros de canales de tierra, encamisado de 12.580 metros de canales con revestimiento precario, reconstrucción y reparación de 6.850 metros de canal, sustitución de 5 compuertas y sus mecanismos de accionamiento, reconstrucción de 1 puente, limpieza de 10 hectáreas de superficie de las riberas y accesos a las obras, rehabilitación de 1.500 metros de caminos de servicio.

recursos para el mantenimiento, un insuficiente control del uso del turno de riego, y deficiencias en la capacidad técnica y el monitoreo de la infraestructura (PROSAP-IICA, 2011). Por lo tanto, el proyecto propuso brindar a las 5 Juntas de Riego y a las 8 Comisiones de Canales beneficiarias actividades de desarrollo de capacidades para mejorar la gestión técnica y administrativa y garantizar la sostenibilidad de la infraestructura de riego mejorada.

4. Descripción de los datos

a. Selección de muestras

Utilizamos los datos de la encuesta final que se habían recopilado como parte de la evaluación *a posteriori* de los proyectos de riego del PROSAP III en cuatro departamentos de la provincia de San Juan. La encuesta, realizada en diciembre de 2023, fue diseñada para captar la producción agrícola y las condiciones socioeconómicas de los viticultores de la región durante el ciclo agrícola 2022-2023. El cuestionario constaba de distintos módulos que incluían, entre otros, la geolocalización de las fincas, insumos y prácticas productivas, métodos de riego y rendimiento de los cultivos.

Para la evaluación de impacto, el grupo de tratamiento estaba compuesto por cuatro canales rehabilitados, cada uno situado en un departamento diferente, y una muestra de los beneficiarios. En concreto, los cuatro canales tratados que se escogieron para la evaluación fueron: Canal Segundo en el departamento de Caucete, Canal Zapata en Angaco, Canal Tercero en San Martín, y Canal Centro-Norte y General Cañada en Albardón. Estos canales fueron priorizados para evaluación debido a que representaron el 70% de la inversión total del proyecto de rehabilitación y fueron además sitios de asistencia técnica complementaria a través de la implementación de áreas demostrativas y pilotos, permitiendo así medir el efecto de brindar infraestructura de riego y asistencia técnica en conjunto.

Para construir un contrafactual creíble, el grupo de control se extrajo de los productores que dependían de cuatro canales no rehabilitados situados en los mismos departamentos respectivos: Canal Primero (Caucete), Canal Plumerillo-Bosque (Angaco), Canal Laprida (San Martín) y Canal Campo Afuera (Albardón). Estos canales se escogieron en coordinación con la oficina provincial y el Departamento de Hidráulica de San Juan, a partir de evaluaciones de campo detalladas. Los canales de control se eligieron para garantizar la comparabilidad de las características físicas (grado de deterioro, suministro hídrico), las condiciones agroecológicas y los perfiles de los agricultores. Encontrar sitios tratados y de control similares dentro del mismo departamento administrativo también ayudó a minimizar el sesgo de confusión por choques regionales no observados o intervenciones simultáneas.

Cabe señalar que los canales que se iban a rehabilitar se escogieron mayormente por limitaciones financieras y operativas, más que por el rendimiento. Esto reduce las preocupaciones en torno a la ubicación endógena del programa y sustenta la credibilidad de la estrategia de identificación. La Figura 2 muestra una representación espacial de las zonas tratadas y de control, así como de la infraestructura de riego.

Tabla 1: Distribución de la muestra por departamento

	<i>Tratamiento</i>	<i>Control</i>	<i>Total</i>
<i>Albardón</i>	52	27	79
<i>Caucete</i>	49	38	87
<i>Angaco</i>	36	17	53
<i>San Martín</i>	43	37	80
<i>Total</i>	180	119	299

Cabe señalar que esta estrategia de identificación implica que el estimador de interés será el Efecto Promedio del Tratamiento sobre los Tratados (ATET). Dada la naturaleza de la intervención, los agricultores ubicados a lo largo de los canales tratados no pudieron ser asignados aleatoriamente, y de hecho podrían estar ubicados allí debido a factores geográficos, económicos o agronómicos subyacentes que se correlacionan con variables de resultado. Si bien esto limita la posibilidad de extrapolar los efectos estimados a la población general, como habría sido posible con el estimador del Efecto Promedio del Tratamiento (ATE), sostenemos que el estimador más relevante para las políticas es el ATET: la inversión pública en infraestructura productiva suele dirigirse a áreas específicas con base en los mismos factores geográficos, económicos o agronómicos que pueden motivar a los agricultores a autoseleccionarse para ciertos canales, y por lo tanto, es interesante comprender cuál es el impacto en los beneficiarios reales de dichas intervenciones, a fin de fundamentar la continuación, la mejora o la ampliación del programa. Por lo tanto, consideramos que el ATET es el estimador más creíble y relevante para las políticas en esta evaluación.

b. Datos de la encuesta

Como se ve en la Tabla 2, las características sociodemográficas de los encuestados de los grupos de tratamiento y de control son muy similares. La muestra es predominantemente masculina (solo un 13% de los encuestados se identifican como mujer en cada grupo). La edad media es de 57 años en el grupo de tratamiento y de 59 años en el grupo de control. Una proporción ligeramente superior de encuestados del grupo de control (68%) tiene al menos educación secundaria completa, en comparación con el 61% del grupo de tratamiento. En cuanto a la residencia, el 44% de los productores del grupo de tratamiento vive en sus fincas, mientras que este porcentaje es del 37% en el grupo de control. Los patrones de tenencia de propiedad también difieren: el 84% de los encuestados del grupo de control se identifican como propietarios, frente al 71% del grupo de tratamiento. Solo una pequeña parte de ambos grupos son inquilinos o administradores, y aproximadamente el 22% de cada grupo posee también otras fincas.

Como muestra la Tabla 3, las tierras agrícolas del grupo de tratamiento son más grandes que las del grupo de control: la superficie promedio de las fincas es de 17,75 hectáreas en el grupo de tratamiento y de 12,33 hectáreas en el grupo de control. En ambos grupos, la inmensa mayoría de los productores (más del 85%) cultivan únicamente uvas con uso mínimo de maquinaria agrícola. Los productores del grupo de control contrataron más mano de obra (3,14 trabajadores) que los del grupo de tratamiento (2,53 trabajadores). Cabe destacar que el 37% de los

productores del grupo de control declaran recibir asistencia técnica, mientras que solo lo hace el 17% del grupo de tratamiento. La pertenencia a una asociación de productores también es más frecuente en el grupo de control (7%) que en el de tratamiento (1%).

Tabla 2: Características sociodemográficas

	Tratamiento		Control	
	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>
Mujer	0,13	0,33	0,13	0,33
Edad	56,66	13,10	58,52	13,01
Educación secundaria	0,61	0,49	0,68	0,47
Reside en la finca	0,44	0,50	0,37	0,48
Propietario	0,71	0,46	0,84	0,37
Inquilino	0,01	0,07	0,00	0,00
Administrador	0,22	0,41	0,11	0,31
Posee otras fincas	0,22	0,42	0,22	0,41
N	180		119	

En cuanto a las características productivas, tanto la superficie cosechada como el rendimiento de la uva son algo mayores en el grupo de tratamiento. En promedio, las fincas del grupo de tratamiento declaran haber cosechado 10,20 ha en el ciclo anterior (frente a 6,34 ha en el grupo de control) y 9,83 ha en el ciclo actual (frente a 5,98 ha). Los rendimientos medios son de 16,97 t/ha en el grupo de tratamiento y 15,45 t/ha en el grupo de control.

Tabla 3: Fincas y características productivas

	Tratamiento		Control	
	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>
Superficie total (ha)	17,75	33,21	12,33	20,03
Cultiva exclusivamente uvas (%)	0,88	0,33	0,85	0,36
Cosecha con maquinaria (%)	0,04	0,19	0,03	0,18
N asalariados	2,53	2,34	3,14	2,28
Recibió asistencia técnica (%)	0,17	0,37	0,37	0,48
Tiene acuerdos comerciales (%)	0,89	0,32	0,92	0,28
Pertenece a alguna asociación de productores (%)	0,01	0,11	0,07	0,25
Superficie cosechada último ciclo (ha)	10,20	25,66	6,34	7,74
Superficie cosechada ciclo actual (ha)	9,83	24,93	5,98	6,90
Superficie de uva cosechada (ha)	8,04	17,16	5,03	5,84
Producción total de uva (toneladas métricas)	101,89	128,70	83,30	124,79
Rendimiento (t/ha)	16,97	13,58	15,45	11,90
N	180		119	

La Tabla 4 contiene detalles sobre las prácticas de riego al final del proyecto. El grupo de tratamiento maneja una superficie media de riego mayor a la del grupo de control. El riego por inundación es el sistema predominante en ambos grupos (63% en el grupo de tratamiento y 52% en el grupo de control), mientras que el riego por bordes se emplea con más frecuencia en el grupo de control (27% frente a 10%). El riego por surcos se utiliza en porcentajes similares en ambos grupos (26% frente a 23%). El riego por goteo se emplea en el 13% de las fincas de tratamiento y en el 10% de las de control, mientras que ninguno de los dos grupos usa con frecuencia los sistemas de riego por manguera y por sifón.

Tabla 4: Características del riego

	Tratamiento		Control	
	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>
Superficie de tierra bajo riego (ha)	15,46	29,48	8,75	15,32
Superficie de tierra bajo riego efectivo (ha)	9,19	24,24	5,34	7,60
<i>Sistemas de riego:</i>				
Riego por inundación	0,63	0,48	0,52	0,50
Riego por bordes	0,10	0,30	0,27	0,45
Riego por surcos	0,26	0,44	0,23	0,42
Riego por manguera	0,01	0,11	0,03	0,16
Riego por sifón	0,01	0,07	0,00	0,00
Riego por goteo	0,13	0,34	0,10	0,30
N	180		119	

La Tabla 5 resume las pérdidas productivas autodeclaradas y las respectivas causas principales para los grupos de tratamiento y control. En general, el 54% de los productores del grupo de tratamiento declaró una producción inferior a la prevista, frente al 31% del grupo de control. Los problemas de riego fueron la causa más citada en ambos grupos (76% y 80%, respectivamente).

Tabla 5: Pérdidas productivas

	Tratamiento		Control	
	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>
El productor reporta una producción inferior a la prevista	0,54	0,50	0,31	0,46
<i>Motivos reportados</i>				
Problemas de lluvia	0,30	0,46	0,22	0,42
Problemas de riego	0,76	0,43	0,80	0,40
Problemas de saneamiento	0,07	0,26	0,10	0,30
Granizo	0,13	0,34	0,41	0,50
Bajas temperaturas	0,25	0,44	0,49	0,50
Maleza	0,02	0,15	0,01	0,11
Suelo	0,01	0,11	0,02	0,16
Problemas de fertilizantes	0,01	0,11	0,02	0,16
Otros	0,12	0,33	0,05	0,22
N	180		119	

4.2 Datos de teledetección

Para monitorear la dinámica temporal de las condiciones y el crecimiento de los cultivos por las mejoras en el riego, empleamos una serie temporal de datos de teledetección tomadas de imágenes obtenidas del Landsat 7 y Landsat 8 (2000-2023). Los datos de teledetección brindan mediciones objetivas, uniformes y costo-efectivas de la productividad agrícola, y permiten superar las limitaciones del método tradicional de encuestas, como posibles imprecisiones, sesgos en los datos reportados, altos costos y complejidades logísticas de las extensas encuestas de campo. Asimismo, la teledetección permite tener una alta frecuencia temporal con una amplia cobertura espacial, lo cual permite realizar un seguimiento constante y detectar con precisión los cambios en la salud de los cultivos. Se procesaron estas imágenes mensuales para extraer un conjunto de índices diseñados para detectar cambios en la salud de la vegetación, el contenido de humedad y la productividad general. Se siguió una serie de pasos rigurosos antes del procesamiento, como correcciones geométricas y atmosféricas, y nubosidad, para asegurar que las imágenes representaran con precisión la zona de estudio a lo largo del tiempo, lo cual permitió identificar patrones estacionales y tendencias a largo plazo en el rendimiento de los cultivos.

Para identificar con precisión las zonas agrícolas que se analizarían, se integraron los datos de teledetección de alta resolución con los límites detallados de las parcelas recogidos en el terreno. Los equipos de campo utilizaron la aplicación *Field Area Measure* en sus dispositivos móviles para registrar los límites de cada unidad productiva, y generaron archivos .kmz que captaban el contorno geométrico de los campos tal como los declaraban los productores. Estos archivos se importaron a un entorno GIS, donde, con exhaustivas correcciones topológicas, se ajustaron los límites de las parcelas para aislar solo las partes cultivadas. Tras este proceso se registraron 213 parcelas georreferenciadas para el grupo de tratamiento y 141 para el grupo de control.

