



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Evaluación de los impactos del cambio climático en la agricultura en Uruguay

Evaluación de los impactos del cambio climático en la agricultura en Uruguay

Autores:

Equipo técnico Uruguay:

Magdalena Borges (OPYPA - MGAP)

Florencia Hastings (DGRN - MGAP)

Gonzalo Rizzo (UdelaR)

Federico Campos (INIA)

Cecilia Jones (OPYPA - MGAP)

Equipo técnico FAO Roma:

Maria Raffaella Vuolo

Mariko Fujisawa

Hideki Kanamaru

Apoyo SIG:

Gabriel García (INIA)

Cita requerida:

Borges, M., Hastings, F., Rizzo, G., Campos, F.M., García, G., Jones, C., Vuolo, M.R., Fujisawa, M. y Kanamaru, H. 2020. *Evaluación de los impactos del cambio climático en la Uruguay*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca7134es>.

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

Las fronteras mostradas y los nombres y las designaciones empleados en este mapa no implican, por parte de la FAO, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. Las líneas discontinuas en los mapas representan fronteras aproximadas respecto de las cuales puede que no haya todavía pleno acuerdo.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-131995-6

© FAO, 2020



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

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

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

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

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

Índice

Acrónimos	iv
Resumen	v
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Antecedentes	5
4. Metodología	9
4.1 Generalidades MOSAICC	9
4.2 Componente climático	9
4.3 Componente de cultivos	10
5. Aplicación en Uruguay	15
5.1 Grupo de trabajo	15
5.2 Caracterización climática	16
5.3 Cultivos seleccionados	18
5.4 Fuente de datos	30
6. Resultados obtenidos	33
6.1 Soja	33
6.2 Arroz	38
6.3 Trigo	49
6.4 Maíz	58
6.5 Papa	63
6.6 Resumen de resultados	70
7. Recomendaciones de política	77
8. Referencias	79
Anexo -1 Matriz de Correlaciones Anomalía, variables climáticas y variables de balance hídrico	81
Anexo -2 Capacidad de almacenaje de agua de los suelos	95

Acrónimos

ACA	Asociación de Cultivadores de Arroz
DIEA	Dirección de Estadísticas Agropecuarias
FUCREA	Federación Uruguaya de grupos CREA
GCM	Modelo General de Circulación
GEI	Gases de Efecto Invernadero
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
MOSAICC	Modelación de los Impactos del Cambio Climático en el Sector Agropecuario
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
INASE	Instituto Nacional de Semillas
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas
UdelaR	Universidad de la República
USyCC	Unidad de Sostenibilidad y Cambio Climático

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar los posibles impactos del cambio climático sobre los rendimientos de los principales cultivos en Uruguay en el mediano y largo plazo, a 2040 y 2070 respectivamente. Para eso, en primera instancia se realizó una reducción de escala estadística de diferentes proyecciones climáticas globales, con el fin de obtener proyecciones a nivel local. A partir de dicha información y utilizando regresiones estadísticas que vinculan la productividad con variables climáticas y de balance hídrico, se estimaron los potenciales efectos del cambio climático en los cultivos de soja, arroz, trigo, maíz y papa. Dicho análisis se realizó con el apoyo de la plataforma desarrollada por FAO, conocida como MOdelación de los Impactos del Cambio Climático en el Sector Agropecuario (MOSAICC, por sus siglas en inglés).

En grandes líneas, los resultados apuntan a que en el futuro el cultivo de arroz se vería beneficiado por el cambio climático, mientras que la papa se perjudicaría. Por otra parte, las señales respecto a los rendimientos de la soja, el trigo y el maíz son mixtas, ya que algunos modelos indican una mejora de los mismos, al tiempo que otros marcan un deterioro. A su vez, las proyecciones que resultaron más significativas en general fueron las correspondientes al futuro más lejano, de 2040 a 2070. Por último, cabe aclarar que estos resultados deben tomarse con cautela, ya que están sujetos a un alto grado de incertidumbre.





1. Introducción

Este trabajo se desarrolló en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario (PNA-Agro)¹ y fue realizado por técnicos de la Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA) y de la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (UdelAR).

El estudio tuvo como objetivo evaluar los impactos del cambio climático en la agricultura y se dividió en dos grandes etapas. En una primera instancia se realizó una reducción de escala estadística de las proyecciones climáticas provenientes de distintos modelos de circulación general (GCMs, por sus siglas en inglés), con el propósito de obtener proyecciones climáticas a nivel local. En segundo lugar y teniendo en cuenta los resultados de la etapa anterior, se estimaron los potenciales impactos que tendría el cambio climático sobre los rendimientos de los principales cultivos en Uruguay en el mediano y largo plazo (2040 y 2070 respectivamente). Los cultivos analizados fueron la soja, el arroz, el trigo, el maíz y la papa. Este informe se centra en la segunda evaluación, aunque también incluye un resumen de los resultados obtenidos en la primera parte. El informe completo referido al primer análisis se titula "Proyecciones climáticas mediante reducción de escala estadística para Uruguay" (Bentancur, V. y Molinari, M. 2018) y se puede encontrar en el siguiente link. En ambas etapas, la modelación se realizó con el apoyo de la plataforma desarrollada por FAO, conocida como MOdelación de los Impactos del Cambio Climático en el Sector Agropecuario (MOSAICC, por sus siglas en inglés).

Analizar los posibles cambios de las variables climáticas y el efecto que éstos podrían tener en los cultivos es fundamental para poder anticipar potenciales problemas, para visualizar oportunidades y en definitiva, para generar medidas que nos permitan adaptarnos mejor a las futuras variaciones. En ese sentido, cabe recordar que la

¹ Proyecto "Integración de la Agricultura en los Planes Nacionales de Adaptación", dirigido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con el apoyo de la Iniciativa Internacional para el Clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear (BMUB) de Alemania.

adaptación al cambio y la variabilidad climática es una de las líneas estratégicas transversales del MGAP desde el 2010 y en ese marco, el PNA-Agro ha venido trabajando para identificar, sistematizar y priorizar los esfuerzos y estrategias de adaptación para avanzar hacia un sendero de desarrollo sostenible.



2. Objetivos

Objetivo general

Modelar los potenciales impactos del cambio climático en los rendimientos de los principales cultivos en Uruguay en el mediano y largo plazo, hasta 2040 y 2070 respectivamente.

Objetivos específicos

- Analizar la evolución de largo plazo de los rendimientos de los cultivos más relevantes para la economía.
- Identificar el componente de la variabilidad de los rendimientos relacionado al clima.
- Analizar la relación entre las variables climáticas y las variables de balance hídrico con los rendimientos de cada cultivo, a través del desarrollo de modelos estadísticos.
- Evaluar el impacto de los cambios esperados en las variables climáticas en la productividad de los cultivos seleccionados, aplicando los modelos estadísticos desarrollados.





3. Antecedentes

De acuerdo a la definición del IPCC en su quinto informe (2014), la adaptación es el proceso de intervención realizado para ajustarse al clima actual o esperado y a sus efectos. Para el sector agropecuario la adaptación significa cambiar procesos o prácticas de producción para moderar los potenciales efectos negativos del cambio climático y/o aprovechar eventuales oportunidades que puedan surgir.

La adaptación al cambio climático para el sector agropecuario enfrenta varios desafíos, entre ellos:

1. El sector agropecuario es muy diverso y los impactos derivados de la variabilidad y cambio climático son múltiples. Cada sistema de producción es complejo tanto por los procesos biológicos relacionados a la producción en sí, como por el sistema social, económico y ecológico asociado.
2. La producción agropecuaria es especialmente sensible/vulnerable a las condiciones ambientales. La fuerte variabilidad interanual de los factores climáticos en Uruguay provoca pérdidas y variaciones importantes en la producción de cultivos y pasturas. Las estrategias de adaptación deben contemplar el déficit de adaptación a la variabilidad actual del clima y además deben permitir la adaptación a los cambios en el futuro.
3. Las fuentes de información climática para entender el presente y proyectar el futuro son limitadas. En relación a esto cabe comentar que hay dos clases principales de modelos para simular la influencia del clima en los rendimientos de los cultivos y que requieren distintas bases de datos: 1) los modelos de proceso (process-based crop models), que representan dinámicamente el desarrollo de los cultivos 2) los modelos estadísticos, que buscan si hay una relación estadística robusta entre las variables climáticas y los rendimientos. La primera clase de modelos necesita una gran cantidad de datos para su funcionamiento y calibración. La segunda clase necesita menos variables de ingreso, pero para un periodo de tiempo generalmente muy largo para que la relación estadística pueda ser significativa,

fiable y validada. En este trabajo se utilizó un método intermedio entre los dos, con una representación dinámica del balance hídrico del sistema suelo-cultivo, y un método estadístico para la estimación final de los rendimientos.

4. Hay factores socio culturales que actúan como restricciones a la adaptación como la falta de gestión de riesgo, la resistencia a la innovación, la aversión al riesgo y también hay limitantes estructurales que actúan como barreras a los cambios en prácticas o tecnologías de producción.
5. Los eventos climáticos más relevantes por los riesgos que implican para la producción son el exceso de lluvias, la sequía, olas de calor, heladas, tormentas, vientos y granizo.

En 2009 el INIA publicó una serie de estudios sobre cambio climático en Uruguay y sus posibles impactos y sugirió posibles medidas de adaptación a ser tomadas en el sector agropecuario.² El estudio muestra como los cambios observados o estimados en las variables climáticas estudiadas, impactan en la producción de pasturas, arroz y cultivos de secano. El estudio concluye que tanto las lluvias como la temperatura aumentarían hacia 2050 y eso determinaría un aumento o disminución de los rendimientos de la soja y el maíz según el modelo climático utilizado, mientras que los del trigo no mostrarían cambios significativos en ningún caso. En cuanto al arroz, los resultados fueron diferentes según la región considerada. Al noroeste y noreste del país no se producirían cambios relevantes de la productividad, al tiempo que los rendimientos en la zona sureste aumentarían.

En 2013 la Unidad de Sostenibilidad y Cambio Climático (USyCC) de la OPYPA del MGAP publicó los resultados de una profunda revisión y análisis de los desafíos de adaptación de la agricultura al cambio climático, producto del proyecto FAO TCP/URU/3302.³ Esta publicación es una plataforma para el diseño de políticas basadas en evidencia científica y aporta elementos fundamentales para atender las vulnerabilidades de la producción agropecuaria.

Por otra parte, los diálogos de adaptación convocados por el PNA-Agro (Jones, C. y Balian, C. 2017) sirvieron para identificar y sopesar impactos y desafíos desde la perspectiva de actores y referentes de cada sector.

Agricultura de secano

De acuerdo al análisis de sensibilidad y capacidad adaptativa del CIRCVC-UDELAR, los eventos climáticos que causan mayores pérdidas para la agricultura de secano son las sequías y las heladas.⁴ Las consultas realizadas durante el proceso de elaboración del PNA-Agro coinciden en identificar para agricultura de secano al déficit hídrico y las sequías como causantes de reducción de rendimiento en cultivos de verano y el exceso hídrico por su efecto sobre las operaciones de siembra y cosecha, la incidencia de plagas y enfermedades y la pérdida de calidad sobre cultivos de invierno.

² Cambio climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario. A. Giménez, J. P. Castaño, W. E. Baethgen, B. Lanfranco Serie Técnica N° 178 INIA, 2009. El estudio utilizó el modelo de proceso DSSAT y consideró los modelos de circulación general HADCM3, ECHAM4, GFDL-R30 y CSIROmk4 y contempla un escenario de gases de efecto invernadero medio y alto.

³ Clima de Cambios. Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Resultado del proyecto TCP/URU/3302. Nuevas Políticas para la Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático MGAP, FAO 2013.

⁴ Clima de Cambios, Nuevos desafíos de Adaptación en Uruguay. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la agricultura de secano y arroz frente al cambio climático. Centro Interdisciplinario en Respuesta al Cambio y la Variabilidad Climática de la Universidad de la República TCP/URU/3302, MGAP-FAO 2013.

El análisis de rendimientos de maíz, soja y trigo con las variables climáticas más importantes en la determinación de rendimiento bajo la oscilación ENOS muestra que es posible reducir la sensibilidad y aumentar la capacidad adaptativa en la agricultura de secano utilizando los pronósticos ENOS para ajustar fechas de siembra, elección de cultivares y estrategia de fertilización nitrogenada.⁵ Estrategias para gestionar el riesgo climático como la diversificación de cultivos, el uso de seguros climáticos, la diversificación geográfica y el riego son estrategias complementarias para reducir la vulnerabilidad.

Arroz

El arroz, que se cultiva bajo riego, tiene retos diferentes a la agricultura de secano. En los años con déficit de lluvias y por lo tanto mayor heliofanía y temperatura en etapas críticas de la determinación del rendimiento, se observa mayor producción en todas las zonas de cultivo. En contraposición, las lluvias ocasionan demoras en la preparación de tierras y atrasos en la siembra y menor rendimiento y calidad de grano por deficiencia en horas de luz y temperatura.