4.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada

La productividad de los viñedos se mide con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), un proxy ampliamente utilizado en la producción agrícola para cuantificar la densidad y salud de la vegetación (Alface et al., 2019; Sun et al., 2017) que se calcula a partir de imágenes satelitales tomadas a lo largo de 20 años. Esta extensa cobertura temporal presenta una ventaja única dado que permite rastrear las tendencias de productividad a largo plazo, distinguir entre cambios estructurales y fluctuaciones a corto plazo, así como fijar un punto de referencia más fiable antes de la intervención. Además, el NDVI ofrece observaciones objetivas de alta frecuencia que mitigan los sesgos comunes de los datos autorreportados (Adhikary et al., 2022) y permite captar el crecimiento de la heterogeneidad espacial, lo que permite evaluar con mayor precisión las intervenciones focalizadas (García-Pedrero et al., 2018).

Aunque el uso del NDVI podría tener algunas limitaciones de interpretación, cabe mencionar que este se ha utilizado en viticultura, mostrando fuertes correlaciones con parámetros que impulsan la productividad. Estudios han demostrado que el NDVI sigue de cerca la dinámica del crecimiento de la vid; Sun et al. (2017) utilizaron imágenes del Landsat para establecer una correlación positiva directa entre el NDVI diario y el rendimiento final de la uva. Esta relación se extiende a otras características; por ejemplo, Kasimati et al. (2021) demostraron una fuerte

correlación positiva entre el NDVI y el azúcar de la uva. En particular, Lyu et al. (2023) identificaron una correlación negativa y significativa entre el NDVI y el contenido de azúcar, lo que ilustra que el vigor excesivo puede ser perjudicial para la calidad de la uva. Otro estudio de Anastasiou et al. (2018) también encontró que durante la cosecha el NDVI se correlacionaba con otros atributos clave como el diámetro de la baya. Esta literatura confirma que el NDVI es una herramienta confiable para monitorear la productividad del viñedo al capturar variaciones tanto en la cantidad como en la calidad de la uva.

Además, superamos las posibles limitaciones del uso de datos de teledetección al integrar el NDVI con datos de encuestas a nivel de finca sobre la producción real. En este sentido, vamos más allá de las suposiciones y relacionamos empíricamente los datos satelitales con resultados económicos tangibles en nuestro contexto de productividad vitícola. Consideramos que este enfoque refuerza la interpretación causal de nuestros hallazgos y contribuye a la literatura que busca combinar la teledetección con datos de campo para evaluar de forma fiable las intervenciones agrícolas.

Dado esto, el NDVI puede expresarse como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

donde NIR representa el infrarrojo cercano, es decir la parte del espectro electromagnético entre 0,7 y 1,1 micrómetros aproximadamente, y RED se refiere a las longitudes de onda del rojo visible, normalmente entre 0,6 y 0,7 micrómetros. La vegetación sana refleja mucha luz en el infrarrojo cercano por la estructura interna de las hojas de las plantas y porque absorbe la luz roja para la fotosíntesis. Por ende, los valores más altos de NDVI suelen significar que la vegetación es más densa, sana y tiene un mayor potencial de rendimiento (Kinyanjui, 2011; Lillesand y Keifer, 2002; Bégué et al., 2018; Chivasa et al., 2017). La idoneidad del NDVI como proxy del rendimiento de los cultivos ha quedado demostrada en varios contextos de evaluación similares, como estudios de evaluación de intervenciones agrícolas en México (Ortiz-Monasterio y Lobell, 2007), Sudáfrica (Bellora et al., 2017), República Dominicana (Salazar et al., 2021) y Argentina (Schling y Pazos, 2022).

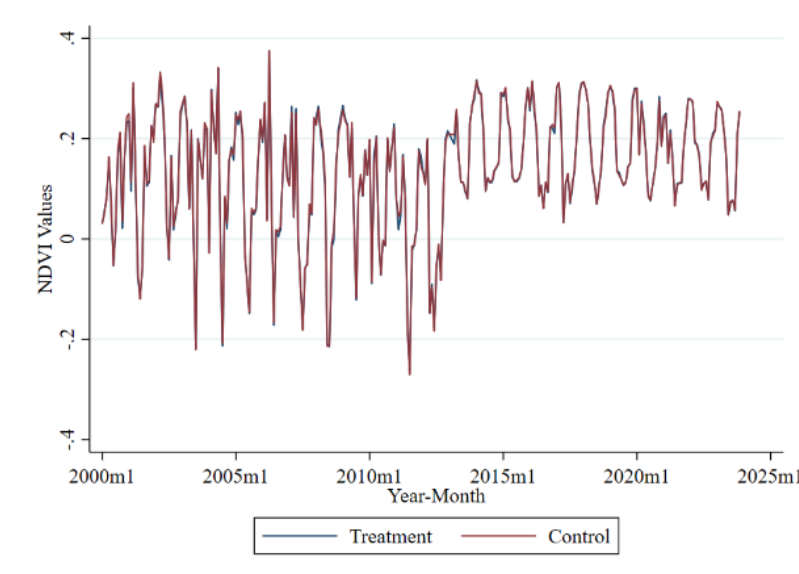
El NDVI se calculó a partir de una serie temporal de imágenes satelitales utilizando Landsat 7 Collection 2 Tier 1 (28 de mayo de 1999 a 19 de enero de 2024) y Landsat 8 Collection 2 Tier 1 (18 de marzo de 2013 a 16 de noviembre de 2024) en la plataforma Google Earth Engine. Para asegurar la comparabilidad entre las dos series, se aplicó un procedimiento de calibración cruzada para atenuar las diferencias en las características de los sensores⁸. Luego, se agregaron las imágenes satelitales para generar los valores mensuales promedio de NDVI para cada parcela, partiendo de los límites de las parcelas georreferenciadas y los ajustes posteriores realizados para delimitar con precisión cada superficie agrícola.

⁸ Para asegurar que hubiese uniformidad entre los sensores, los valores NDVI de Landsat 7 y 8 se normalizaron utilizando técnicas de calibración radiométrica, alineación espacial y ajuste de escala para tener en cuenta las diferencias en la resolución y el desempeño de los sensores, siguiendo las mejores prácticas para el seguimiento de la vegetación con multisensores descritas en Ezimand (2021).

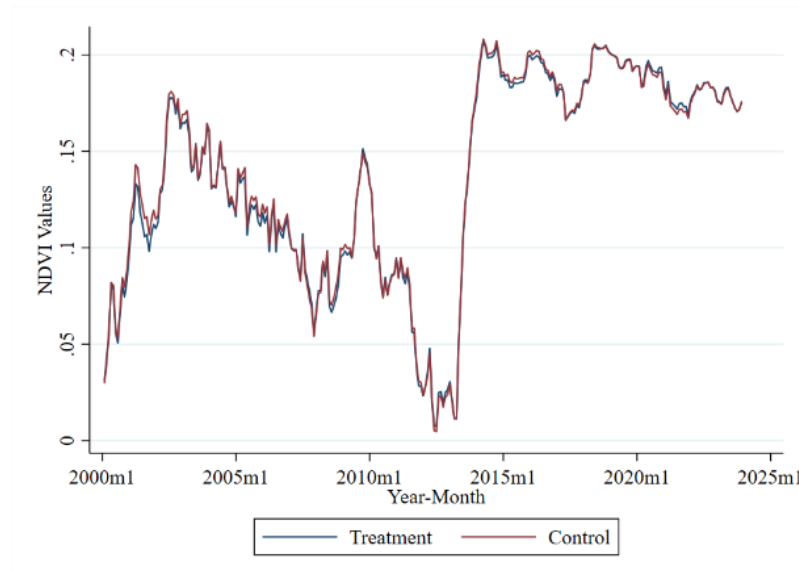
Dada la estacionalidad inherente al ciclo de vida de los cultivos, que se refleja directamente en los valores NDVI, se aplicó primero un promedio móvil de 12 meses para suavizar las fluctuaciones estacionales. Este paso ayuda a aislar la tendencia subyacente a largo plazo en la salud de la vegetación al eliminar las variaciones a corto plazo provocadas por los ciclos de crecimiento de los cultivos (Beckett, 2013). Luego, se calculó el promedio del año agrícola de las series suavizadas, donde por *año agrícola* se entiende el período de agosto a julio (Ricce et al., 2013). Este enfoque integrado capta tanto la evolución a largo plazo de la salud de la vegetación como los distintos patrones estacionales del cultivo, lo cual brinda un marco sólido para evaluar el impacto de las mejoras en el riego.

Figura 3: Serie NDVI

A. Datos brutos



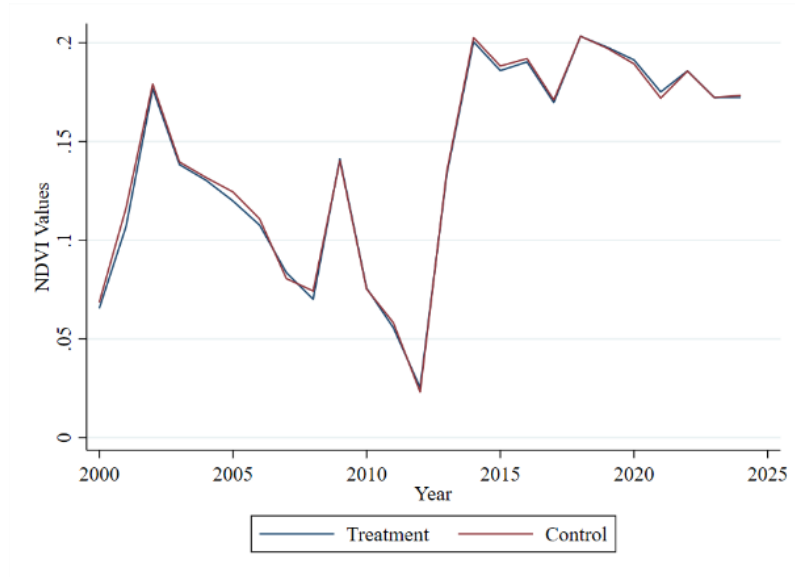
B. Tendencia



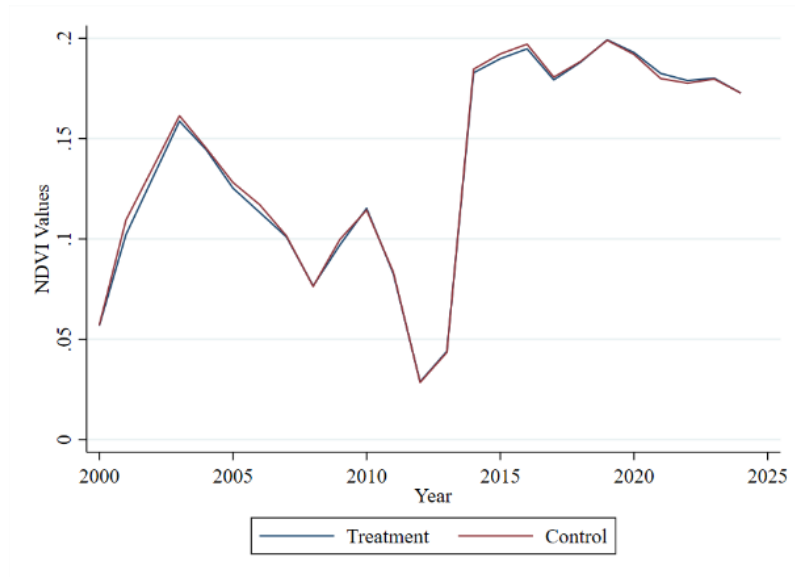
Notas: Las series se suavizan con el comando *tssmooth* de Stata.

La Figura 3 muestra las series mensuales de datos NDVI para los grupos de tratamiento y de control. El Panel A contiene la serie NDVI sin suavizar, que muestra pronunciadas fluctuaciones estacionales. El Panel B muestra la misma serie temporal de NDVI tras aplicar un promedio móvil de 12 meses para suavizar las variaciones estacionales a corto plazo. Este proceso refleja las tendencias más generales en la salud de la vegetación a lo largo del tiempo. A pesar de que se reduce el “ruido” estacional, se siguen observando las diferencias entre los grupos de tratamiento y de control en determinados periodos.