Las variables que pesan sobre la sensibilidad del cultivo de arroz no sólo tienen que ver con factores climáticos. La tenencia de la tierra y del agua, la historia previa de la chacra y la superficie de cultivo y sistemas de siembra y laboreo también afectan el grado de vulnerabilidad ante el clima. Los productores más sensibles y con menor capacidad adaptativa son los de menor escala de producción y aquellos que son arrendatarios de tierras y/o agua para riego, ya que tienen menor flexibilidad para la toma de decisiones.⁶

Tanto para agricultura de secano como para arroz bajo riego Giménez *et al.* (2009)⁷ identificaron el riesgo de aumento de incidencia de enfermedades. El desarrollo de programas de mejoramiento para incorporar resistencia genética es una estrategia para adaptarse a este riesgo.

Horticultura

Para la producción hortícola no hay estudios locales de sensibilidad al cambio y variabilidad climática. Durante las actividades de consulta para la elaboración del PNA-Agro se identificaron diferencias de acuerdo al sistema de producción. Los cultivos realizados a cielo abierto y sin riego son más sensibles a la falta y exceso de lluvias y a las heladas agro-meteorológicas. Los cultivos realizados bajo cubierta son más sensibles a eventos extremos, ya que cuando provocan pérdida de cultivos también ocasionan pérdidas de inversiones en infraestructura. Las características de las unidades de producción son factores que aumentan la sensibilidad y disminuyen la capacidad adaptativa especialmente en productores familiares de pequeña escala.

La horticultura en Uruguay está localizada en dos regiones principales, al norte y sur del país. Durante los diálogos también se señaló que, considerando las tendencias climáticas que indican menor incidencia de heladas y aumento de temperatura, es posible que

⁵ Ibidem.

⁶ Ibidem.

las ventajas comparativas de la horticultura del norte del país, que actualmente logra producir y llegar al mercado más temprano que la zona sur, puedan desaparecer. Esto provocaría pérdidas de competitividad que resultan en mayor vulnerabilidad.

Además de los productos antes mencionados, los diálogos de adaptación convocados por el PNA-Agro también contemplaron al sector ganadero, forestal, frutícola, vitivinícola y pesquero. Los resultados no se comentan aquí ya que dichos sectores no fueron analizados en este estudio.

Durante las consultas para la elaboración del PNA-Agro se coincidió en priorizar sistemas de producción sostenibles y desarrollo de estándares de infraestructura adaptada al cambio climático. Se destacó la importancia estratégica de desarrollar sistema de información climática a escalas locales que permitan a los productores desplegar medidas para disminuir los efectos de los eventos climáticos y continuar fortaleciendo herramientas para el manejo integrado de plagas y enfermedades. Los seguros como herramienta de gestión de riesgo fueron valorados positivamente, pero se puntualizó que actualmente el alcance y cobertura de los seguros disponible no es suficiente. También se identificó la importancia de fortalecer la participación de productores en la cadena de valor para atenuar la vulnerabilidad asociada a las variaciones de oferta de productos debidas al clima.

Otro de los estudios realizados por la USyCC (Balian, C. *et al.*, 2018) incorporó la modelización de riesgos climáticos en una evaluación de costo beneficio social de la alternativa de riego intermitente en arroz y para eso investigó previamente la relación entre variables climáticas y los rendimientos del cultivo. El mismo identificó a la heliofanía como uno de los principales factores determinantes de la productividad y utilizó la temperatura máxima como su proxy, ya que no se encontraban disponibles proyecciones para la primera variable.

Por otra parte, se han realizado varias tesis de maestría que estudian la relación entre el clima y los rendimientos. Una de ellas es la de García, F. (2012) que se centró en los cultivos de trigo y sorgo. La misma concluye que el clima incide fuertemente en la productividad de dichos cultivos, aunque de forma diferenciada, según el tipo de suelo y el manejo realizado. En tanto, Borges, M. (2018) estudió el comportamiento de los rendimientos de la soja en función de factores climáticos y diversas características del suelo. Sus resultados apuntan a que el cambio climático tendría un efecto negativo en los rendimientos de ese cultivo en Uruguay en el largo plazo, fundamentalmente debido a que el aumento de la demanda de agua, provocado por mayores temperaturas, sería algo mayor al incremento esperado de la oferta.⁷ Continuando en el ámbito de la investigación, cabe comentar que también se han realizado otros estudios relacionados a esta temática tanto en la UdelaR como en el INIA, además de los ya mencionados.

En suma, si bien se ha desarrollado una vasta literatura hasta el momento sobre clima y agricultura, la misma se ha focalizado fundamentalmente en explicar la relación histórica entre rendimientos y variables climáticas. Sin embargo, todavía no hay muchos estudios que analicen los posibles impactos futuros del cambio climático en la productividad de los principales cultivos. Es por eso que este estudio trata de cerrar esa brecha, al contribuir en el entendimiento de los potenciales cambios climáticos y de su incidencia en la agricultura.

⁷ Este estudio considera el modelo de circulación general CCSM4 y contempla un escenario de gases de efecto invernadero medio y alto.



4. Metodología

4.1 Generalidades Modelación de los Impactos del Cambio Climático en el Sector Agropecuario

El sistema de Modelación de los Impactos del Cambio Climático en el Sector Agropecuario (MOSAICC) es una plataforma desarrollada por FAO para evaluar de forma integrada los efectos del cambio climático en el sector agropecuario, el sistema hidrológico y la economía (con foco en la seguridad alimentaria). El análisis se puede realizar tanto a nivel nacional como regional o de puntos/lugares específicos.

4.2 Componente climático

Antes de evaluar los impactos del cambio climático en distintas dimensiones es necesario estudiar cuáles son los cambios esperados en las variables climáticas. En ese sentido, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) publica distintos modelos de proyección, conocidos como Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) que son expresiones matemáticas de cómo funciona el sistema climático global. A su vez, para cada modelo climático se definen distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP, también por sus siglas en inglés), que contemplan diferentes supuestos respecto a la futura evolución de la población, del crecimiento mundial y del uso de recursos fósiles. Existe un escenario optimista, de menor calentamiento global y en el otro extremo existe un escenario conservador o de “mantener las cosas como están”. Estos escenarios son el RCP 2.6 y el 8.5 respectivamente y además se presentan otros escenarios intermedios como el RCP 4.5 y el 6.0.

Como las proyecciones climáticas que surgen de estos modelos y escenarios se construyen a partir de la interpretación de cómo funciona el sistema global, no necesariamente contemplan las condiciones regionales y tampoco consideran la información recogida en las estaciones meteorológicas locales. Es por eso que, para utilizar los datos a pequeña escala o escala regional / local es necesario utilizar un procedimiento llamado “reducción

de escala” de las proyecciones globales.⁸ Como se comentó anteriormente, ese trabajo ya fue realizado en la primera parte de este estudio y en la sección 5.2 se encuentra un resumen de los resultados obtenidos.

4.3 Componente de cultivos

Debido a que el análisis realizado en Uruguay se centró en los impactos del cambio climático en el sector agropecuario, en este trabajo solo se describe el componente de cultivos de MOSAICC y no se considera el componente hidrológico ni económico.

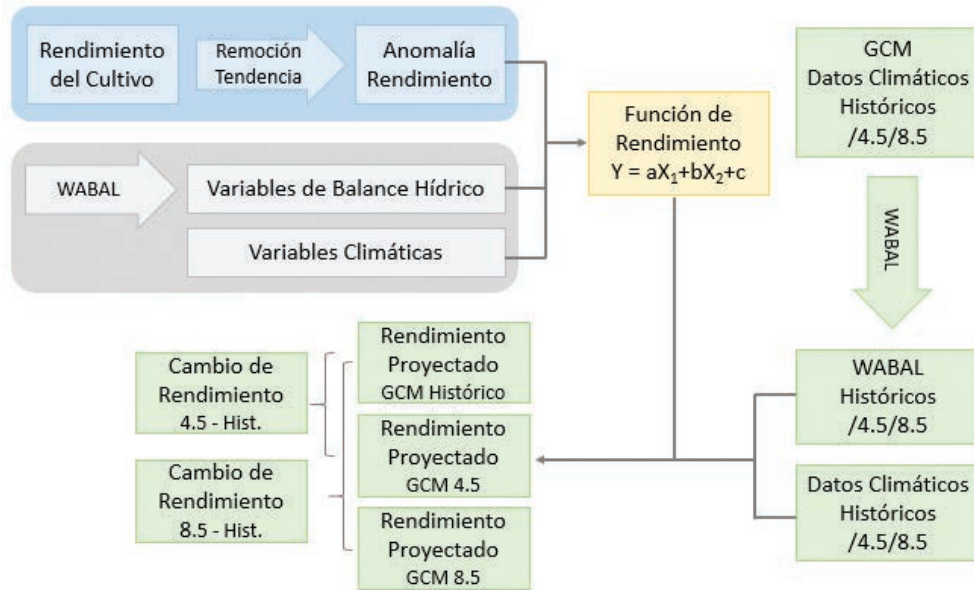
La metodología de evaluación de impactos climáticos en agricultura es la siguiente:

1. Obtener las series históricas de los rendimientos de los cultivos que se quieren analizar y extraer la tendencia de largo plazo y otros comportamientos no asociados al clima (como, por ejemplo, quiebres pronunciados en la serie debido a la introducción de un nuevo sistema de producción como el riego, la siembra directa, entre otros).
2. Remover la tendencia para calcular la anomalía. Esto es, calcular la diferencia entre el valor observado del rendimiento y el valor tendencial, para ver qué tan apartado estuvo el valor real respecto a lo que se esperaba, de acuerdo a la tecnología prevaleciente.
3. Se asume que la tendencia obtenida en el punto 1 se vincularía principalmente a cambios tecnológicos, mientras que los desvíos calculados en el punto 2 se explicarían mayormente por factores climáticos. En ese marco, el siguiente paso consiste en estudiar la correlación existente entre la anomalía y el clima.
4. Con los datos climáticos observados, se estima una regresión (función de rendimiento) que cuantifica la relación entre los desvíos de los rendimientos y las variables climáticas (temperatura promedio, mínima, máxima y lluvias) y de balance hídrico que surgen de la función WABAL (se explican más adelante). Estas dos clases de variables (predictores) pueden aparecer en la regresión cómo promedios / acumulados a lo largo de todo el ciclo del cultivo, o eventualmente referidas solo a una época particular de ese ciclo.
5. Finalmente, para estimar los impactos del cambio climático en los rendimientos se aplica la función de rendimiento previamente calculada a los datos de clima modelizados pasados y futuros (para los distintos modelos y escenarios climáticos) y de la diferencia entre futuro y pasado de los resultados se obtiene el cambio esperado en la productividad de los cultivos.

El próximo diagrama ilustra las principales etapas mencionadas previamente.

⁸ La reducción de escala es una técnica que permite extraer información a escala local a partir de modelos de mayor escala. Las dos técnicas más conocidas son la estadística y la dinámica. La primera se basa en el establecimiento de relaciones estadísticas entre variables atmosféricas de gran escala y variables climáticas de escala regional, mientras que la segunda se basa en la complementación de los modelos climáticos globales con modelos climáticos regionales.

Figura 1. | Principales pasos de la metodología



Fuente: FAO.

- Por último, para evaluar si los cambios esperados en la anomalía son o no significativos, se compara la diferencia entre la anomalía esperada futura y la anomalía esperada en el período histórico simulado con el desvío estándar histórico simulado y se aplican las siguientes reglas; si la variación es menor a un desvío entonces el cambio no es significativo, si la variación se encuentra entre uno y dos desvíos entonces el cambio es significativo y si la variación es aún mayor entonces el cambio se define como muy significativo. Esta regla de decisión se ve reflejada en el siguiente esquema.

Figura 2. | Determinación de la significancia



Fuente: Elaborado en base a datos de FAO.

WABAL - Modelo de Balance Hídrico

Un aspecto fundamental de la plataforma MOSAICC es que la misma permite calcular el balance hídrico para cada cultivo, un factor que es considerado de gran importancia para explicar el comportamiento de los rendimientos. Para estimar el balance hídrico utiliza la función WABAL, que toma en cuenta datos climáticos de frecuencia decádica (cada diez días), propiedades del suelo (capacidad de almacenaje de agua, CAA⁹) y de fenología de los cultivos (inicio y duración del ciclo, kc, entre otros). La ecuación principal del balance hídrico, que calcula el agua disponible (AD) para el cultivo, se muestra a continuación.

⁹ Se tomaron los datos de la base mundial de suelos armonizados (HWSD), que tiene una escala de 1:5.000.000 (www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/). Existen datos locales más precisos, pero no fue posible incorporarlos en la plataforma por razones que se explican más adelante.

- $AD(t_i) = AD(t_{i-1}) + \text{Precipitaciones}(t_i) + \text{Riego}(t_i) - \text{ETc}(t_i) - \text{Pérdidas}(t_i)$.

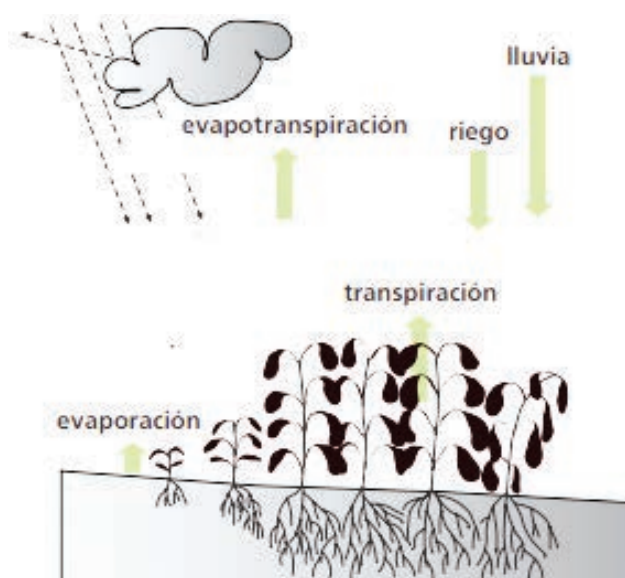
En los casos en que $AD < 0$, el resultado se fija en 0 y si $AD > CAA$, el resultado se fija en CAA.