Figura 4: Series de NDVI agregadas por año agrícola
A. Datos brutos



B. Tendencia



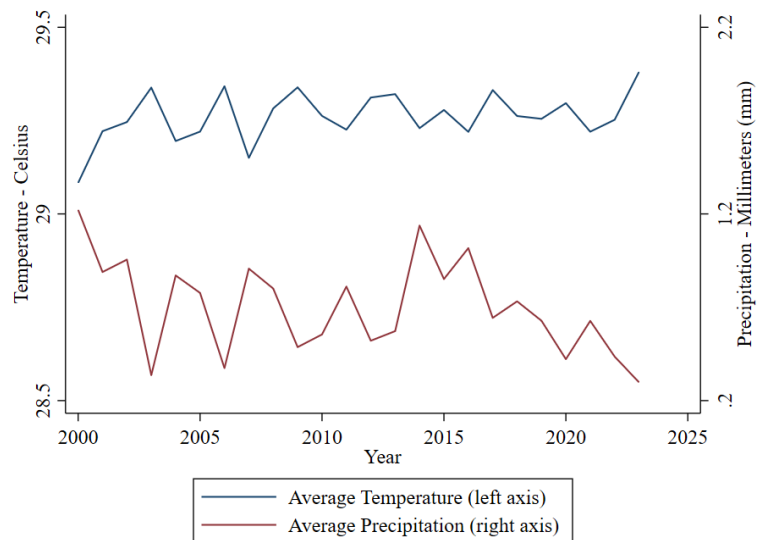
Notas: El año agrícola va de agosto a julio, según Ricce et al. (2013).

La Figura 4 presenta los valores promedio de NDVI del año agrícola para los grupos de tratamiento y de control. Al promediar los datos de NDVI a lo largo del ciclo agrícola, la figura capta los cambios subyacentes en el vigor de la vegetación sin dejar de reflejar la estacionalidad inherente a los cultivos. Es probable que los patrones observados reflejen tanto las condiciones climáticas como los cambios en las prácticas de manejo del viñedo a lo largo del tiempo. Cabe resaltar que las tendencias anuales tanto brutas como suavizadas muestran patrones similares para ambos grupos a lo largo de los 23 años.

Además del NDVI, nuestro análisis incorpora variables climáticas, concretamente datos de temperatura y precipitación, para reflejar la variabilidad meteorológica que puede afectar la productividad de los cultivos al margen de las mejoras en el riego. Los registros mensuales de temperatura y precipitación se obtuvieron del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) para el mismo período del estudio (2000-2023). Estos datos climáticos se sometieron a controles de calidad y se agregaron a nivel de parcela, lo que permitió tener una representación precisa de las condiciones climáticas locales para cada parcela georreferenciada.

La Figura 5 presenta las tendencias a largo plazo de estas variables climáticas desde 2000 hasta 2023. La temperatura promedio (°C), representada por la línea azul y sobre el eje y de la izquierda, fue aumentando gradualmente con el tiempo, lo que sugiere una tendencia al calentamiento en la región. Mientras tanto, las precipitaciones promedio (mm), representadas por la línea roja sobre el eje y de la derecha, fue disminuyendo de manera sostenida, con notables fluctuaciones de un año a otro. Es importante tener en cuenta estos cambios en las condiciones climáticas porque pueden afectar el rendimiento de los cultivos independientemente de las mejoras en el riego (Lobell y Field, 2007).

Figura 5: Tendencias de temperatura y precipitaciones



Fuente: Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF)

5. Estrategia empírica

En el estudio se evalúan los efectos causales de los sistemas de riego rehabilitados en el marco del programa PROSAP en la producción de los viñedos ubicados en la provincia argentina de San Juan. Un reto clave a la hora de establecer el impacto causal de programas como el PROSAP consiste en escoger un grupo de control adecuado, que permita la atribución causal del impacto estimado. Lo ideal sería que el grupo de control presentara características similares a las del grupo de tratamiento en los ámbitos geográfico, climático y socioeconómico para garantizar una comparación válida. En este estudio, el grupo de control se eligió en función de la similitud hidrológica con los canales tratados, así como de su ubicación en los mismos departamentos administrativos, lo que redujo el riesgo de diferencias sistemáticas que podrían sesgar las estimaciones de impacto. Una limitación importante de los datos aquí presentados es que los datos autorreportados, que abarcan tanto las variables de resultado como las covariables pertinentes, solo están disponibles en la encuesta final, lo cual impide emplear el modelo de diferencias en diferencias. Dada la ausencia de datos de línea de base y las diferencias observadas en determinadas características entre los grupos, se empleó el enfoque PSM (*propensity score matching*) para mejorar la comparabilidad y mitigar el posible sesgo de selección. Por ejemplo, los dos grupos difieren en acceso a asistencia técnica y participación en asociaciones de productores, lo que sugiere que el grupo de control puede haber tenido mejor acceso a servicios de apoyo y redes sociales que podrían haber incidido en los resultados de la producción independientemente de la intervención. Estas diferencias subrayan la necesidad de emparejar los grupos según las características observables para estimar con mayor precisión el impacto del proyecto. En concreto, se estimó la probabilidad de pertenecer al grupo de tratamiento en función de covariables observables como las características del productor y los atributos de la finca. Luego, se empleó ese puntaje de propensión para emparejar a los productores del grupo de tratamiento con productores similares del grupo de control, lo cual arrojó una submuestra emparejada con características observables más equilibradas.

Además del PSM, se empleó la ponderación de probabilidad inversa (IPW) para abordar el sesgo de autoselección y aprovechar la muestra completa. La IPW permite volver a ponderar cada observación por la inversa de su puntaje de propensión estimado. Para cada observación i , la ponderación se define como:

$$\omega_i = \frac{Treatment_i}{p(Treatment_i)} + \frac{1 - Treatment_i}{1 - p(Treatment_i)}$$

Este enfoque asigna una ponderación mayor a las unidades tratadas con puntajes de propensión más bajos y a las unidades de control con puntajes más altos, lo que permite construir un contrafactual con todos los datos disponibles. La naturaleza paramétrica de la IPW permite, además, estimar errores estándar en un marco de regresión, una ventaja destacada en la literatura (Rosenbaum, 1987; Hirano e Imbens, 2001; Cavatassi et al., 2011).

Al emplear tanto el PSM como la IPW, se asegura la robustez de la evaluación de los efectos del tratamiento. Aunque el PSM mejora la comparabilidad al seleccionar explícitamente una submuestra emparejada con características observables similares, también reduce el tamaño de la muestra y puede introducir ineficiencias. Por el contrario, la IPW aprovecha el conjunto de

datos en su totalidad al volver a ponderar las observaciones, y tener así un mayor poder estadístico y permite realizar la inferencia con regresión. Combinar estos métodos permite chequear la robustez de los resultados obtenidos y evaluar la coherencia de nuestras conclusiones con los distintos enfoques para tratar el sesgo de selección.

A pesar de las ventajas del PSM, otra limitación de este estudio es la selección no aleatoria de los canales, lo que puede introducir endogeneidad. Dado que los canales seleccionados y sus alrededores pueden diferir sistemáticamente de los que no se rehabilitaron, se corre el riesgo de que las estimaciones del efecto del programa estén sesgadas. Para abordar estas inquietudes y aprovechar los datos de teledetección disponibles, y los nuevos datos de alta frecuencia que abarcan un horizonte temporal prolongado, se empleó el modelo de diferencias en diferencias sintéticas (SDID) desarrollado por Arkhangelsky et al. (2021). Este enfoque, a diferencia de otras metodologías recientes diseñadas para contextos de adopción escalonada del tratamiento, como las propuestas por Callaway y Sant'Anna (2021) o Chaisemartin y D'Haultfoeuille (2020), nos permite mitigar aún más los desequilibrios iniciales al tiempo que aprovechamos datos innovadores para generar una estimación robusta del impacto del programa.

El SDID relaja el estricto supuesto de tendencias paralelas inherente a los métodos tradicionales de diferencias en diferencias (DiD) y combina características clave tanto del modelo DiD como del de control sintético. En concreto, pondera de manera óptima las unidades de control y los períodos anteriores al tratamiento y construye un contrafactual creíble para las unidades tratadas. En este sentido, la metodología hace menos restrictivo el supuesto estricto de tendencias paralelas, al suponer que sólo se mantiene tras ajustar las diferencias en la tendencia previa al tratamiento mediante las ponderaciones. Este enfoque reduce el sesgo cuando las características de línea de base difieren entre los grupos de tratamiento y de control y, por tanto, mejora la validez de las estimaciones causales.

Matemáticamente, el efecto medio del tratamiento en la $\hat{\tau}$ tratada se obtiene minimizando la distancia al cuadrado entre los resultados observados del grupo de tratamiento y una combinación ponderada de unidades de control a lo largo del tiempo:

$$\hat{\tau} = \underset{\tau, \mu, \alpha, \beta}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (Y_{it} - \mu - \alpha_i - \beta_t - D_{it}\tau)^2 \widehat{\omega}_i \widehat{v}_t \right\}$$

donde $\widehat{\omega}_i$ (ponderaciones de unidad) y \widehat{v}_t (ponderaciones de tiempo) se limitan a ser no negativas y a sumar uno. Estas ponderaciones alinean las características previas al tratamiento de las unidades tratadas con las de las unidades de control, lo que asegura que las diferencias posteriores al tratamiento en los resultados puedan atribuirse con mayor confianza a la propia intervención (Clarke et al., 2023). Para más detalles sobre el procedimiento de ponderación, véase Arkhangelsky et al. (2021).

En el análisis se utiliza un panel equilibrado de N productores observados a lo largo de T años, de 2001 a 2023. Los datos de NDVI se obtienen mensualmente a partir de imágenes satelitales y se los agrega a medias anuales para que coincidan con el calendario agrícola. También se incluyen los datos anuales de precipitación y temperatura para contemplar las variaciones climáticas en la productividad de los viñedos. El período de tratamiento se define de 2016 a 2023

(2016 es el primer año agrícola en el que los canales rehabilitados estaban en funcionamiento). La variable binaria de tratamiento D_{it} toma el valor de 1 si el productor i en el año t recibe tratamiento. Los errores estándar se agrupan por canal para tener en cuenta los choques compartidos entre los productores que dependen del mismo canal.

En el SDID, nuestro modelo puede representarse de la siguiente manera:

$$Y_{it} = \mu + \alpha_i + \beta_t + D_{it}\hat{\tau} + \varepsilon_{it}$$

Donde:

- Y_{it} es el resultado de interés (por ejemplo, NDVI promedio),
- α_i son los efectos fijos del productor (que reflejan las diferencias temporales entre productores),
- β_t son los efectos fijos anuales (que tienen en cuenta los choques comunes que afectan a todos los productores en un año agrícola determinado),
- D_{it} es el indicador de tratamiento, y
- ε_{it} es el término de error.

Luego, el algoritmo SDID elige de manera óptima las ponderaciones de unidad y de tiempo, de modo que el resultado promedio ponderado de las unidades de control en el período anterior al tratamiento se aproxime lo más posible al de las unidades tratadas.

5.1 Chequeos de robustez y validez

Si bien en el modelo SDID se relaja el estricto supuesto de tendencias paralelas, obligatorio en el modelo de diferencias en diferencias (DiD) tradicional, al sustituirlo por un supuesto de tendencias paralelas condicionadas a la ponderación, se sigue exigiendo que no haya covariables no observadas que afecten diferencialmente al grupo de tratamiento después de la intervención. Para evaluar la validez de la estrategia de identificación empleada y la robustez de los resultados, realizamos una serie de pruebas complementarias, cada una de ellas basada en las mejores prácticas de la literatura sobre inferencia causal.

En primer lugar, realizamos una prueba placebo aplicando el modelo SDID únicamente a los períodos anteriores al tratamiento y le asignamos una fecha de tratamiento falsa, anterior a la intervención real. Esta prueba, habitual cuando se aplica el modelo DiD (Bertrand et al., 2004; Abadie et al., 2010), asegura que nuestra metodología no detecte un efecto falso ante la ausencia de una intervención real.

En segundo lugar, realizamos una prueba de falsificación examinando los resultados que no deberían verse afectados por la rehabilitación del canal. Esta prueba ayuda a detectar si hay covariables no observadas que podrían estar sesgando nuestros resultados (Rosenbaum, 2002).

En tercer lugar, para verificar la robustez de nuestras estimaciones, las cotejamos con medidas alternativas del NDVI, comparando los resultados derivados del NDVI promedio con los que utilizan el NDVI máximo. El NDVI máximo capta el máximo vigor vegetativo durante la temporada de crecimiento y se suele utilizar en la teledetección agrícola como proxy del rendimiento óptimo

de los cultivos (Lobell et al., 2015; Lykhovyd et al., 2022). Obtener resultados uniformes con ambos indicadores refuerza la confianza de que los efectos estimados no dependen de cómo definimos la medición de los resultados.