ETc (Evapotranspiración del Cultivo) = Kc (Coeficiente del Cultivo) * ETo (Evapotranspiración del Cultivo de Referencia).

$ETo = (0,0023 * (\text{Temperatura promedio} + 17,8) * (\text{Temperatura máxima} - \text{Temperatura mínima}))^{0,5} * \text{Radiación Solar}$. Vale aclarar que no existen proyecciones para la variable radiación solar, por lo que la misma se considera constante en el futuro respecto a los registros históricos en los ejercicios realizados en este estudio.

La figura que se presenta a continuación muestra los flujos de ingreso y salida de agua utilizados en el cálculo de balance hídrico.

Figura 3. | Flujos de ingresos y egresos de agua en el modelo de balance hídrico



Fuente: FAO. Allen, R.G. et al. (1998).

Una vez que se "corre" la función WABAL, se generan las siguientes variables relacionadas al balance hídrico:

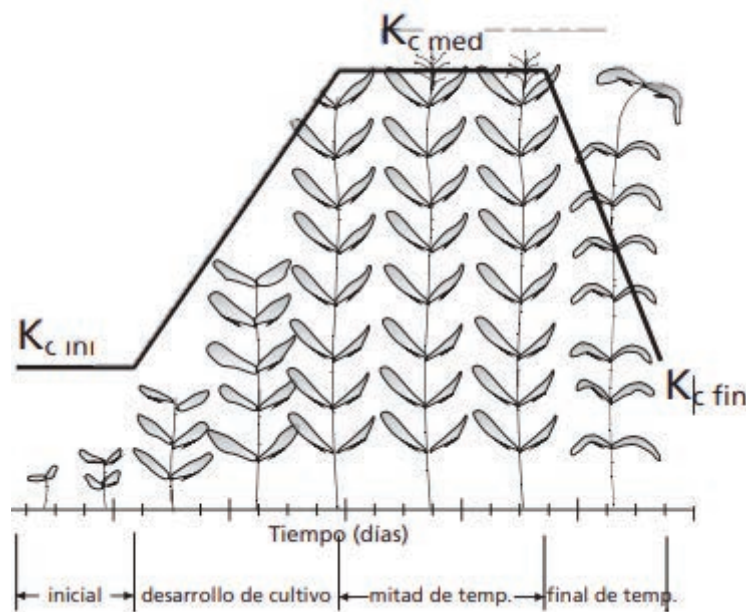
- Evapotranspiración Real (ETA) en mm.
- Déficit hídrico (DEF) en mm.
- Exceso hídrico (EXC) en mm.
- Requerimiento Total de Agua (TWR) en mm.
- Índice de Satisfacción de Agua (WSI raw) en por ciento, que expresa el porcentaje de necesidad de agua del cultivo que ha sido satisfecho.
- Índice de Satisfacción de Agua Corregido (WSI corrected) en por ciento, que corrige el índice anterior para tener en cuenta el exceso de agua.

Los primeros tres indicadores se calculan tanto para el ciclo completo del cultivo como para cada una de las etapas de desarrollo, mientras que los restantes solo se calculan para el ciclo entero.

En cuanto a las etapas de crecimiento, MOSAICC define las siguientes cuatro;

- Inicial: período que se extiende desde la siembra hasta que el cultivo cubre el 10 por ciento del suelo.
- Desarrollo: esta fase comienza cuando termina la anterior y dura hasta que el terreno ha sido cubierto en un 70 por ciento - 80 por ciento.
- Media temporada: período que se extiende hasta que el cultivo alcanza la madurez, lo que incluye la floración y el llenado de granos.
- Temporada tardía: corresponde al período entre que termina la tercera fase y que se cosecha el cultivo.¹⁰ La siguiente imagen ilustra dichas etapas.

Figura 4 | Etapas de crecimiento utilizadas en Mosaicc



Fuente: FAO. Allen, R.G. *et al.* (1998) *et al.* (1998).

¹⁰ www.fao.org/3/S2022E/s2022e07.htm





©FAO/ITP/edrich

5. Aplicación en Uruguay

5.1 Grupo de trabajo

El equipo de trabajo para aplicar la plataforma MOSAICC en Uruguay se conformó de la siguiente manera.

- Equipo técnico FAO Roma:
Maria Raffaella Vuolo¹¹
Mariko Fujisawa¹²
- Equipo técnico Uruguay:
Cecilia Jones (OPYPA - MGAP)¹³
Magdalena Borges (OPYPA - MGAP)¹⁴
Florencia Hastings (DGRN - MGAP)¹⁵
Gonzalo Rizzo (UdelaR)¹⁶
Federico Campos (INIA)¹⁷
- Apoyo SIG:
Gabriel García (INIA)¹⁸

Colaboradores:

Andrés Feuer (INIA)¹⁹
Adrián Cal (INIA)
Rafael Navas (INIA)
Julieta Souza (MGAP)
Akira Saito (INIA)

¹¹ raffaella.vuolo@fao.org

¹² mariko.fujisawa@fao.org

¹³ cecilia.jones@fao.org Unidad de Sostenibilidad y Cambio Climático, OPYPA, MGAP.

¹⁴ maborges@mgap.gub.uy Unidad de Sostenibilidad y Cambio Climático, OPYPA, MGAP.

¹⁵ fhastings@mgap.gub.uy División de Agua y Ambiente, DGRN, MGAP.

¹⁶ gonrizzo@gmail.com Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, UdelaR.

¹⁷ andresfeuer@hotmail.com INIA.

¹⁸ fefocampos2003@hotmail.com Estación Experimental del Este, INIA.

¹⁹ ggarcia@inia.org.uy Unidad de Agroclima y Sistemas de Información, INIA.

Talleres realizados en 2018:

- Del 16/7 al 19/7 en INIA Las Brujas se realizó un taller con los técnicos en informática para explicar el funcionamiento de la plataforma con el apoyo de Mauro Evangelisti.
- Del 23/7 al 26/7 en INIA Las Brujas se realizó un taller sobre el componente de cultivos de la plataforma MOSAICC con el apoyo técnico de Maria Raffaella Vuolo.
- El 24/9 y 25/9 en MGAP Central se realizó otro taller para evaluar avances y dificultades observadas para aplicar el modelo y también se trabajó en la estructura del informe técnico con el apoyo de Mariko Fujisawa.

5.2 Caracterización climática

Breve descripción del clima local

De acuerdo a un estudio realizado por Castaño *et al.* (2011) con datos climáticos correspondientes al período 1980 - 2009, Uruguay tiene un clima subtropical a templado. La temperatura promedio nacional es de 17,7°C y asciende a 19,8°C en el Norte y a 16,6°C en el Sur. La temperatura mínima y máxima media nacional se sitúan en 12,9°C y 22,6°C y ocurren en Julio y Enero respectivamente. Las lluvias promedio anuales se ubican en un rango de entre 1.200 mm en la zona Suroeste a 1.600 mm en el noreste. En invierno se registra el máximo de lluvias en la región sudeste y este, mientras que el resto del país tiende a tener dos períodos lluviosos, en otoño y primavera.

Sin embargo, hay una variación muy significativa en la cantidad y distribución de las lluvias entre años.²⁰ Los ciclos ENOS²¹ son una fuente adicional de variabilidad en el clima. Para Uruguay las tendencias indican que los años El Niño resultan en un aumento de precipitaciones y los años Niña tienden a ser más secos que lo normal. La influencia en los ciclos ENOS como forzante climático es más marcada en el norte y tiende a debilitarse hacia el sur y sureste del país.

En cuanto a la evolución de las variables climáticas, en base a los registros de Uruguay de 1931 a 2000 se identifican incrementos en las precipitaciones, principalmente en primavera y verano con disminución de las temperaturas máximas medias en verano. Sin embargo, las temperaturas más altas registradas durante los últimos 100 años han ocurrido en los últimos cinco años.²² Asimismo, también se observó un aumento del número de eventos de lluvias severas. Por otra parte, el análisis de los registros 1931 a 2000 evidenció una menor duración del período de heladas agro meteorológicas. Hay menor número de registros de heladas y la temperatura mínima registrada en los días con heladas es mayor.

Cambios esperados en las principales variables climáticas

Como se comentó previamente, para utilizar las proyecciones climáticas que surgen de los modelos de circulación global en estudios nacionales es necesario realizar una reducción de escala. Ese trabajo ya fue realizado en la primera parte de este proyecto. Para el mismo se seleccionaron tres GCMs (MPI, CNRM y CANES) y dos escenarios

²⁰ Caracterización agroclimática del Uruguay 1980 – 2009. Serie Técnica 193 INIA J.P. Castaño, A. Giménez M. Ceroni, J. Furest, R. Aunchayna. 2011.

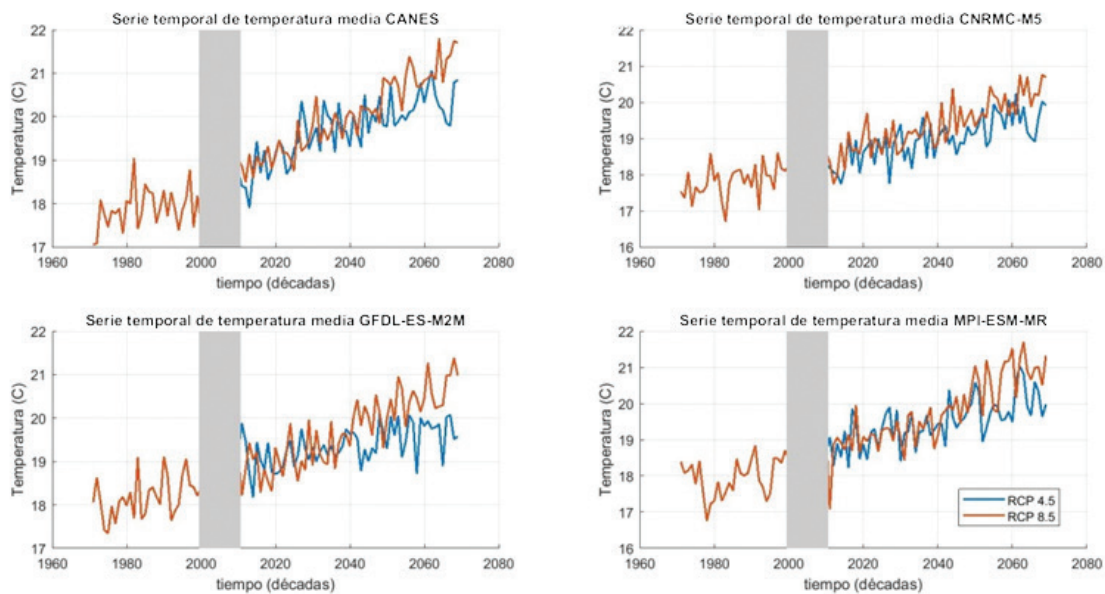
²¹ ENOS: El Niño-Oscilación del Sur

²² Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. FAO-MGAP. TCP URU/3302. 2013 Capítulo 2 Variabilidad climática de importancia para el sector productivo. Bidegain, M.; Crisci, C.; del Puerto, L.; Inda, H.; Mazzeo, N.; Taks, J. y Terra, R.

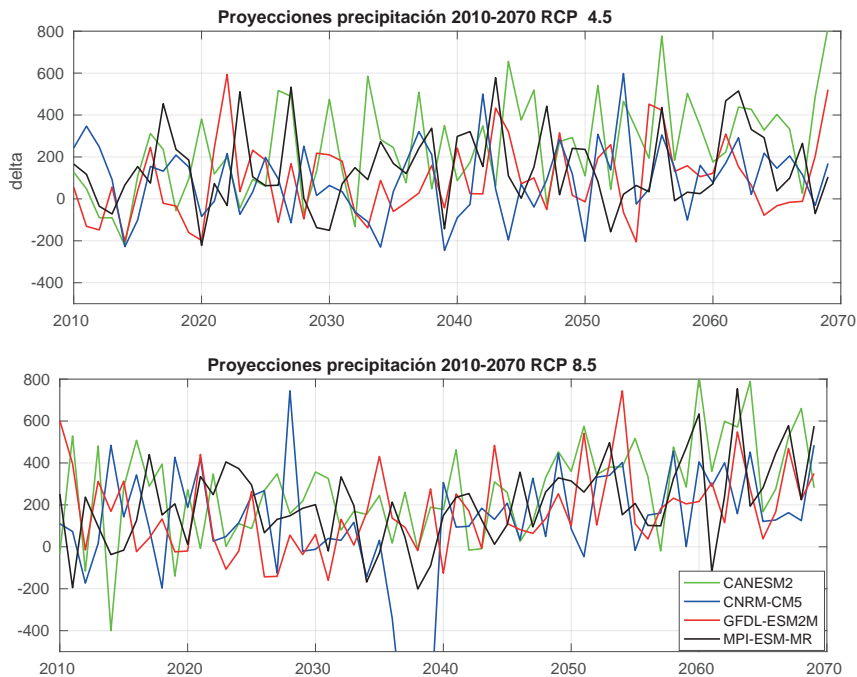
de emisiones de gases de efecto invernadero (4.5 y 8.5) y se trabajó con un horizonte de proyección de mediano y largo plazo, hasta 2040 y 2070 respectivamente. Los principales resultados obtenidos se comentan a continuación.