Por último, reproducimos el análisis utilizando un modelo DiD de estudio de eventos más tradicional⁹ para evaluar la fiabilidad de nuestras estimaciones en relación con el procedimiento de ponderación del SDID y si nuestros resultados dependen del modelo (Clarke et al., 2023).

También cabe destacar la posible preocupación por los posibles efectos de contagio a nivel espacial del tratamiento, un tema abordado en la literatura (por ejemplo, véase: Deininger y Xia, 2016; Marbler, 2024; Aramburu et al., 2019). Es decir, el tratamiento de una unidad puede influir en las unidades cercanas no tratadas a través de recursos compartidos, transferencia informal de conocimiento o efectos de mercado. En nuestro contexto, dichos contagios podrían surgir si los canales rehabilitados beneficiaran indirectamente a los productores vecinos mediante una mejor disponibilidad de agua, la difusión informal de conocimiento de prácticas de riego mejoradas o la coordinación dentro de las redes de riego. Sin embargo, varias características de la estrategia de identificación mitigan esta preocupación. Los canales tratados y de control se seleccionaron deliberadamente en diferentes sistemas hidráulicos y zonas físicamente separadas dentro de los mismos departamentos, lo que reduce la probabilidad de derrames. Además, las estructuras de gobernanza del agua en San Juan están organizadas por comisiones regantes específicas para cada canal, lo que limita la coordinación entre canales. No obstante, reconocemos esto como una posible fuente de sesgo de atenuación y alentamos el trabajo futuro para explorar más a fondo la dinámica espacial utilizando métodos geoespaciales más granulares.

6. Resultados

Esta sección presenta las conclusiones empíricas de nuestro análisis y combina la producción según las encuestas con los resultados de la teledetección.

6.1 Resultados de las encuestas

Nuestro enfoque PSM hace una comparación 1 a 1 con el valor más próximo con reemplazo, cumpliendo con las condiciones de soporte común. El algoritmo de emparejamiento parte de las características de los encuestados que se consideran ajenas a la participación en el programa, como edad, sexo, estudios, pertenencia a organizaciones de productores y si posee fincas, junto con factores productivos como si se emplea maquinaria en la cosecha. Este procedimiento arrojó una muestra emparejada de 251 productores, compuesta por 178 productores del grupo de tratamiento y 73 del grupo de control. La Tabla 6 presenta la prueba de balance entre los grupos de tratamiento y de control en la muestra emparejada. Si bien persisten algunas diferencias, los grupos son mayormente comparables en cuanto a las características observadas.

⁹ Véase el Apéndice A5 para una descripción de la metodología de diferencias en diferencias del estudio de eventos.

Tabla 6: Prueba de balance

	Tratamiento		Control		Diferencia	
	Media	DE	Media	DE		
Mujer [^]	0,13	0,34	0,12	0,33	0,01	
Edad [^]	56,66	13,10	58,32	13,68	-1,65	
Educación secundaria [^]	0,61	0,49	0,63	0,49	-0,02	
Reside en la finca [^]	0,44	0,50	0,40	0,49	0,05	
Propietario [^]	0,71	0,46	0,82	0,39	-0,11	*
Inquilino	0,01	0,07	0,00	0,00	0,01	
Administrador [^]	0,22	0,41	0,12	0,33	0,10	*
Posee otras fincas [^]	0,22	0,42	0,21	0,41	0,02	
Superficie total (ha)	17,90	33,36	12,08	19,15	5,82	
Superficie cosechada último ciclo (ha)	10,28	25,79	6,10	7,50	4,18	
Superficie cosechada ciclo actual (ha)	9,91	25,06	6,08	7,50	3,83	
Cultiva exclusivamente uvas	0,88	0,33	0,84	0,37	0,04	
Cosecha con maquinaria [^]	0,04	0,19	0,03	0,16	0,01	
Superficie de tierra bajo riego (ha)	15,58	29,62	8,23	12,99	7,35	**
Superficie de tierra bajo riego efectivo (ha)	9,26	24,37	5,23	7,95	4,03	
Recibió asistencia técnica	0,17	0,38	0,33	0,47	-0,16	***
Tiene acuerdos comerciales	0,89	0,32	0,95	0,23	-0,06	
Pertenece a una asociación de productores	0,01	0,11	0,01	0,12	0,00	
N asalariados	2,54	2,35	3,23	2,46	-0,69	**
Superficie de uva cosechada (ha)	1,35	1,16	1,08	1,02	0,27	*
Producción total de uva en logaritmo (t)	3,79	1,56	3,38	1,62	0,40	*
Rendimiento en logaritmo (t/ha)	2,43	1,05	2,30	1,20	0,13	
N	178		73			

Notas: Las variables marcadas con [^] se utilizaron en el procedimiento PSM.

La Tabla 7 presenta los efectos estimados del tratamiento de los canales de riego mejorados para cuatro resultados: volumen de producción registrado (Panel A), superficie de tierras con derechos de riego (Panel B), superficie de tierras bajo riego (Panel C), y probabilidad de pérdidas de rendimiento atribuibles a problemas de riego¹⁰ (Panel D). Se presentan estimaciones para tres especificaciones muestrales diferentes: la muestra completa (columnas 1 y 2), la muestra emparejada (columnas 3 y 4) y las estimaciones de ponderación de la propensión inversa (IPW) (columnas 5 y 6).

¹⁰ Se trata de una variable binaria que adopta el valor 1 si el productor declaró haber sufrido pérdidas de rendimiento y mencionó los problemas de riego como motivo principal.

Tabla 7: Efectos de la mejora de los canales de riego en la producción de uva

<i>Panel A: Producción de uva en logaritmo (kg)</i>						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Tratados	0,314*	0,432**	0,402*	0,532***	0,268	0,384**
	(0,185)	(0,173)	(0,219)	(0,204)	(0,182)	(0,168)
N	299	299	251	251	297	297
<i>Panel B: Superficie de tierras con derechos de riego</i>						
Tratados	0,293**	0,429***	0,338**	0,498***	0,216**	0,362***
	(0,118)	(0,095)	(0,143)	(0,113)	(0,106)	(0,089)
N	299	299	251	251	297	297
<i>Panel C: Superficie de tierras bajo riego efectivo</i>						
Tratados	0,235**	0,359***	0,266**	0,409***	0,161*	0,292***
	(0,101)	(0,085)	(0,121)	(0,101)	(0,093)	(0,083)
N	299	299	251	251	297	297
<i>Panel D: Motivo de las pérdidas de rendimiento: riego</i>						
Tratados	-0,205***	-0,212***	-0,276***	-0,280***	-0,206***	-0,199***
	(0,057)	(0,058)	(0,067)	(0,067)	(0,058)	(0,057)
N	299	299	251	251	297	297
Muestra emparejada	No	No	Sí	Sí	No	No
IPW	No	No	No	No	Sí	Sí
Controles	No	Sí	No	Sí	No	Sí

Notas:

- Errores estándar entre paréntesis.
- Covariables utilizadas en PSM e IPW: mujer, edad, educación secundaria, reside en la finca, propietario de la finca, administrador de la finca, posee otras fincas, con cosecha con maquinaria y organizaciones de productores.
- Efectos promedio del tratamiento IPW estimados con el comando *teffects* de Stata.
- Otros controles son: efecto fijo por departamento, número de trabajadores contratados y cosecha exclusiva de uvas.

Los resultados indican que mejorar los canales de riego genera mejoras significativas en la producción: las unidades tratadas muestran una mayor producción, de entre el 31,4% y el 53,2%, que las del grupo de control. Este aumento en la producción parece deberse al incremento tanto de la superficie de tierras con derechos de riego como de la superficie bajo riego efectivo; las unidades tratadas mostraron aumentos estadísticamente significativos de la superficie efectivamente regada que oscilaron entre el 16,1% y el 40,9% en todos los modelos. Además, una mejor infraestructura de riego se asocia a una reducción significativa de la probabilidad de pérdidas de rendimiento por problemas de riego. En concreto, la probabilidad de que un productor identifique los problemas de riego como la causa principal de la pérdida de rendimiento disminuye entre un 20,5% y un 28,0%. La magnitud y la dirección de los coeficientes estimados se mantienen relativamente estables en las distintas especificaciones, lo que confirma la robustez de los resultados.

6.2 Resultados de la teledetección

Como componente central de nuestro análisis, empleamos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como medida objetiva de los cambios en el rendimiento de los cultivos. Los datos del NDVI, obtenidos a partir de imágenes Landsat y agregados para que coincidan con el año agrícola, captan tanto la dinámica estacional como las tendencias a largo plazo de la productividad de los viñedos. Para validar este proxy, confirmamos una fuerte correlación positiva entre el NDVI y el rendimiento autorreportado de los cultivos: un aumento de un punto porcentual en el NDVI se asocia con un **aumento del 1,30% al 1,54%** en el rendimiento, lo cual coincide con la relación esperada en viticultura¹¹.

Estimamos el efecto del tratamiento en el índice NDVI utilizando el modelo SDID, que construye un contrafactual ponderado que reproduce fielmente las tendencias del grupo de tratamiento antes de la intervención. La Figura 6 muestra la evolución del NDVI en las parcelas tratadas y de control en relación con la finalización de la rehabilitación del canal (el ciclo agrícola 2015-2016 está indicado por la línea vertical en el período 0). Antes de la intervención, ambos grupos presentaban tendencias paralelas, sin que se observaran diferencias estadísticamente significativas en el período anterior al tratamiento.

En el período posterior al tratamiento, los resultados indican una clara tendencia positiva, con un incremento promedio en el NDVI de 0,002 para las parcelas tratadas. En relación con el NDVI promedio previo a la intervención del grupo de control (0,114), esto representa un aumento del 1,75%. El efecto es estadísticamente significativo tanto en la serie bruta como en la suavizada (tendencia). Dada la relación establecida entre el NDVI y el rendimiento en nuestros datos, este cambio corresponde a un aumento estimado del 0,93% al 1,00% en los rendimientos de los cultivos. En términos absolutos, con base en un rendimiento promedio de 15,45 toneladas métricas por hectárea en el grupo de control, esto se traduce en 144 kilogramos adicionales por hectárea. En particular, la diferencia en el NDVI alcanza un máximo de 0,005 unidades en el quinto año después de la intervención, equivalente a un aumento del 2,5% en relación con el NDVI de referencia, y corresponde a un estimado de 386 kilogramos por hectárea de rendimiento adicional. Estos hallazgos sugieren que la infraestructura de riego mejorada tuvo un impacto sostenido y significativo en la productividad del viñedo a lo largo del tiempo.

6.3 Chequeos de robustez

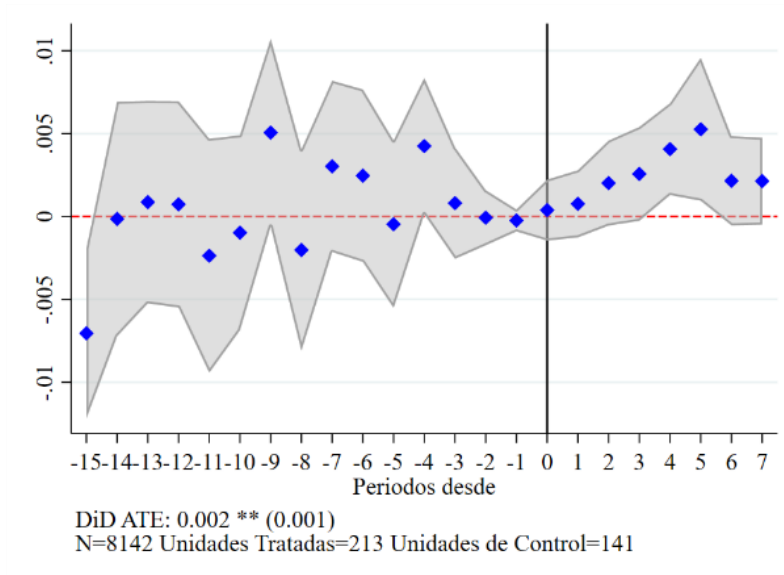
Para evaluar la fiabilidad de nuestros resultados, realizamos varias pruebas de robustez y sensibilidad. En primer lugar, examinamos las tendencias antes del tratamiento con una prueba de placebo. Asignamos artificialmente el 2009 como el año en que comenzaron a funcionar los canales rehabilitados, aunque la intervención en sí se produjo más adelante. La Figura 7 muestra estos resultados. En las series de datos brutos aparecen algunas diferencias estadísticas; sin embargo, estas diferencias no persisten en las series suavizadas. Esto sugiere que las

¹¹ Establecemos esta relación estimando una regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) en la que el logaritmo del rendimiento de los cultivos se relaciona con el logaritmo de los valores NDVI para el año 2023, donde podemos emparejar el rendimiento autorreportado con los datos de la teledetección. En nuestra especificación de línea de base obtenemos un coeficiente de 1,304. Posteriormente, incluimos los efectos fijos por departamento y los adaptamos a las características de cada finca, lo que arrojó un coeficiente de 1,537.