Se espera un aumento significativo de las temperaturas máximas y mínimas en las temporadas cálida y fría. Esta tendencia sería aún más pronunciada en la temporada fría. A mediano plazo no existe casi diferencia entre los escenarios, pero a largo plazo se observa un mayor cambio en el RCP 8.5. A su vez, observando las proyecciones de precipitación se encontró un aumento para todos los casos, aunque sería más marcado en la temporada cálida. Concretamente, la temperatura media en Uruguay aumentaría entre 1,5°C y 3°C en el largo plazo. En tanto, las lluvias se incrementarían entre 10 por ciento y 25 por ciento en el corto plazo y entre 15 por ciento y 40 por ciento hacia 2070 en primavera y verano, mientras que las subas serían menores en las temporadas frías (de 5-10 por ciento y de 10-30 por ciento en el mediano y largo plazo respectivamente).

Figura 5 | Proyección de temperatura media para los distintos modelos y escenarios



Fuente: Bentancur et al. (2019).

Figura 6 | Proyección de las precipitaciones para los distintos modelos y escenarios

Fuente: Bentancur et al. (2019).

Si se comparan las proyecciones de temperatura mínima y máxima, se puede decir que la amplitud térmica en la temporada fría parecería ampliarse debido a un crecimiento mayor en la temperatura máxima respecto a la temperatura mínima.

Los índices de extremos en general resultan de situaciones de aumento de temperatura. En efecto, se observaría una menor cantidad de heladas, mayor cantidad de olas de calor, un incremento de la temperatura máxima, mínima y media y de las precipitaciones. Estudiando los eventos extremos de precipitación no se pudo llegar a conclusiones claras. Por un lado, se registraría un leve aumento en el número de episodios de lluvia severa (días en los que llueve más de 20mm) en la región sur, mientras que en la región norte se espera una mayor estabilidad. A nivel de temporadas, estos eventos se duplicarían en la temporada cálida en relación a la fría. Por su parte, el indicador de déficit hídrico utilizado refleja que podría darse una disminución de éstos, más acentuada en la temporada fría.

Para todas las variables climáticas estudiadas el modelo *CANES* presenta las proyecciones climáticas más extremas, pudiéndose utilizar este como indicador de los peores escenarios esperables.

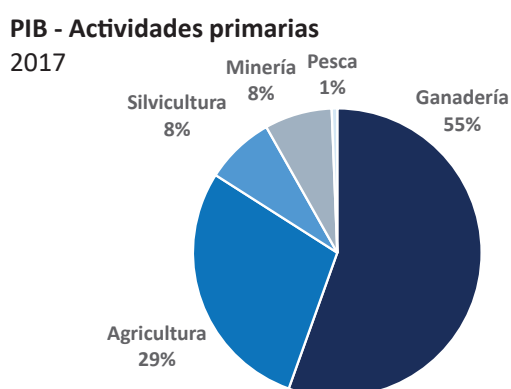
5.3 Cultivos seleccionados

Para seleccionar los cultivos analizados en este estudio se tomaron en cuenta distintos criterios económicos y sociales, para contemplar diferentes aspectos de la producción agrícola. A su vez, también se identificó como otro criterio de selección relevante a la dimensión ambiental (por ejemplo, el impacto de cada actividad en el ambiente), pero ésta no fue considerada debido la escasa disponibilidad de datos vinculados a esa temática.

Criterios económicos

Uno de los criterios más utilizados para evaluar la importancia relativa de un sector en la economía es analizar su contribución a la generación de valor agregado o producto interno bruto (VAB - PIB). De acuerdo a información publicada por el Banco Central del Uruguay (BCU),²³ en 2017 el PIB de las actividades primarias se compuso de la siguiente manera:

Figura 7. | PIB, actividades primarias, 2017.
Peso calculado a partir de valores a precios corrientes



Fuente: Banco Central del Uruguay.

De la gráfica se desprende que el sector que tiene un mayor peso es la ganadería, que aporta un 55 por ciento del valor generado en el sector. En segundo lugar, se ubica la agricultura, con casi un 30 por ciento del total. Le siguen en importancia la silvicultura y la minería, que representan entorno de un 8 por ciento del PIB cada uno. Considerando estas cifras (y los datos de exportaciones y de usos del suelo que se comentan más adelante), sería relevante evaluar la incidencia del clima en la producción ganadera (a través de las pasturas), pero dicho análisis requiere la utilización de otras herramientas adicionales a MOSAICC (como el sensado remoto), que hubieran demandado un mayor tiempo de procesamiento que el disponible para realizar este estudio. Dicho análisis además implicaría contar con una serie histórica de rendimientos de pasturas bastante larga, que actualmente no está disponible.

En ese marco, este trabajo se enfocó en el impacto del clima en el subsector agrícola, que puede ser analizado con las herramientas ya incorporadas en la plataforma. Sin embargo, el BCU no dispone de información de PIB desagregada al interior de ese subsector para identificar cuáles son los cultivos más relevantes. Por lo tanto, también se analizaron otros indicadores, tales como las exportaciones o la superficie destinada a cada producto.

En cuanto a las ventas en el exterior, según datos divulgados por Uruguay XXI,²⁴ en 2017 los principales productos de exportación fueron la carne, la celulosa y la soja (ver Figura 8).

²³ [www.bcu.gub.uy/Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Presentacion por ciento20Cuentas por ciento20Nacionales.aspx](http://www.bcu.gub.uy/Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Presentacion%20por%20ciento20Cuentas%20por%20ciento20Nacionales.aspx)

²⁴ www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/53bf87c7047ac8cc0483a732c502c49524837aad.pdf

Figura 8 | Exportaciones por producto - 2017. En millones de USD corrientes

Exportaciones - 2017	% por producto	Millones USD
Carne bovina	17%	1 517
Celulosa	15%	1 327
Soja	13%	1 189
Lácteos	7%	591
Concent. de bebidas	5%	495
Arroz	5%	448
Madera	4%	329
Subprod. Cárnicos	3%	251
Cueros	3%	244
Prod. Farmacéuticos	3%	240
Otros	27%	2 427
Total		9 058

Fuente: Uruguay XXI.

En relación a la superficie ocupada por cada actividad, los datos de la Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA) del MGAP correspondientes al censo de 2011²⁵ mostraron que más de un 80 por ciento de la superficie agropecuaria estaba destinada a la ganadería, mientras que un 10 por ciento correspondía a agricultura y en tercer lugar se ubicaba la forestación, con un 7 por ciento de las tierras.

A su vez, dentro del área agrícola el principal cultivo de verano fue la soja, que ocupó un 80 por ciento de la superficie total en la zafra 2017/18 (unas 1,1 millones de hectáreas), según datos de la encuesta agrícola realizada también por DIEA.²⁶ Por su parte, el arroz que se cultiva bajo riego abarcó algo más del 10 por ciento del área, mientras que la superficie remanente fue ocupada por maíz y sorgo. Por su parte y pese a las significativas caídas que ha mostrado en los últimos años, el principal cultivo de invierno continúa siendo el trigo, que ocupó una superficie de aproximadamente 0,2 millones de hectáreas en el ejercicio considerado, representando algo más del 40 por ciento de la superficie. Por detrás del trigo se situó la cebada, con un 34 por ciento del área.

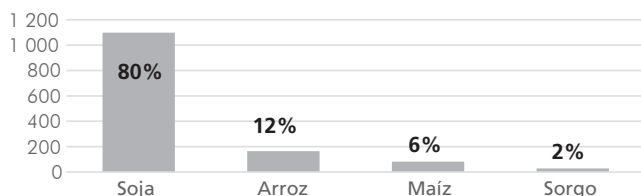
²⁵ www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/53bf87c7047ac8cc0483a732c502c49524837aad.pdf

²⁶ www2.mgap.gub.uy/DieaAnterior/regiones/Regiones2015.pdf

Figura 9 | Usos del suelo agropecuario (gráfica de la izquierda) y área sembrada con cultivos de verano y de invierno (gráficas de la derecha)

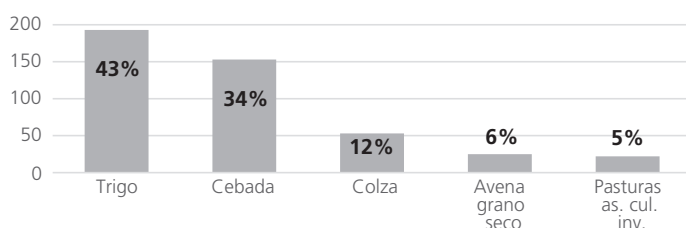
Área sembrada con cultivos de verano

Ejercicio 2017/18. Miles de hectáreas y %



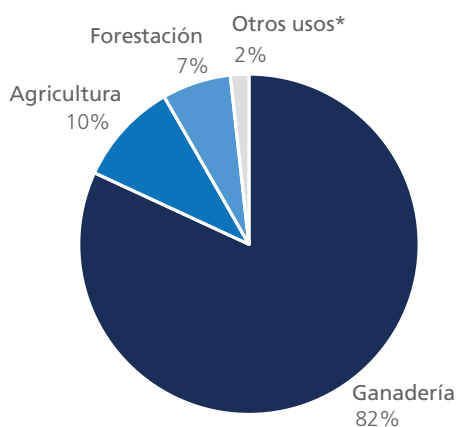
Área sembrada con cultivos de invierno

Ejercicio 2017/18. Miles de hectáreas y %



Usos del suelo agropecuario

Censo 2011



* Tierra arada sin sembrar y tierras improductivas

Criterios sociales

Los criterios sociales considerados fueron la contribución de las actividades a la generación de empleo y el porcentaje de productores familiares. Respecto al primer factor, en la tabla 1 se pueden observar los datos de empleo por subsector de actividad²⁷ así como el ratio número de trabajadores / área ocupada, a modo de analizar la intensidad en el uso del factor trabajo de cada actividad en relación a su tamaño. En cuanto al porcentaje de productores familiares en cada actividad agropecuaria, los resultados también se muestran en la siguiente tabla.

²⁷ www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/informe_requerimientos_de_empleo_agropecuario_0.pdf

Tabla 1 | Empleo por actividad agropecuaria y ratio empleo / área ocupada (tabla de la izquierda). Tipología de productores según actividad principal del predio (tabla de la derecha)

Empleo prom. 2013-16	Cantidad de trabajadores	Ratio empleo / hectáreas
Agricultura	37 664	
Cultivos (s/arroz)	7 333	0,01
Arroz	3 297	0,02
Horticultura	14 619	0,5
Fruticultura	12 415	0,4
Ganadería	69 684	
De carne	55 919	0,004
De leche	13 765	0,02
Forestación (inc. ss. forestales)	12 011	0,01

Fuente: OPYPA en base a Encuesta Continua de Hogares (ECH) - INE, DIEA y DIGEGRA.

Actividad principal del predio - 2011	Tipología productores comerciales		
	Familiares	Medios	Grandes
Forestación	14%	58%	28%
Citricultura	52%	27%	21%
Otros frutales	73%	24%	4%
Viticultura	79%	17%	3%
Horticultura	92%	7%	1%
Cereales y oleaginoso	39%	36%	25%
Arroz	19%	41%	40%
Viveros y plantines	57%	20%	23%
Vacunos de carne	60%	31%	9%
Vacunos de leche	73%	18%	9%
Ovinos	68%	28%	4%

Fuente: OPYPA en base al censo agropecuario de 2011, DIEA.

En cuanto a la generación de puestos de trabajo, el sector ganadero es el que emplea más personas, pero esto se debe a que dicha actividad ocupa una porción muy grande de la superficie agropecuaria. En efecto, si vemos el indicador de intensidad en el uso de la mano de obra, en la ganadería de carne solo se emplean 4 personas cada 1.000 hectáreas, siendo el valor más bajo para ese indicador en la comparación con los otros sectores. Por el contrario, los sectores que generan más puestos de trabajo por hectárea son, en primer lugar, la horticultura y la fruticultura y luego se ubican la lechería y la producción de arroz, seguidos de otros cultivos y la forestación. En línea con estos datos y tal como se puede apreciar en el cuadro de la derecha, en las actividades hortifrutícolas predomina el trabajo familiar ante otras tipologías de trabajo.

Selección

Contemplando todo lo anterior, los cultivos seleccionados por su importancia económica fueron la soja, el arroz, el trigo y el maíz, mientras que por criterios sociales se seleccionó uno de los productos hortícolas más relevantes, la papa. Esta selección también tuvo en cuenta que los datos necesarios para realizar el estudio (como, por ejemplo, rendimientos) estuvieran disponibles para varios años. Finalmente, también vale recordar que la ganadería no fue contemplada en este estudio dado que requería un estudio más extenso.

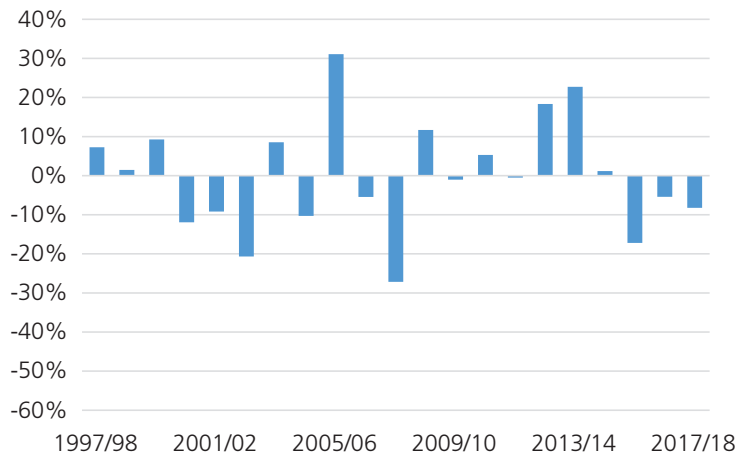
Variabilidad histórica de los rendimientos de los cultivos seleccionados

Históricamente los rendimientos de los cultivos seleccionados han mostrado fuertes fluctuaciones en torno a su tendencia, causando gran inestabilidad en la generación de ingresos de los productores. La evolución tendencial se asocia generalmente a cambios tecnológicos, mientras que la variabilidad se vincula con cambios en las condiciones climáticas. Las siguientes gráficas muestran la volatilidad que se explicaría mayormente por aspectos climáticos.

Figura 10 | Variación porcentual de los rendimientos nacionales (Escala comparable)

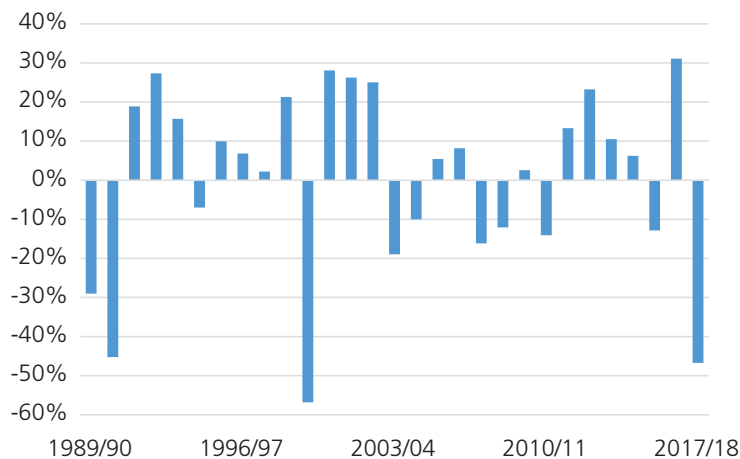
Anomalía Rendimientos de la Papa

En %. (Dato observado - Tendencia) / Tendencia



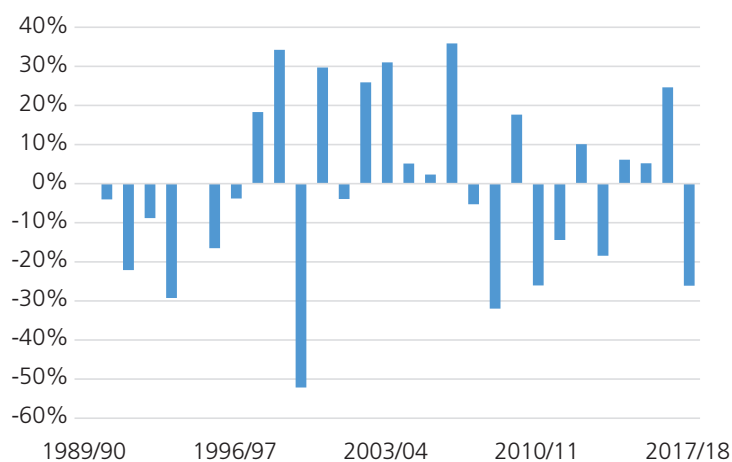
Anomalía Rendimientos de la Soja

En %. (Dato observado - Tendencia) / Tendencia



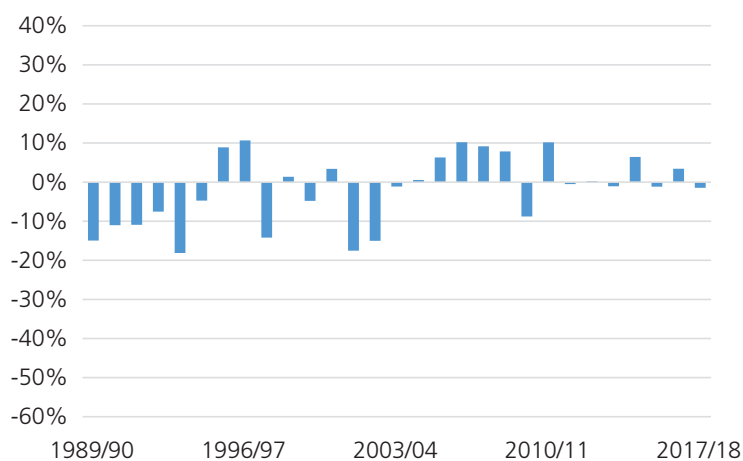
Anomalía Rendimientos del Maíz

En %. (Dato observado - Tendencia) / Tendencia



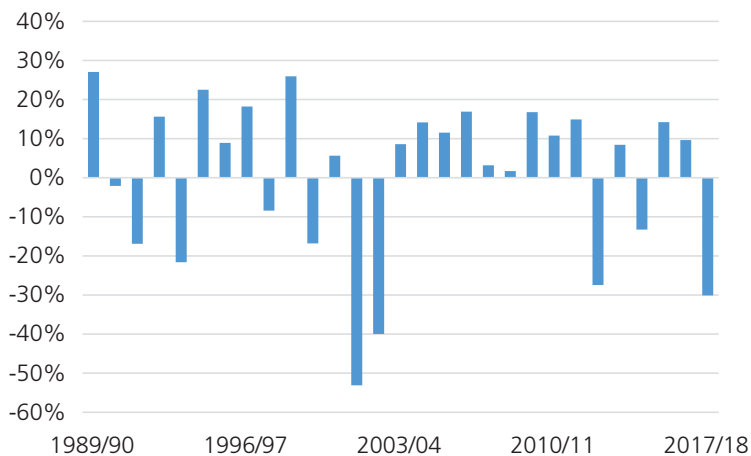
Anomalía Rendimientos del Arroz

En %. (Dato observado - Tendencia) / Tendencia



Anomalía Rendimientos del Trigo

En %. (Dato observado - Tendencia) / Tendencia



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA y ACA.

Las gráficas muestran el desvío de los rendimientos respecto a su tendencia en términos porcentuales (Valor observado - Valor esperado de acuerdo a su tendencia histórica / Valor esperado) para cada cultivo seleccionado para el promedio país. Se puede observar claramente que todos los cultivos han sufrido grandes variaciones a excepción del arroz, cuya productividad ha sido más estable, probablemente debido a que dicho cultivo se desarrolla bajo riego y por lo tanto es menos dependiente de las lluvias. Asimismo, los rendimientos de la papa también fueron más estables que el resto de los cultivos. En este caso y según datos de DIEA (2018), en 2011 aproximadamente un 60 por ciento de la producción de papas se realizaba con riego (MGAP, 2018).

En la siguiente tabla se presentan otras medidas de dispersión de los rendimientos, que también apuntan a una menor volatilidad de los rendimientos del arroz y la papa respecto a los otros cultivos.

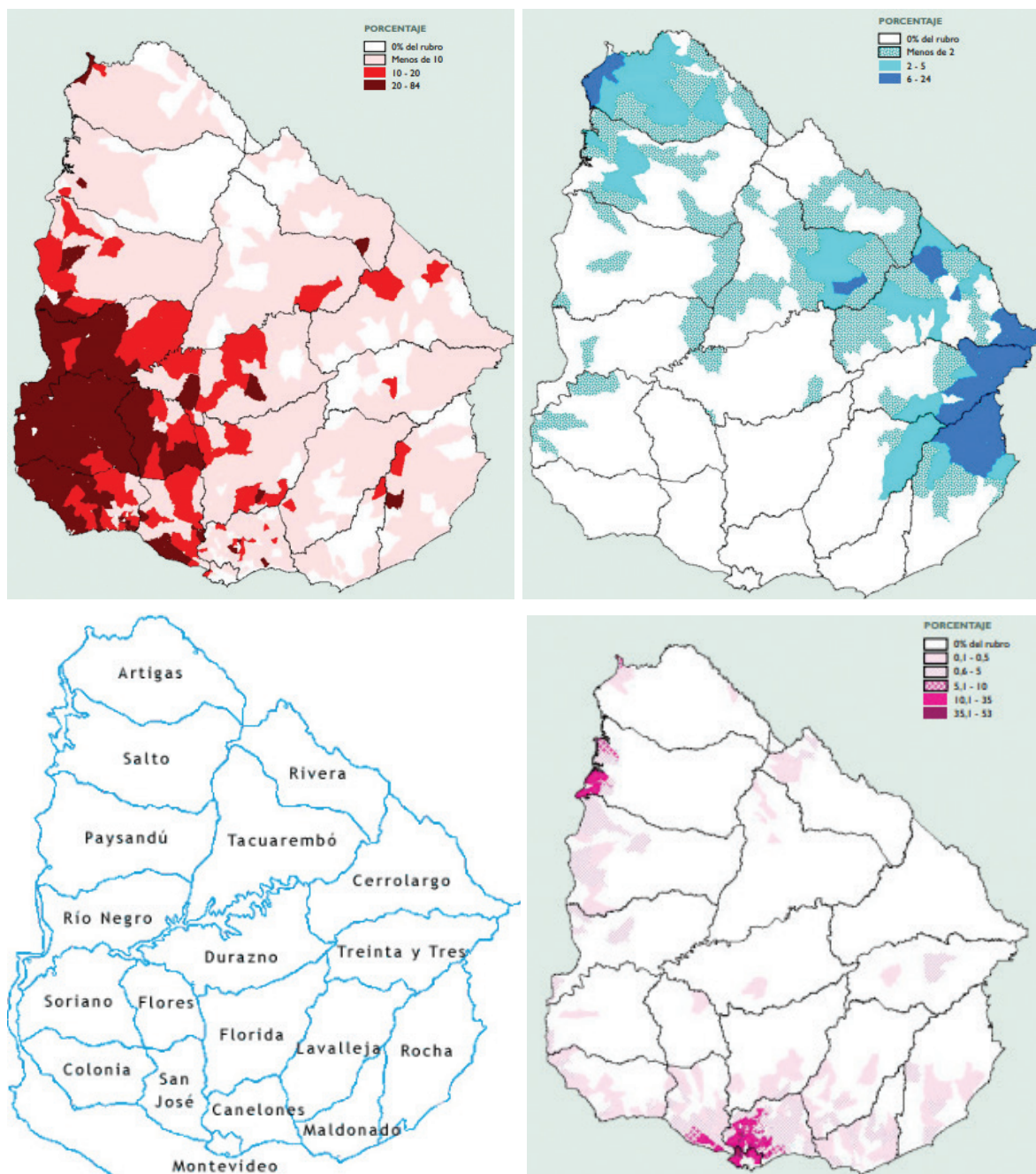
Tabla 2 | Resumen estadístico de las anomalías de rendimiento. Período 1997/98 – 2017/18. Medido en Kg/ha

	Soja	Trigo	Maíz	Arroz	Papa
Desvío estándar	488	676	1.211	1.045	3.153
Media	2 008	2 767	4 477	7 280	17 742
CV (Coeficiente de Variación)*	24%	24%	27%	14%	18%
Mínimo	764	1 149	1 530	5 270	12 900
Mediana	2 105	2 873	4 306	7 698	17 974
Máximo	2 951	3 667	7 136	8 600	23 954
Recorrido (Max-Min)	2 187	2 518	5 606	3 330	11 054

* CV = Desvío estándar / Media

La dispersión de los rendimientos descrita previamente no solo se observa a lo largo de los años (como consecuencia mayormente de la variabilidad interanual de los factores climáticos), sino que también se da a nivel geográfico. En este último caso, no solo incide la heterogeneidad de las características del suelo en Uruguay, sino también el impacto desigual del clima en cada zona (ver sección 5.2). En ese sentido, cabe comentar que la producción de tres de los cultivos seleccionados en este análisis (soja, trigo y maíz) se concentra en el litoral sur y sur-oeste del país (ver mapa de la izquierda), donde los suelos son profundos, de buen drenaje y alta productividad. En tanto, la producción de arroz se ubica principalmente al este y noreste del país (ver mapa de la derecha), donde predominan los suelos de poco drenaje y llanos, condiciones que favorecen la actividad de riego. Finalmente, la producción de papa tiene lugar fundamentalmente al sur del territorio, cerca de los centros más poblados del país. Esta situación se ilustra en los mapas que aparecen a continuación. También se muestran las divisiones administrativas del país (departamentos), a modo de referencia.

Figura 11 | Superficie destinada a la agricultura extensiva de cultivos cerealeros e industriales de secano (arriba a la izquierda) y al arroz (arriba a la derecha), 2011. Superficie destinada a la producción hortifrutícola (abajo a la izquierda) y al arroz (abajo a la derecha), 2000. Departamentos Uruguay (abajo a la derecha).