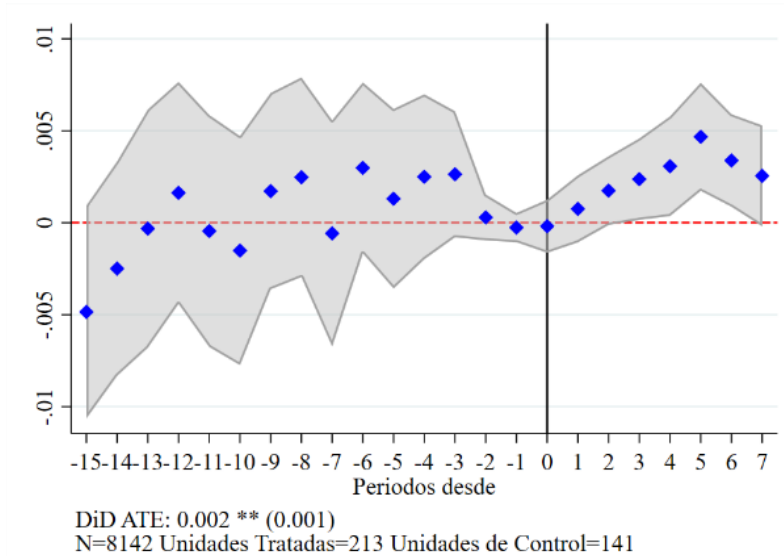
variaciones observadas son fluctuaciones a corto plazo y no cambios en las tendencias a largo plazo, lo que refuerza la validez de nuestros resultados.

Figura 6: Efectos de la mejora de los canales de riego en el NDVI

A. Datos brutos



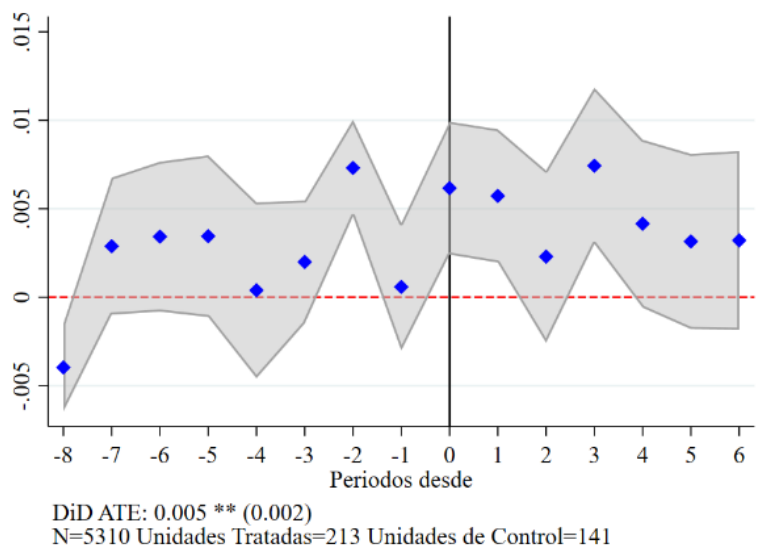
B. Tendencia



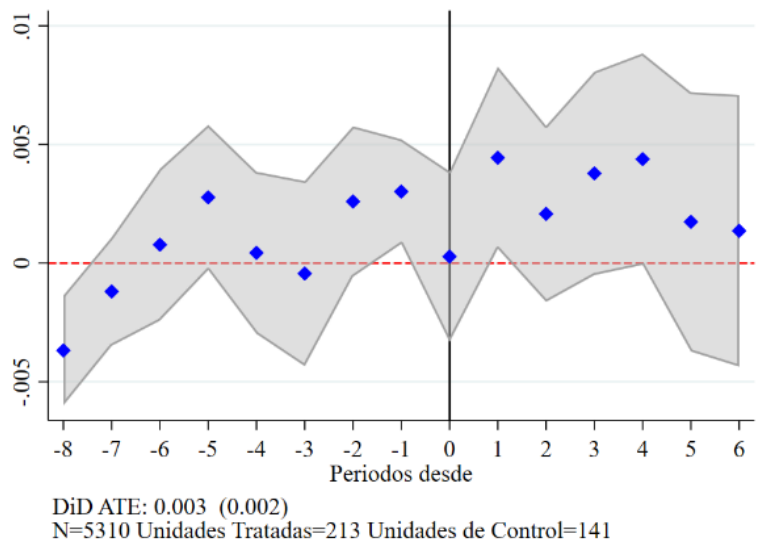
Notas: La figura muestra las estimaciones del modelo SDID, como en Arkhangelsky et al. (2021). El Panel A muestra la serie NDVI sin procesar, mientras que el Panel B muestra el promedio móvil de 12 meses.

Figura 7: Prueba con placebo - Período anterior a 2016, con 2009 como año de tratamiento

A. Datos brutos



B. Tendencia

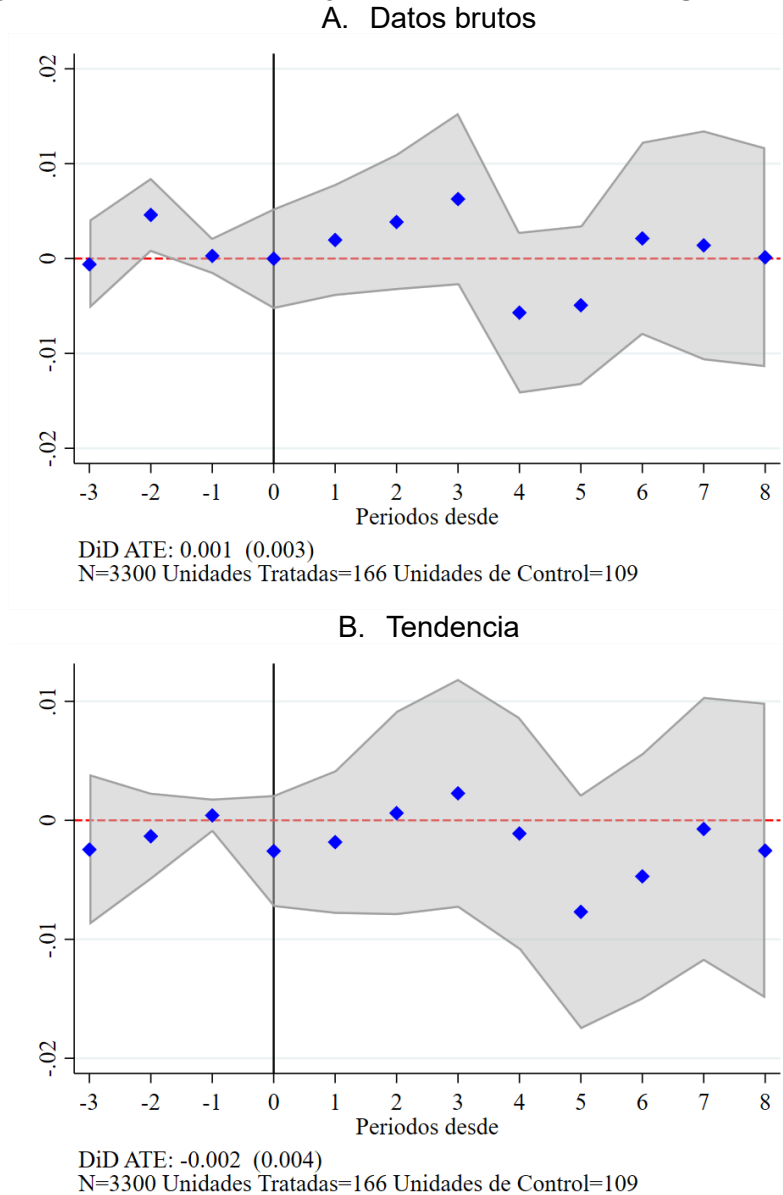


Notas: Similar a la Figura 3, pero solo considera el período anterior a 2016 y fija el período posterior al tratamiento en 2009.

En segundo lugar, realizamos una prueba de falsificación examinando resultados que no deberían verse afectados por la rehabilitación del canal. En concreto, utilizamos el índice de suelo sin vegetación (BSI), que es una medida de teledetección diseñada para detectar superficies de suelo expuesto o sin vegetación al mejorar la reflectancia del suelo y minimizar la influencia de la vegetación. A diferencia del NDVI, que capta el vigor vegetativo, el BSI hace comparaciones con los efectos esperados de la mejora de la infraestructura de riego. Dado que la intervención pretende potenciar el crecimiento vegetativo con mejor acceso al agua, no debería incidir de manera directa en los valores del BSI. Dadas las limitaciones en la disponibilidad de datos, el

BSI solo pudo calcularse para el período 2013-2023, que abarca los años inmediatamente antes y después de la intervención¹².

Figura 8: Efectos de la mejora de los canales de riego en el BSI

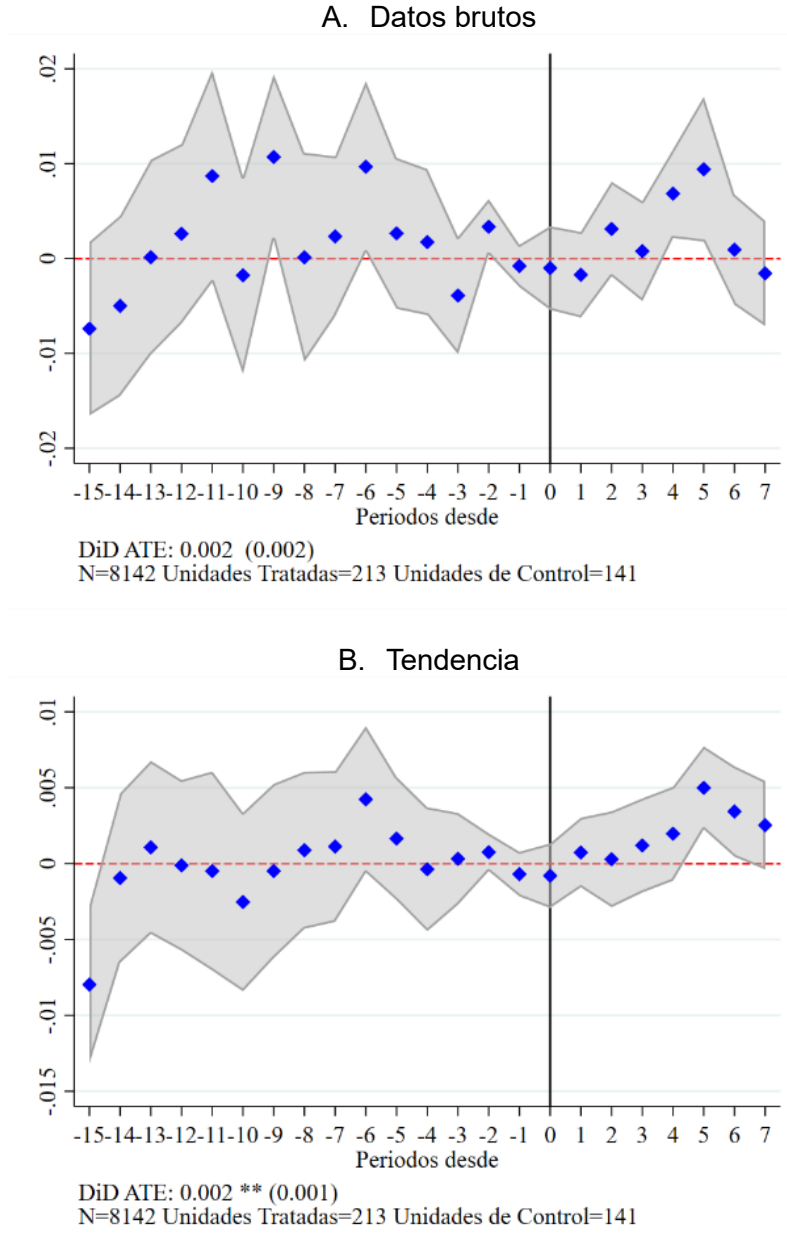


Notas: Similar a la Figura 3, pero utiliza el BSI como resultado y se centra en un período más corto (2013-2023).