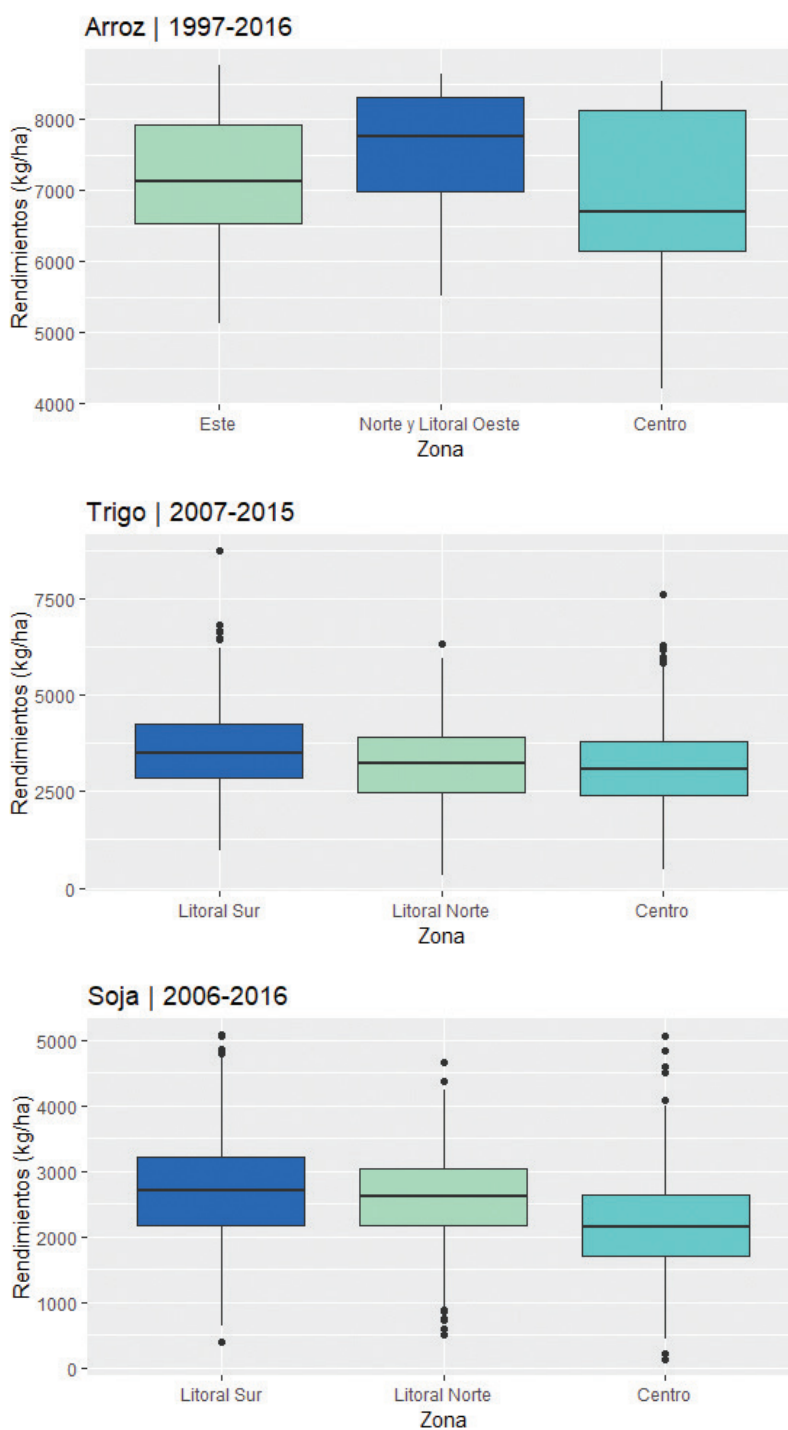
Fuente: Regiones Agropecuarias del Uruguay 2011, DIEA, MGAP.²⁸ Los colores más intensos en muestran las zonas en las que hay un mayor por ciento del área destinada a la actividad indicada.

Como forma de ilustrar la heterogeneidad de rendimientos obtenidos al interior del país, a continuación se muestran los distintos niveles de productividad alcanzados en la zona del Litoral Sur (Soriano, Colonia y San José), Litoral Norte (Paysandú y Río Negro) y Centro (Flores, Florida y Durazno) en los cultivos de secano para los cuales se dispone de

²⁸ www2.mgap.gub.uy/DieaAnterior/regiones/Regiones2015.pdf

datos, soja y trigo (los periodos son diferentes para cada cultivo). Además, se muestran los distintos rendimientos obtenidos en las tres zonas arroceras del país; Este (Treinta y Tres, Cerro Largo, Rocha y Lavalleja), Norte y Litoral Oeste (Artigas, Salto, Paysandú, Río Negro y Soriano) y Centro (Rivera, Tacuarembó y Durazno).

Figura 12 | Dispersión geográfica de rendimientos.
Diagrama de cajas - soja, trigo y arroz

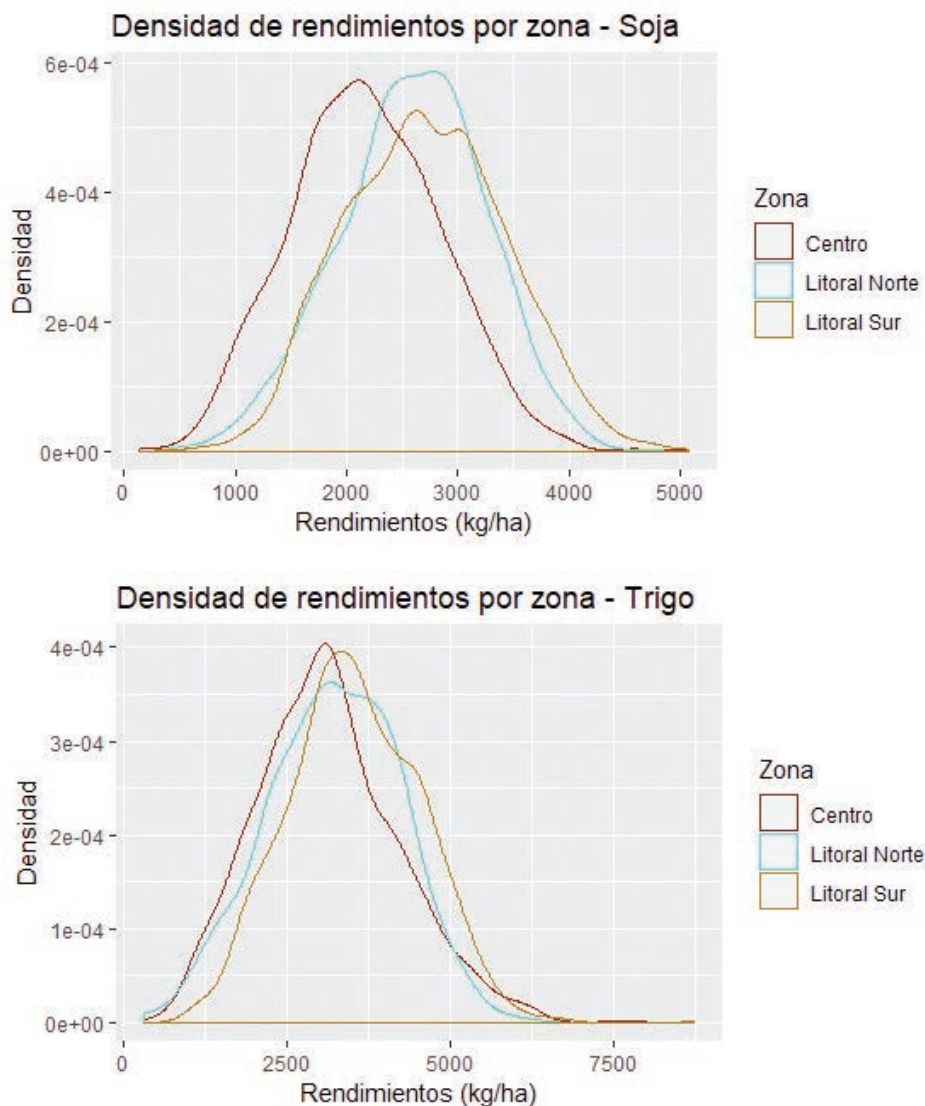


Fuente: MGAP en base a FUCREA (soja y trigo) y DIEA (arroz).

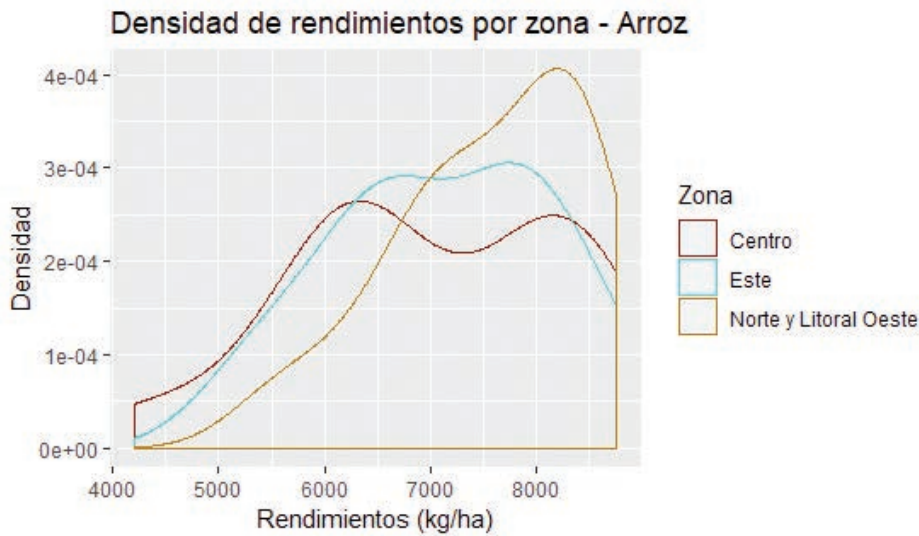
Las gráficas anteriores muestran que tanto en el caso de la soja como del trigo la mediana²⁹ del rendimiento (representada por las barras horizontales) fueron mayores en la zona del litoral sur, mientras que los menores registros se observaron en el centro. La dispersión de los resultados (medida a través del largo del diagrama de caja) no parece ser tan marcada entre las distintas regiones para esos dos cultivos. En el caso del arroz, los rendimientos obtenidos parecen tener una mayor dispersión entre las zonas analizadas que en el caso de los dos cultivos anteriores. Además, la zona que alcanza un mayor valor de la mediana es el Norte y Litoral Oeste, en tanto que el menor valor se registró en la zona centro del país.

Otra forma de visualizar la dispersión de la productividad de los cultivos es a través de las funciones de densidad (gráfica 13), que muestran la distribución de los datos en un período de tiempo específico. Los picos muestran en qué valores se concentran los datos, mientras que las colas muestran otros valores que también fueron observados, pero en menor frecuencia. Esto se puede visualizar en las siguientes gráficas.

Figura 13 | Dispersión geográfica de rendimientos. Función de densidad - soja, trigo y arroz



²⁹ Valor central en un conjunto de datos ordenados.



Fuente: MGAP en base a FUCREA (soja y trigo) y DIEA (arroz).

Área de estudio

Teniendo en cuenta lo comentado en el apartado anterior, las zonas de relevancia no son las mismas para todos los cultivos. Es por eso que en este trabajo se definieron distintas “áreas de estudio”; una para la soja, el trigo y el maíz, otra para el arroz y otra para la papa. El criterio que se utilizó para definir las fue que el área seleccionada represente aproximadamente un 10 por ciento de la superficie total del cultivo. A su vez, en el caso del arroz se definieron subregiones y en el caso del trigo también se trabajó con un punto concreto dentro del territorio, correspondiente a una estación experimental de INIA, donde se encuentran disponibles tanto datos climáticos como de rendimiento de cultivos.

Cabe aclarar que los datos climáticos correspondientes a las zonas definidas aquí (obtenidos mediante interpolación por el método de Aurelhy y Kriging, en base a datos de estaciones meteorológicas de INIA e INUMET) fueron utilizados como variables explicativas en las regresiones construidas para estimar la anomalía de los rendimientos.

En la siguiente tabla se muestran los departamentos considerados en las áreas de estudio de cada cultivo, que fueron utilizadas para trabajar con los rendimientos promedio nacionales.

Tabla 3 | Área de estudio de cada cultivo

Cultivo	Departamentos comprendidos dentro del área de estudio	% Área
Soja - Trigo – Maíz	Soriano, Río Negro, Paysandú, Colonia, Flores, Durazno, San José y Florida.	~ 90%
Arroz	Treinta y Tres, Cerro Largo, Rocha, Lavalleja, Artigas, Salto, Paysandú, Río Negro, Soriano, Rivera, Tacuarembó y Durazno.	100%
Papa	San José, Colonia, Canelones, Flores, Soriano, Montevideo, Durazno y Florida.	~ 90%

Tabla 4 | Arroz - Subregiones

Subregión	Departamentos comprendidos	% Área
Este	Treinta y Tres, Cerro Largo, Rocha y Lavalleja.	~ 70%
Norte y Litoral-Oeste	Artigas, Salto, Paysandú, Río Negro y Soriano.	~ 10%
Centro	Rivera, Tacuarembó y Durazno.	~ 20%

Para el análisis que se realizó a nivel de “puntos” se utilizaron datos de la estación experimental de INIA La Estanzuela, correspondientes a experimentos de larga duración, que evalúan cultivos continuos y en rotaciones con pasturas. Dicha estación se ubica en el departamento de Colonia.

Figura 14 | Zonas analizadas. Mapa 1 - Soja, Trigo y Maíz, Mapa 2 - Papa, Mapa 3 - Arroz, Mapa 4 - Arroz subregiones (Norte, Centro y Este).

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Fuente de datos

Para realizar este estudio se utilizaron datos correspondientes a los rendimientos y a la fenología de cada uno de los cultivos seleccionados. Asimismo, también se usaron datos históricos y proyectados de clima, entre otros datos. Las fuentes de información se detallan a continuación.

Tabla 5 | Fuente de datos

Variable		Fuente	Link
Clima	Histórico	INIA	www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico
		INUMET	www.inumet.gub.uy/ Los datos fueron aportados por la institución.
	Futuro	1° Informe MOSAICC	www.mgap.gub.uy/sites/default/files/proyecciones_climaticas_mediante_reduccion_estadistica_de_escalas_para_uruguay_1.pdf
Fenología	Etapas de desarrollo	INIA	www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Utilidades
		DGRN / MGAP, INIA, FAgo	www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/descarga/anexo-explicativo-de-normas
	Kc	FAO	www.fao.org/3/a-x0490s.pdf
Rendimiento	Promedio Nacional	DIEA / MGAP	www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas/produccion-vegetal
		ACA	www.aca.com.uy/datos-estadisticos
	Regional	DIEA / MGAP	www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas/produccion-vegetal/arroz
		FUCREA	Los datos fueron aportados por la institución.
	Puntuales	INIA (La Estanzuela)	Los datos fueron aportados por la institución.
Regiones Agropecuarias	-	DIEA / MGAP	www2.mgap.gub.uy/DieaAnterior/regiones/Regiones2015.pdf
Datos Económicos	PIB	BCU	www.bcu.gub.uy/Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Presentacion%20Cuentas%20Nacionales.aspx
	Exportaciones	Uruguay XXI	www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/53bf87c7047ac8cc0483a732c502c49524837aad.pdf
	Empleo	MGAP en base a INE	www.ine.gub.uy/encuesta-continua-de-hogares1





6. Resultados obtenidos

6.1 Soja

Pese al descenso observado en los últimos años, la soja continúa siendo el principal cultivo de verano en Uruguay, con un área de aproximadamente 1,1 millones de hectáreas en 2017/18, un 80 por ciento de la superficie agrícola total. Además, como se comentó previamente, este cultivo es también uno de los tres principales productos de exportación.

Respecto a los rendimientos y dada la disponibilidad actual de datos, en este trabajo se analizó el rendimiento promedio nacional de la soja.³⁰ Siguiendo los pasos marcados en el apartado 4.3, en primer lugar, se analizó la evolución de largo plazo de los rendimientos y luego se extrajo la anomalía, es decir, la diferencia entre el valor observado y el esperado de acuerdo a su tendencia.

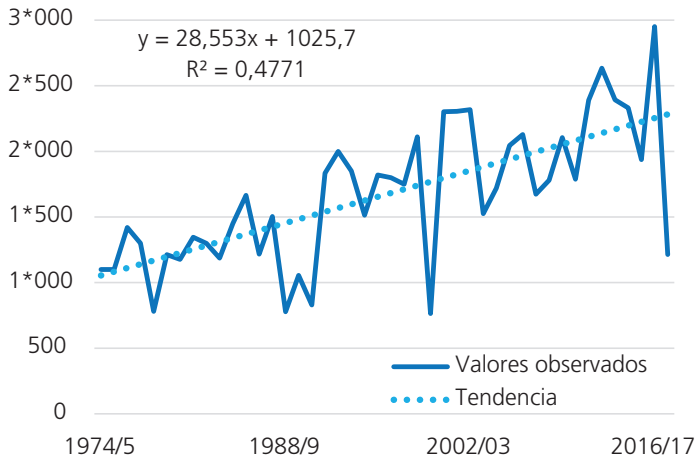
Obtención de tendencias y anomalías de rendimientos

Tal como se puede apreciar en la gráfica de la izquierda, el rendimiento de la soja ha mostrado una clara trayectoria ascendente, aunque con grandes fluctuaciones entorno a la misma. En ese marco, se ajustó una tendencia lineal, $y=28,3x + 1.004$, con un ajuste de casi 50 por ciento. A partir de la misma se construyó la gráfica de anomalía que aparece a la derecha y que representaría la volatilidad observada en la productividad debido a factores climáticos. Esta variable es fundamental, ya que se busca establecer una relación entre ella y las variables climáticas y de balance hídrico, para poder estimar luego los posibles impactos del cambio climático en los rendimientos.

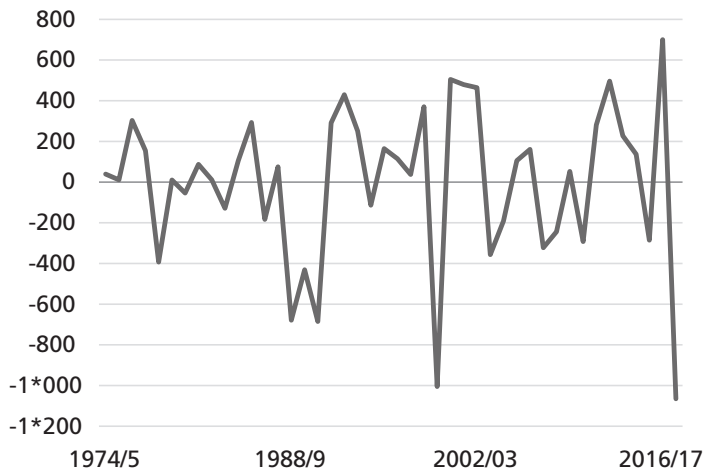
³⁰ La disponibilidad de datos de rendimientos a nivel regional, departamental y de estaciones experimentales es limitada, por lo que no son suficientes para realizar regresiones. INIA e INASE recopilan información proveniente de la evaluación nacional de cultivares, que en el caso de soja se realiza desde el 2000 en La Estanzuela (Colonia) y Young (Río Negro) y desde el 2013 en Dolores (Soriano). Además, FUCREA dispone de información para las principales regiones agrícolas del país para los últimos diez años. Finalmente, DIEA ha recopilado información departamental para los últimos 5 años.

Figura 15 | Rendimientos de la Soja**Rendimientos de la Soja**

Promedio Nacional - Kg/ha

**Anomalía Rendimiento de la Soja**

Promedio Nacional - Kg/ha



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Variables climáticas y de balance hídrico

En cuanto a las variables climáticas utilizadas para estimar la regresión, se tuvieron en cuenta los datos de lluvia, temperatura mínima, promedio y máxima para todo el ciclo del cultivo y para sus diferentes etapas de desarrollo (emergencia, floración, llenado del grano y madurez). Se consideraron todas estas variables a fin de detectar cuáles de ellas tendría una mayor incidencia en los rendimientos.

Por otra parte, para obtener las variables vinculadas al balance hídrico, en primer lugar, se recolectó información acerca de los estados fenológicos de la soja y del parámetro Kc. Según datos de DIEA, en Uruguay predomina la soja temprana o de "primera"³¹ y con ciclos de madurez del grupo VI (de acuerdo a URUPOV).³² En ese marco, la información

³¹ www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas/produccion-vegetal/agricultura-de-secano

³² http://7moencuentro.mto.org.uy/wp-content/uploads/2018/08/Observatorio-Oleaginosos-Uruguay_Zafra-2017-2018v3.pdf

fenológica que se consideró fue la correspondiente a la soja sembrada a mediados de Octubre de ciclo medio y en la zona sur³³ (dado que como la mayor parte de la superficie sojera se encuentra en el litoral sur del país). En tanto, la información referida al Kc en cada una de las etapas de desarrollo del cultivo se obtuvo a partir de los datos publicados por FAO (Allen R.G. *et al.*, 1998) sobre legumbres y soja. Las tablas 6 y 7 muestran los valores con los que se trabajaron.

Tabla 6 | Estados fenológicos de la soja

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
Siembra	0	16/10	Siembra	
VE	13	29/10	Emergencia	1 – Inicial
V2	23	8/11	Segundo nudo	
V4	30	15/11	Cuarto nudo	
V6	38	23/11	Sexto nudo	2 - Desarrollo
V8	47	2/12	Octavo nudo	
V10	54	9/12	Décimo nudo	
R1	72	27/12	Inicio de floración	
R3	93	17/01	Inicio de formación de vainas	3 - Temporada media
R5	126	19/02	Formación de semillas	
R7	166	30/03	Inicio de maduración	4 - Temporada final
R8	180	14/04	Maduración completa	

Tabla 7 | Kc soja por etapa

Kc inicial	Kc medio	Kc final
0,4	1,15	0,5

A partir de estos valores y aplicando las fórmulas descritas en la sección 4.3, fue posible calcular la evapotranspiración real, exceso y déficit hídrico, requerimiento total de agua y los índices de satisfacción para estimar el balance hídrico a través de la plataforma MOSAICC.

Con las variables climáticas y de balance hídrico se construyó luego una matriz de correlación (ver anexo 1) para analizar los factores que tuvieran una mayor relación con la anomalía del rendimiento y para evaluar posibles problemas de multicolinealidad en la regresión que se construyó a continuación.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Contemplando la información de la matriz, se probaron varias regresiones y la siguiente fue la que mostró un mayor grado de ajuste:

$$\text{Anomalía Nacional} = + 1,416 \cdot \text{ETA}_t - 0,84 \cdot \text{TWR} \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo ETA_t la Evapotranspiración Real en el ciclo total y TWR el Requerimiento Total de Agua. Como se puede ver, las variables climáticas no resultaron significativas en la regresión múltiple.

Observaciones 31, Datos de 1987 a 2017. | R^2 (grado de ajuste) = 0,32

³³ www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Utilidades

Los resultados de esta regresión reflejarían, por una parte, el hecho de que a medida que es mayor la evapotranspiración real (es decir, a medida que dicha variable se asemeja más a la evapotranspiración potencial), el crecimiento del cultivo se ve favorecido y por eso se observa una relación positiva entre ambas variables. Por otra parte, cuanto mayor sean los requerimientos de agua del cultivo, debido por ejemplo a mayores temperaturas, probablemente sea más difícil satisfacerlos y por lo tanto los rendimientos obtenidos serían menores.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Una vez obtenida la regresión a partir de los datos históricos observados, se aplicó la ecuación con datos de balance hídrico histórico simulados y futuros para cada uno de los GCM y RCP seleccionados en el primer informe de MOSAICC. La tabla 8 muestra la media y el desvío estándar esperados de la anomalía del rendimiento promedio nacional de la soja en cada uno de esos modelos y escenarios, tanto para el mediano como para el largo plazo (2010-2039 y 2040-2069 respectivamente).

Tabla 8 | Resultados soja - Promedio Nacional

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-52,46	115,74	-0,45	N.S.
		Futuro 2	-139,88		-1,21	*
	RCP 8.5	Futuro 1	-102,08		-0,88	N.S.
		Futuro 2	-136,63		-1,18	*
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	57,51	178,97	0,32	N.S.
		Futuro 2	80,69		0,45	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	84,47		0,47	N.S.
		Futuro 2	105,52		0,59	N.S.
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-35,74	110,68	-0,32	N.S.
		Futuro 2	-32,91		-0,30	N.S.
Promedio 4.5		Futuro 1	-10		-0,2	
		Futuro 2	-31		-0,4	
Promedio 8.5		Futuro 1	-9		-0,2	
		Futuro 2	-16		-0,3	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.

El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.