¹² Como chequeo adicional de robustez, el Anexo A4 replica el análisis SDID utilizando el NDVI como variable de resultado para el período 2013-2023, el mismo período que abarcan los datos del BSI. Los resultados confirman que el efecto del tratamiento estimado se mantiene constante, lo que indica que el uso de imágenes obtenidas de Landsat 7 y Landsat 8 no introduce errores de medición ni sesgos en las estimaciones del NDVI.

La Figura 8 presenta el efecto estimado de la rehabilitación del canal en el BSI, y los resultados no muestran cambios estadísticamente significativos. Esto sustenta la validez de nuestra estrategia de identificación al sugerir que el tratamiento no tiene una incidencia espuria en las señales de teledetección ajenas ni en los patrones generales de reflectancia de la superficie terrestre.

Figura 9: Robustez de la medición del NDVI - NDVI máximo anual



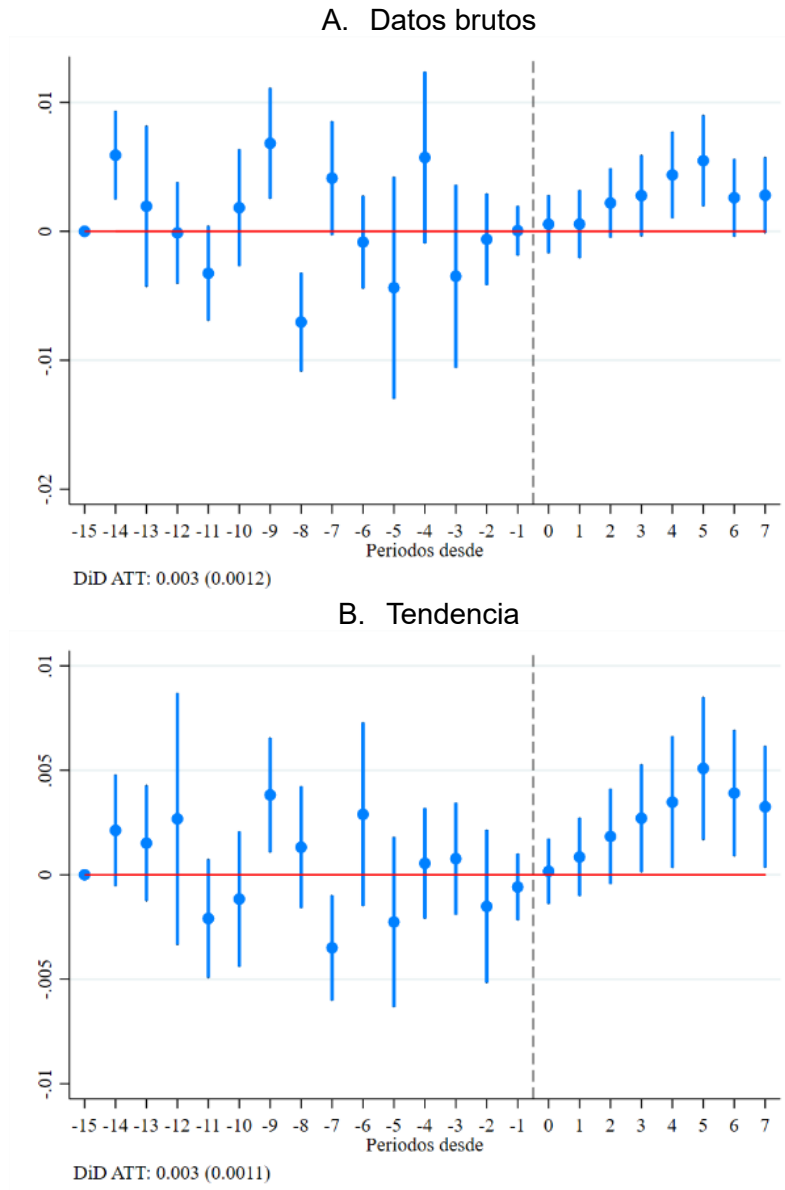
Notas: Similar a la Figura 3, pero utiliza el NDVI máximo anual en lugar del NDVI medio.

Luego, verificamos la robustez de nuestros resultados con una medida alternativa del NDVI utilizando el valor máximo anual en lugar de la media. El NDVI máximo parte del mejor estado vegetativo observado, y brinda una señal robusta del rendimiento máximo del cultivo. La Figura

9 presenta los resultados. El análisis muestra una tendencia positiva en el período posterior a la rehabilitación, con un efecto promedio del tratamiento de un aumento del 0,002 en el NDVI en las tendencias a largo plazo, que coincide con nuestra medida preferida.

Por último, evaluamos si nuestros resultados se mantienen cuando se utiliza un modelo de diferencias en diferencias en estudios de eventos en lugar del SDID. La Figura 10 resume estos resultados. Los resultados de esta especificación alternativa también revelan una tendencia positiva y un aumento promedio del NDVI estadísticamente significativo, lo que confirma la robustez de nuestras estimaciones.

Figura 10: Robustez de la ponderación SDID – Diferencias en diferencias en estudios de eventos



Notas: Similar a la Figura 3, pero realiza el análisis utilizando un modelo de diferencias en diferencias (DiD) en lugar del método de diferencias en diferencias sintéticas (SDID).

En resumen, nuestro análisis señala que mejorar los canales de riego aumenta significativamente la producción de uva, amplía la superficie bajo riego efectivo y reduce las pérdidas de rendimiento. Estos resultados están respaldados por el análisis de teledetección con el NDVI, lo cual constituye evidencia objetiva de una mejor salud vegetal y rendimiento de los cultivos. Además, varias pruebas de robustez confirman que estos resultados no se deben a decisiones específicas del modelo. En conjunto, las pruebas sugieren que la infraestructura de riego rehabilitada en el marco del programa PROSAP III aporta beneficios significativos y duraderos para la productividad de la viticultura en la región, con la consiguiente repercusión en las políticas agrícolas y futuras inversiones en infraestructura.

7. Conclusiones

Este estudio presenta evidencia contundente de que rehabilitar la infraestructura de riego puede llevar a aumentos mensurables de la productividad en sistemas agrícolas semiáridos. Con una combinación de series temporales de NDVI por satélite que abarcan 20 años y datos de corte transversal de encuestas a agricultores, ofrecemos una estimación robusta del impacto de la mejora de los canales de riego en el rendimiento de los viñedos en la provincia argentina de San Juan.

Nuestros resultados muestran que la rehabilitación de canales en el marco del programa PROSAP III aumentó significativamente la superficie bajo riego efectivo, redujo la vulnerabilidad a las pérdidas productivas relacionadas con el riego y mejoró significativamente el rendimiento de la uva entre los agricultores beneficiarios. Cabe destacar que estos efectos se mantuvieron e incluso se intensificaron con el tiempo, lo que sugiere que las inversiones en infraestructura pueden generar beneficios compuestos a medida que los agricultores se adaptan y optimizan el uso del recurso hídrico.

En la misma línea, pueden pasar varios años desde que concluyan las obras de mejora de los canales hasta que los agricultores adopten efectivamente las nuevas técnicas de riego y mejoren así su productividad, por lo que es posible que los efectos no se vean en su totalidad inmediatamente después de concluido el tratamiento. Esto también subraya el potencial de la teledetección como herramienta escalable y objetiva para evaluar el impacto agrícola en períodos de estudio más prolongados. En los casos en que los sistemas de seguimiento tradicionales son deficientes o costosos de implementar, las imágenes satelitales son un fuerte complemento de los datos de las encuestas, especialmente en el caso de cultivos perennes que presentan una variabilidad estacional e interanual.

Los resultados subrayan la importancia de invertir en bienes públicos que mejoren la gestión del agua para uso agrícola. A medida que los gobiernos y las instituciones multilaterales sigan financiando proyectos de infraestructura a gran escala en América Latina, este estudio servirá de modelo de cómo emplear los datos de alta frecuencia y espacialmente explícitos para evaluar rigurosamente el impacto y dirigir la asignación de recursos. En líneas más generales, los resultados contribuyen a la base empírica mundial sobre el papel del riego en la promoción de una agricultura resiliente al clima, los medios de subsistencia rurales y la competitividad de las exportaciones.

Si bien nuestro análisis aísla el impacto de la rehabilitación de canales, es importante considerar cómo estos efectos pueden interactuar con otras inversiones complementarias. La asistencia técnica y la infraestructura agrícola, como los sistemas de riego por goteo o los tanques de almacenamiento de agua, podrían amplificar las ganancias observadas en productividad (López y Salazar, 2017). En un contexto similar, Maffioli et al. (2018) evalúan el impacto de dos proyectos complementarios en Argentina (PROSAP y el *Programa de Apoyo para Pequeños Productores Vitivinícolas de Argentina*, PROVIAR) y demuestran que financiar infraestructura de riego y, adicionalmente, brindar asistencia técnica a los agricultores beneficiarios genera mayores impactos productivos que la suma de los efectos causados por intervenciones separadas. Este podría ser el caso de la intervención de riego que se estudia aquí, debido a que los niveles de capacidad de las diferentes Juntas de Riego y Comisiones de Canales probablemente variaron, y cabe destacar que no todas las organizaciones participantes expresaron interés en recibir apoyo para la gestión técnica y administrativa de los sistemas mejorados. Esto podría ayudar a explicar las variaciones en los resultados de la rehabilitación entre canales y departamentos, dado que las áreas con mayor participación de los usuarios y responsabilidades de mantenimiento estarían mejor posicionadas para mantener las mejoras a lo largo del tiempo. Además, no todos los agricultores de la zona de influencia asistieron a las actividades de asistencia técnica, lo que posiblemente explique la heterogeneidad de los impactos. Por lo tanto, comprender cómo estos factores complementarios influyen en los resultados es fundamental para diseñar estrategias integradas de desarrollo rural y maximizar el retorno de la inversión en infraestructura.

Más adelante, se podría estudiar la heterogeneidad de los efectos del tratamiento (por ejemplo, por tamaño de finca, tipo de sistema de riego o adopción de prácticas complementarias) y estudiar los efectos indirectos a largo plazo en los ingresos, el valor de la tierra y conservación del agua. Integrar el comportamiento de los agricultores, la capacidad institucional y los resultados medioambientales en el marco de la evaluación enriquecería aún más nuestra comprensión de cómo la infraestructura rural incide en el desarrollo agrícola.

Referencias bibliográficas

- Abadie, A., Diamond, A., y Hainmueller, J. (2010). *Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of California's tobacco control program*. Journal of the American Statistical Association, 105(490), 493–505. <https://doi.org/10.1198/jasa.2009.ap08746>
- Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., y Ojeda, H. (2010). *The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status*. Precision Agriculture, 11(6), 636–656.
- Adeoti, A., Barry, B., Namara, R. E., Kamara, A., y Titiati, A. (2007). *Treadle pump irrigation and poverty in Ghana*. International Journal of River Basin Management, 5(4), 285–292.
- Adhikary, S., Biswas, B., Naskar, M. K., Mukherjee, B., Singh, A. P., y Atta, K. (2022). *Remote sensing for agricultural applications. In Arid Environment-Perspectives, Challenges and Management*. IntechOpen.
- Agosta, E., Canziani, P., y Cavagnaro, M. (2012). *Regional climate variability impacts on the annual grape yield in Mendoza, Argentina*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(6), 993-1009.
- Alface, A. B., Pereira, S. B., Filgueiras, R., y Cunha, F. F. (2019). *Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23(5), 330-335.
- Anastasiou, E., Balafoutis, A., Darra, N., Psiroukis, V., Biniari, A., Xanthopoulos, G., y Fountas, S. (2018). *Satellite and proximal sensing to estimate the yield and quality of table grapes*. Agriculture, 8(7), 94.
- Aramburu, J., Garone, L. F., Maffioli, A., Salazar, L., & Lopez, C. A. (2019). *Direct and spillover effects of agricultural technology adoption programs: Experimental evidence from the Dominican Republic* (No. IDB-WP-971). IDB Working Paper Series.
- Arkhangelsky, D., Athey, S., Hirshberg, D. A., Imbens, G. W., y Wager, S. (2021). *Synthetic difference-in-differences*. American Economic Review, 111(12), 4088-4118.
- Aseyehegn, K., Yirga, C., y Rajan, S. (2012). *Effect of small-scale irrigation on the income of rural farm households: The case of Laelay Maichew district, central Tigray, Ethiopia*. Journal of Agricultural Sciences, 7(1), 43–57.
- Beckett, S. 2013. *Introduction to Time Series Using Stata*. College Station, TX: Stata Press.
- Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., de Abelleira, D., Ferraz, R., ..., y Verón, S. (2018). *Remote sensing and cropping practices: a review*. Remote Sensing, 10, 99. doi:10.3390/rs10010099
- Berbel, J., y Mateos, L. (2013). *Does modernization save water? A meta-analysis of reduction in water demand after irrigation modernization*. Agricultural Water Management, 146, 370–377.

Bertrand, M., Duflo, E., y Mullainathan, S. (2004). *How much should we trust differences-in-differences estimates?* Quarterly Journal of Economics, 119(1), 249–275. <https://doi.org/10.1162/003355304772839588>

Binswanger, H., Khandker, S., y Rosenzweig, M. (1993). *How Infrastructure and Financial Institutions Affect Agricultural Output and Investment in India.* Journal of Development Economics, 41(2), 337-366.

Cavatassi, R., González-Flores, M., Winters, P., Andrade-Piedra, J., Espinosa, P., y Thiele, G. (2011). *Linking smallholders to the new agricultural economy: The case of the plataformas de concertación in Ecuador.* Journal of Development Studies, 47(10), 1545-1573. doi:10.1080/00220388.2010.536221y

Chaves, M. M., Santos, T. P., Souza, C. R., et al. (2010). *Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality.* Annals of Applied Biology, 150(2), 237–252.

Chivasa, W., Mutanga, O., y Biradar, C. M. (2017). *Application of remote sensing in estimating maize grain yield in heterogeneous African agricultural landscapes: a review.* International Journal of Remote Sensing, 38, 6816–6845. doi:10.1080/01431161.2017.136539

Clarke, D., Pailañir, D., Athey, S., y Imbens, G. W. (2023). *Synthetic difference-in-differences estimation.*

Damania, R., Desbureaux, S., Zaveri, E., y Russ, J. (2019). *Quality Unknown: The Invisible Water Crisis.* Washington, D.C.: World Bank.

Deininger, K., & Xia, F. (2016). Quantifying spillover effects from large land-based investment: The case of Mozambique. *World Development*, 87, 227-241.

Dercon, S., Gilligan, D., Hoddinott, J. y Woldehanna, T. (2006). *The impact of roads and agricultural extension on consumption growth and poverty in fifteen Ethiopian villages.* CSAE Working Paper Series 2007-01. Oxford: CSAE.

Dillon, A. (2011). *The effect of irrigation on poverty reduction, asset accumulation, and informal insurance: Evidence from northern Mali.* World Development, 39(12), 2165–2175.

Dinkelman, T. (2011). *The Effects of Rural Electrification on Employment: New Evidence from South Africa.* American Economic Review, 101(7), 3078-3108.

Duflo, E., y Pande, R. (2007). *Dams.* Quarterly Journal of Economics, 122(2), 601–646.

Escobal, J., y Ponce, C. (2002). *The Benefits of Rural Roads: Enhancing Income Opportunities for the Rural Poor.* Working paper, GRADE, Grupo de Análisis para el Desarrollo, Lima, Perú.

Ezimand, K., Chahardoli, M., Azadbakht, M., y Matkan, A. A. (2021). *Spatiotemporal analysis of land surface temperature using multi-temporal and multi-sensor image fusion techniques.* Sustainable Cities and Society, 64, 102508.

- Fan, S. (2008). *Public expenditures, growth, and poverty: Lessons from developing countries*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Fan, S., L. Zhang, y X. Zhang (2002). *Growth, inequality and poverty in rural China: the role of public investments*. Research Report 125. IFPRI, Washington, D.C.
- Fan, S., Brzeska, J., Keyzer, M., y Halsema, A. (2008). *From Subsistence to Profit: Transforming Smallholder Farms*. IFPRI Policy Brief. Washington, D.C.: IFPRI.
- FAO. (2021). *FAO Statistical Yearbook*. Rome: FAO.
- Fereres, E., y Evans, R.G. (2006). *Irrigation of fruit trees and vines: An introduction*. *Irrigation Science*, 24(2), 55–57.
- Garcia-Pedrero, A., Gonzalo-Martín, C., Lillo-Saavedra, M., y Rodríguez-Esparragón, D. (2018). *The outlining of agricultural plots based on spatiotemporal consensus segmentation*. *Remote Sensing*, 10(12), 1991.
- Gibbons, M.A., Maffioli, A., y Rossi, M. (2016). *Money for Wine? Complementarities in the provision of private and public goods to wine producers*. Inter-American Development Bank. Strategy Development Division. Series IDB-WP-689
- Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B., y Louis, J. (2011). *Optical remote sensing applications in viticulture—a review*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 159–173.
- Hirano, K., y Imbens, G. W. (2001). *Estimation of causal effects using propensity score weighting: An application to data on right heart catheterization*, *Health Services and Outcomes Research Methodology*, 2, 259–278. doi:10.1023/A:1020371312283
- Hussain, I., y Hanjra, M. A. (2004). *Irrigation and poverty alleviation: Review of the empirical evidence*. *Irrigation and Drainage*, 53(1), 1–15.
- Jacoby, H. (2000). *Access to markets and the benefits of rural roads*. *Economic Journal*, 110(465), 713-737.
- Jara, J., Ortega-Farías, S., y Searles, P.S. (2017). *Response of vineyard evapotranspiration and yield components of a Carménère (Vitis vinifera L.) vineyard to different irrigation levels in Central Chile*. *Irrigation Science*, 35(1), 21–29.
- Jouanjean, M. A. (2013). *Targeting infrastructure development to foster agricultural trade and market integration in developing countries: An analytical review*. London: Overseas Development Institute.
- Kasimati, A., Espejo-Garcia, B., Vali, E., Malounas, I., y Fountas, S. (2021). *Investigating a selection of methods for the prediction of total soluble solids among wine grape quality characteristics using normalized difference vegetation index data from proximal and remote sensing*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 683078.
- Khandker, S., Barnes, D., Samad, H., y Huu Minh, N. (2008). *Welfare Impacts of Rural Electrification: Evidence from Vietnam*. World Bank. Washington, D.C.: World Bank.

- Khandker, S., Bakht, Z. y Koolwal, G. (2009). *The poverty impact of rural roads: the evidence from Bangladesh*. *Economic Development and Cultural Change*, 57, 685-722.
- Kinyanjui, M. J. (2011). *NDVI-based vegetation monitoring in Mau Forest complex, Kenya*. *African Journal of Ecology*, 49(2), 165-174. doi:10.1111/j.1365-2028.2010.01251.x
- Levy, H. (1996). *Kingdom of Morocco: Impact Evaluation Report, Socioeconomic Influence of Rural Roads*. World Bank, Operation Valuation Department. Washington, D.C.: World Bank.
- Lichtenberg, E., y Zilberman, D. (1986). *The econometrics of damage control: Why specification matters*. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(2), 261–273.
- Lillesand, T. M., y Keifer, R.W. (2002). *Remote Sensing and Image Interpretation, 4th ed.* New York, NY: John Wiley and Sons.
- Lipscomb, M., Mobarak, A. M., y Barham, T. (2013). *Development Effects of Electrification: Evidence from the Topographic Placement of Hydropower Plants in Brazil*. *American Economic Journal: Applied Economics*, 5(2), 200-231. doi: 10.1257/app.5.2.200
- Lyu, H., Grafton, M., Ramilan, T., Irwin, M., Wei, H. E., & Sandoval, E. (2023). Using remote and proximal sensing data and vine vigor parameters for non-destructive and rapid prediction of grape quality. *Remote Sensing*, 15(22), 5412.
- Lobell, D. B., y Field, C. B. (2007). *Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming*. *Environmental research letters*, 2(1), 014002.
- Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., y Little, B. (2015). *A scalable satellite-based crop yield mapper*. *Remote Sensing of Environment*, 164, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021>
- Lokshin, M., y Yemtsov, R. (2005). *Has Rural Infrastructure Rehabilitation in Georgia Helped the Poor?* *World Bank Economic Review*, 19(2), 311-333. Available at: <https://www.jstor.org/stable/40282218>
- Lopez, C. A., & Salazar, L. (2017). Unraveling the threads of decentralized community-based irrigation systems in Bolivia. *BID (Banco Interamericano de Desarrollo) Working Paper*.
- López, R., y Galinato, G.I. (2007). *Should governments stop subsidies to private goods? Evidence from rural Latin America*. *Journal of Public Economics*, 91, 1071-94.
- Lykhovyd, P. V., Vozhehova, R. A., Lavrenko, S. O., y Lavrenko, N. M. (2022). *The study on the relationship between normalized difference vegetation index and fractional green canopy cover in five selected crops*. *The Scientific World Journal*, 2022(1), 8479424.
- Maffioli, Alessandro, María Amelia Gibbons, and Martín Rossi 2018. *Support Program for Small Producers of the Wine Industry in Argentina (PROVIAR) and Provincial Agricultural Services Program (PROSAP)*. <https://doi.org/10.18235/0001230>
- Marbler, A. (2024). Water scarcity and local economic activity: Spatial spillovers and the role of irrigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 124, 102931.

(2007). *Beyond panaceas in water institutions*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(39), 15200–15205.

Mu, R., y van de Walle, D. (2008). *Rural Roads and Local Market Development in Vietnam*. World Bank. Washington, D.C.: World Bank.

PROSAP-IICA. (2011). *Proyecto “Mejora de la red secundaria de riego” del área Proyecto Desarrollo Agrícola y Gestión del Área Bajo Riego: Canal del Norte-25 de Mayo, Provincia de San Juan: Documento de proyecto* [Informe interno no publicado]. Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Ricce, W. D. S., Caramori, P. H., y Roberto, S. R. (2013). *Potencial climático para a produção de uvas em sistema de dupla poda anual no Estado do Paraná*. *Bragantia*, 72, 408-415.

Rosegrant, M.W., Cai, X., y Cline, S.A. (2009). *World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity*. Washington, D.C.: IFPRI.

Rosenbaum, P. R. (2002). *Observational Studies* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3692-2>

Rosenbaum, P. R. (1987). *Model-based direct adjustment*. *Journal of the American Statistical Association*, 82, 387–394. doi 10.1080/01621459.1987.10478441

Rosenbaum, P. R., y Rubin, D. B. (1983). *The central role of the propensity score in observational studies for causal effects*. *Biometrika*, 70(1), 41-55.

Rossi, M. (2013). Evaluación de impacto de proyectos de Riego en Mendoza. UCAR-Unidad de Seguimiento y Evaluación. Documento interno.

Rossi, M. (2016). Evaluación de impacto de proyectos de Riego en Mendoza y San Juan. UCAR-Unidad de Seguimiento y Evaluación. Documento interno.

Salazar, L., Palacios, A. C., Selvaraj, M., y Montenegro, F. (2021). *Using satellite images to measure crop productivity: Long-term impact assessment of a randomized technology adoption program in the Dominican Republic* (No. IDB-WP-01234). IDB Working Paper Series.

Saleth, R. M., y Dinar, A. (2004). *The Institutional Economics of Water: A Cross-Country Analysis of Institutions and Performance*. Cheltenham: Edward Elgar.

Schling, M., y Pazos, N. (2022). *The impact of smart subsidies on agricultural production: Innovative evidence from Argentina using survey and remote sensing data* (No. IDB-WP-01358). IDB Working Paper Series.

Sills, E. O., Herrera, D., Kirkpatrick, A. J., Brandao Jr., A., Dickson, R., Hall, S., ... Pfaff, A. (2015). *Estimating the impacts of local policy innovation: the synthetic control method applied to tropical deforestation*. *PLoS ONE*, 10(7), e0132590. doi: 10.1371/journal.pone.0132590

Sun, L., Gao, F., Anderson, M.C., Kustas, W.P., Alsina, M.M., Sanchez, L., y Post, K. (2017). *Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards*. *Remote Sensing*, 9(4), 317.

van de Walle, D., y Cratty, D. (2002). *Impact evaluation of a Rural Road Rehabilitation Project*. World Bank Working Paper No. 44472. Washington, D.C.: World Bank.

Ward, F.A., y Pulido-Velazquez, M. (2008). *Water conservation in irrigation can increase water use*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47), 18215–18220.

World Bank. (2007). *Making the Most of Scarcity: Accountability for Better Water Management Results in the Middle East and North Africa*. Washington, D.C.: World Bank.

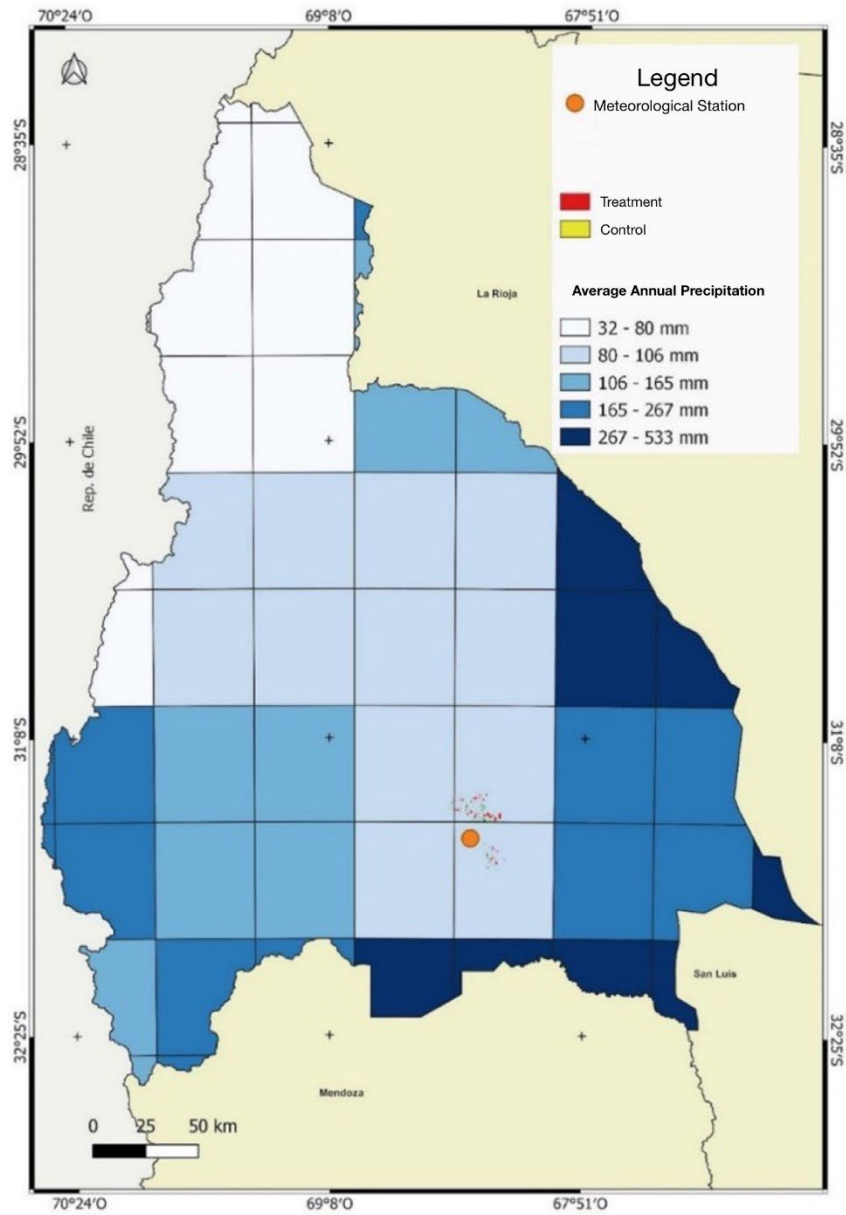
Anexo

Figura A.1



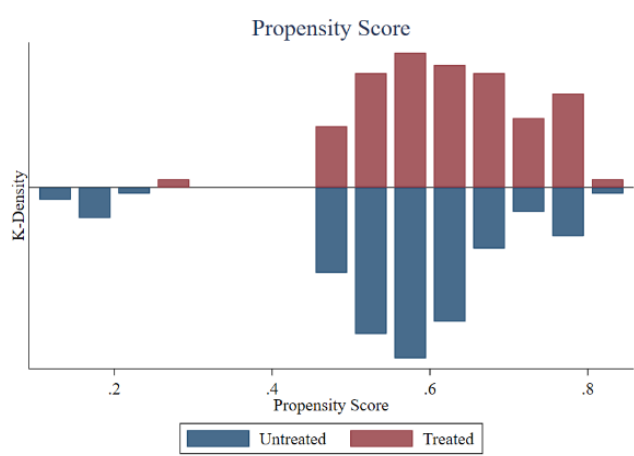
Notas: Esta imagen muestra el proceso para aislar las parcelas cultivadas de cada finca.

Figura A.2

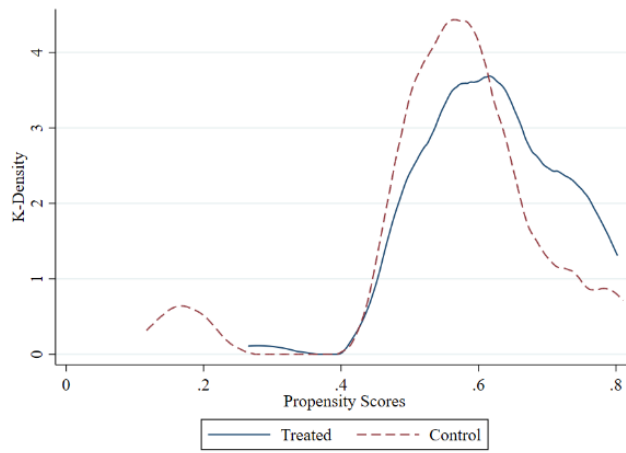


Notas: Esta imagen muestra las precipitaciones acumuladas por cada región del distrito. La superficie de intervención se sitúa en una zona que recibió entre 90 y 106 mm.

Figura A3: Distribución de los puntajes de propensión
A. Soporte del puntaje de propensión



B. Emparejamiento por puntaje de propensión (PSM)



C. Puntaje de propensión tras el emparejamiento

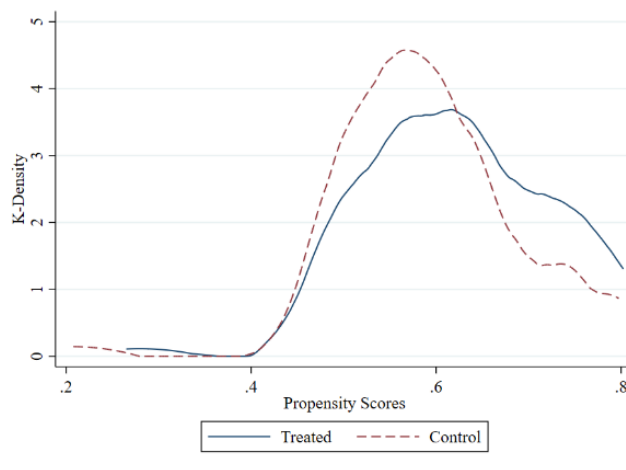
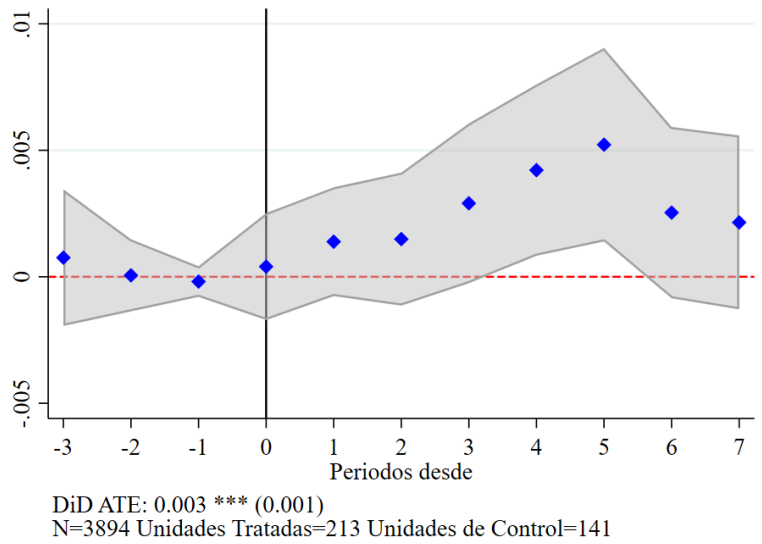
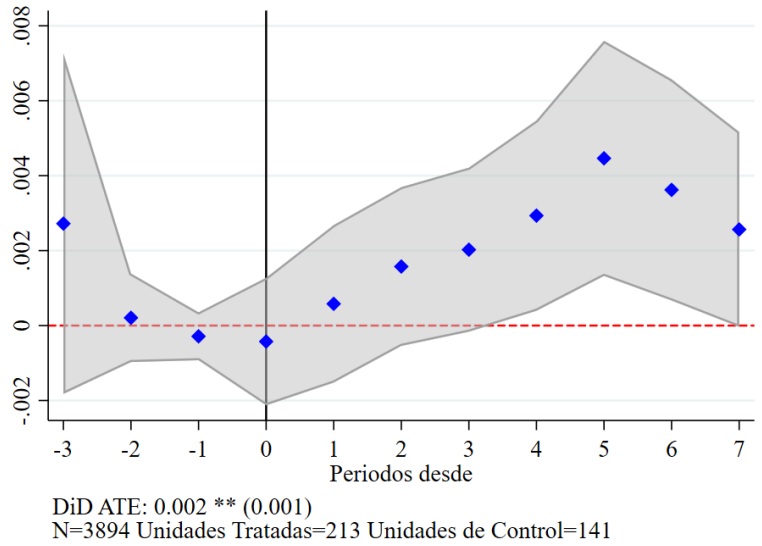


Figura A4: Efectos de la mejora de los canales de riego en el NDVI –
Período corto 2013-2023

A. Datos brutos



B. Tendencia



Notas: Similar a la Figura 3, pero utiliza el NDVI anual para el período 2013-2023.

Apéndice A5: Especificación de diferencias en diferencias en el estudio de eventos

Como chequeo de la robustez del análisis principal que utiliza un modelo de diferencias en diferencias sintéticas (SDiD), aplicamos una especificación de diferencias en diferencias (DiD) en el estudio de eventos. El marco de este estudio es una extensión ampliamente utilizada del estimador estándar de DiD de dos períodos que permite analizar los efectos del tratamiento en varios períodos antes y después de una intervención (Jacobson, LaLonde y Sullivan 1993; Autor 2003). Este enfoque permite evaluar dinámicamente los efectos del tratamiento y resulta particularmente útil cuando el momento de la intervención es conocido o escalonado o cuando los efectos del tratamiento pueden evolucionar con el tiempo.

Además de captar la trayectoria de los impactos tras la intervención, el diseño del estudio de eventos permite realizar una prueba directa de la hipótesis de tendencias paralelas, que sustenta la identificación causal cuando se emplea el método DiD (Angrist y Pischke 2009; Borusyak y Jaravel 2017). Al estimar los coeficientes previos al tratamiento, es posible analizar si las unidades tratadas y de control presentaban tendencias similares antes de la intervención, lo cual refuerza la credibilidad de la estrategia de identificación. En nuestro caso, utilizamos este modelo para investigar la duración y la persistencia de los efectos de las mejoras de la infraestructura de riego en el rendimiento de la uva, utilizando el NDVI de la teledetección como proxy del vigor y la productividad de la vid.

Estimamos el siguiente modelo de efectos fijos bidireccionales con indicadores de evento-tiempo:

$$Y_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \sum_{\substack{k=-15, \\ k \neq -1}}^7 \beta_k * Treated_i * 1\{k = t\} + \gamma'X_{it} + \epsilon_{it}$$

Donde Y_{it} denota el valor del NDVI para la parcela i en el año t , α_i representa los efectos fijos por parcela que controlan la heterogeneidad no observada que no varía en el tiempo, y λ_t son los efectos fijos por año, que reflejan choques comunes a todas las unidades. X_{it} es un vector de controles, como la temperatura y precipitaciones promedio. El término $Treated_i$ indica si la parcela i alguna vez fue tratada, y $1\{k=t\}$ es un indicador del momento del evento k , donde t es el año de tratamiento de la parcela i . Omitimos el indicador de momento del evento para $k=1$, que sirve como período de referencia.

Esta especificación permite visualizar los efectos dinámicos de la intervención. Además, la significancia y la magnitud de los coeficientes anteriores al tratamiento ($k < 0$) sirven para determinar la validez del supuesto de tendencias paralelas. Los coeficientes posteriores al tratamiento ($k \geq 0$) revelan cómo afectó la rehabilitación del sistema de riego la productividad a lo largo del tiempo y si los efectos se mantuvieron, aumentaron o se dispararon en los años siguientes a la intervención.

Referencias

- Angrist, J. D., y Pischke, J.-S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton University Press.
- Autor, D. H. (2003). *Outsourcing at will: The contribution of unjust dismissal doctrine to the growth of employment outsourcing*. *Journal of Labor Economics*, 21(1), 1-42.
- Borusyak, K., y Jaravel, X. (2017). *Revisiting Event Study Designs: Robust and Efficient Estimation*. Working Paper.
- Jacobson, L. S., LaLonde, R. J. y Sullivan, D. G. (1993). *Earnings losses of displaced workers*. *American Economic Review*, 83(4), 685-709.