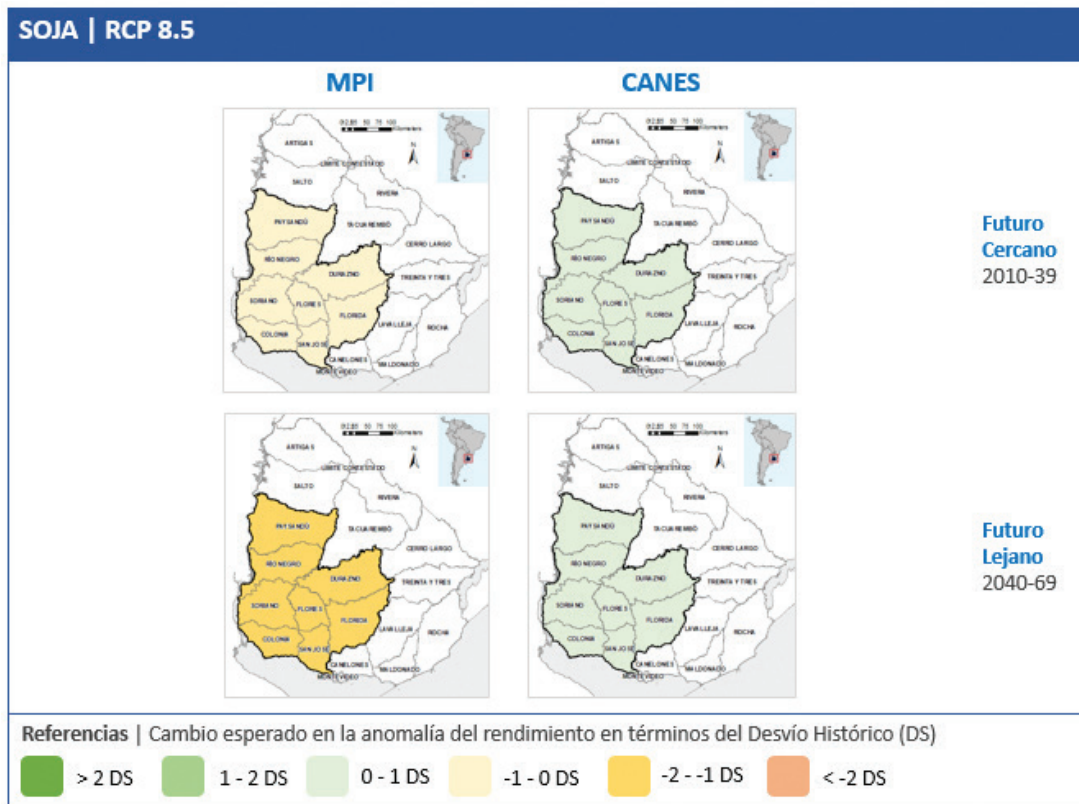
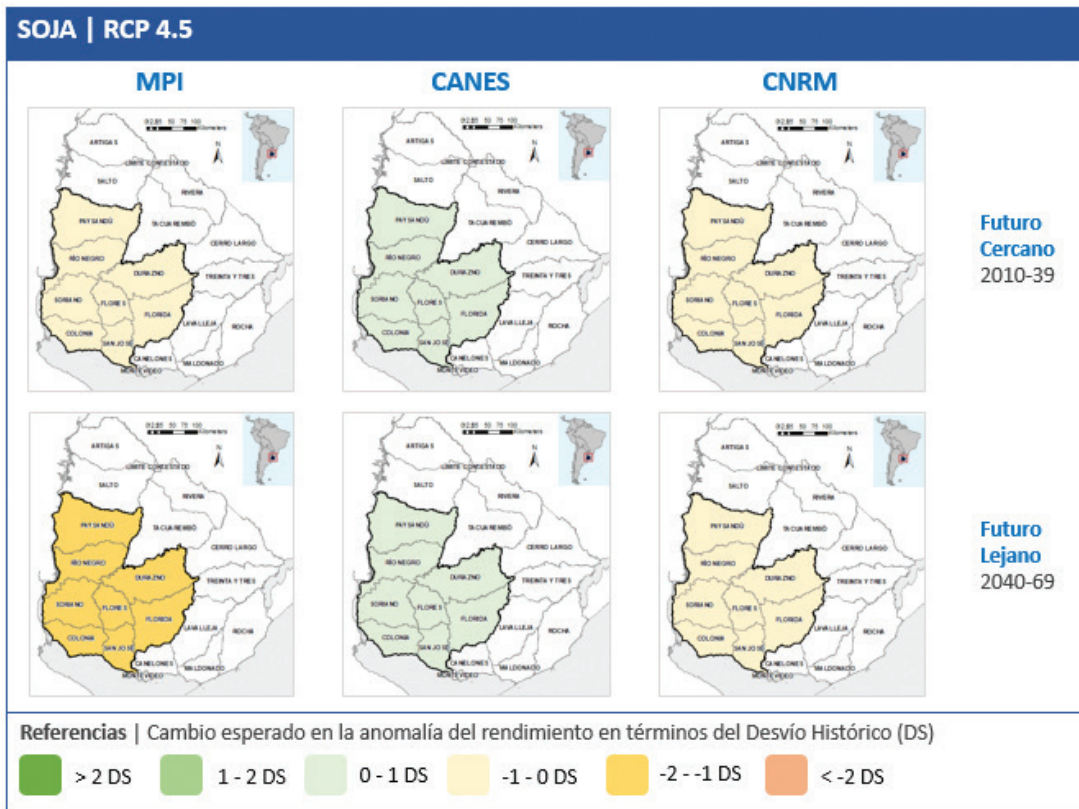
Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.

Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.

Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

El cuadro anterior muestra que los cambios en la media de la anomalía del rendimiento serían significativos solo en el caso del modelo MPI en el largo plazo (2040-2069) tanto para el escenario de gases de efecto invernadero (GEI) medio como alto (RCP 4.5 y 8.5 respectivamente). En estos casos se espera que el promedio de la anomalía disminuya, lo cual es un pronóstico desfavorable. En los otros casos en los que los resultados no fueron significativos (la variación de la media del rendimiento fue menor a $\pm 1\delta$ histórico), las señales fueron heterogéneas, ya que algunos modelos apuntan a un deterioro del rendimiento en el futuro mientras que otras indican una mejora. Estas mismas conclusiones se pueden observar en los siguientes mapas.

Figura 16. | Mapas de resultados para la soja



Fuente: elaboración propia. La información correspondiente a los desvíos estándar (DS) difiere para cada GCM, ya que se calcularon a partir de los datos históricos simulados en cada modelo. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 116 kg/ha, para el CANES fue de 179 kg/ha y para el CNRM fue de 111 kg/ha. Así, si los cambios esperados en el rendimiento del cultivo analizado se encuentran entre ± 116 , 179 y 111 respectivamente, se concluye que el cambio esperado no es significativo. En tanto, si el cambio se encuentra entre ± 116 y 232, ± 179 y 358 y ± 111 y 222, entonces el cambio sería significativo y si es superior a 232, 179, 222 o inferior al opuesto de estos últimos valores, la variación sería muy significativa.

6.2 Arroz

El cultivo de arroz ocupó unas 145.000 hectáreas en Uruguay en la zafra 2018/2019 y su área se ha reducido progresivamente desde la zafra 2010/2011, cuando alcanzó 195.000 hectáreas sembradas. Es un cultivo de verano que presenta varias particularidades. En primer lugar, es un cultivo que se desarrolla bajo riego por inundación, lo que le permite atenuar los efectos de la variabilidad típica de las precipitaciones en nuestro país, así como a la limitante en cuanto a capacidad de almacenamiento de agua de los suelos sobre los cuales se desarrolla. El cultivo del arroz tiene destino principalmente a la exportación. En el año 2018 Uruguay colocó en el exterior arroz por cerca de USD 400 millones, ubicándose séptimo en el ranking de exportaciones (Uruguay XXI, 2018).³⁴ Desde el punto de vista social, este cultivo tiene gran relevancia, ya que el desarrollo de la logística necesaria para el cultivo ha permitido la penetración y mejora de la caminería y electrificación en zonas aisladas y de difícil acceso de nuestro país, mejorando las condiciones de vida de los pobladores del campo y generando fuentes de trabajo. Además, presenta un alto grado de integración a lo largo de toda la cadena productiva, desde el productor, transporte y logística, industria e investigación. Esto configuró una situación óptima para la adopción de nuevas tecnologías por parte del productor. Resultado de esta situación es que los rendimientos del cultivo a nivel nacional han mostrado una sostenida tendencia creciente, con un incremento del orden de los 140 kg/ha de arroz anuales, si tomamos en cuenta los últimos 30 años de la serie histórica (1987-2017).

En cuanto a los rendimientos, en este estudio se analizaron los datos para el promedio nacional y para tres grandes regiones; la zona este, centro y norte del país.

PROMEDIO NACIONAL

Obtención de tendencias y anomalías de rendimientos

La información de rendimientos utilizada para este estudio fue obtenida de DIEA y la Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA). A partir de esta información se generó una gráfica de tendencia de rendimiento para el cultivo desde el año 1987. Se eligió este año como inicio de la serie de datos por coincidir con el lanzamiento de la variedad "El Paso 144". Esta variedad, además de permitir un gran salto en rendimiento, fue la que predominó en la mayor parte de la serie de 30 años que se tuvo en consideración. La función hallada que expresa la tendencia de los rendimientos a nivel nacional es la siguiente: $y = 141,2x - 276149$ y tuvo un ajuste alto, de 87 por ciento.

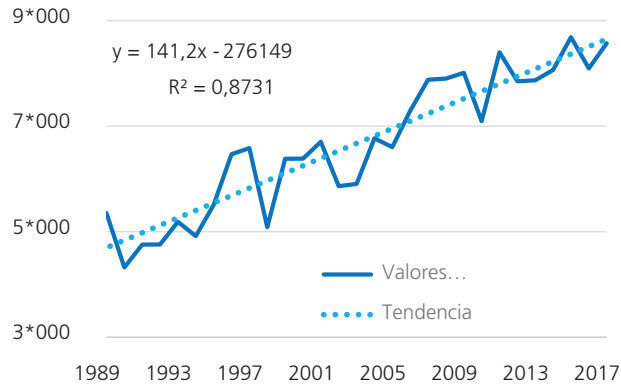
A partir de dicha función se calcularon los rendimientos esperados para cada zafra de la serie y a continuación se procedió a calcular la anomalía, como la diferencia entre el rendimiento observado o real y el esperado.

En la Figura 17 se puede observar como los mayores desvíos del rendimiento predicho por el modelo a nivel nacional se encuentran alrededor de 800 kg/ha, por ejemplo, en la zafra 1997/1998 (-873 kg/ha), y en la zafra 1996/1997 con un desvío positivo de 769 kg/ha.

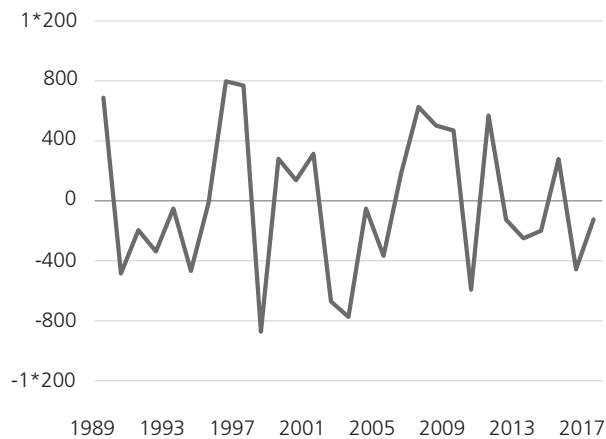
³⁴ www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/690cc2f9aaa8763b54d802d8e991665b4e007585.pdf

Figura 17. | Rendimientos del Arroz - Promedio Nacional**Rendimientos del arroz**

Promedio Nacional - Kg/ha

**Anomalía Rendimiento del Arroz**

Promedio Nacional - Kg/ha



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA y ACA.

Variables climáticas y de balance hídrico

Luego se buscaron relaciones entre la anomalía de los rendimientos y las variables climáticas y de balance hídrico (ver matriz de correlaciones en anexo I).

Las variables derivadas del balance hídrico propuestas para relacionar con las anomalías en el rendimiento del arroz fueron: evapotranspiración de cultivo durante el ciclo, excesos hídricos durante el período siembra-emergencia y durante el período de floración-cosecha. La evapotranspiración se vincula con la heliofanía, que es un factor que tiene gran incidencia en los rendimientos y no hay proyecciones disponibles. El exceso hídrico en el período siembra-emergencia puede ocasionar retrasos en la siembra y pobre implantación del cultivo, lo que resulta en un riesgo de que la floración ocurra en períodos con mayor probabilidad de ocurrencia de bajas temperaturas. Cuando el exceso ocurre durante el período de floración-cosecha pueden ocasionar pérdidas de productividad por daños al cultivo y pérdidas de cosecha. En el caso del arroz, las variables derivadas del balance hídrico tienen una importancia marginal respecto a las variables climáticas por ser un cultivo que se desarrolla bajo riego. Además, encontramos que las estimaciones de balance hídrico obtenidas a través de WABAL resultan en una subestimación de los excesos y déficit hídricos, debida a que la capacidad de almacenamiento de agua

disponible en los suelos arroceros es más reducida que la que aparece en los datos por defecto del programa. A diferencia de otros cultivos, este se desarrolla bajo inundación, por lo que se ingresó en WABAL la información de altura de lámina de 10 cm. Por otra parte, otra de las restricciones de este análisis es que se considera una única fecha de inicio de la siembra. Este hecho puede perjudicar particularmente al cultivo de arroz, ya que es muy variable la duración del período de siembra de acuerdo al régimen de precipitaciones del año.

Las variables climáticas propuestas fueron temperatura máxima durante el ciclo y durante el período de floración-llenado de grano, precipitación durante el ciclo y durante el período floración-llenado (como una variable cuyo comportamiento es inverso a la heliofanía), y finalmente las temperaturas mínimas durante el ciclo y durante el período de floración-llenado.

A continuación se presenta la información de los estados fenológicos para el cultivo de arroz y la duración de cada período considerando el ciclo de la variedad El Paso 144, por ser la más representativa para el período en estudio. Los Kc utilizados fueron extraídos de Allen R.G. *et al.*, 1998. Para la información de fenología se utilizó la predicción de eventos fenológicos del Boletín Agroclimático de INIA, Zafra 2018/2019. Estos datos se utilizaron para el cálculo de las variables de balance hídrico.

Tabla 9 | Estados fenológicos del arroz

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
S0	0	01/10	Siembra	1 – Inicial
V1	10	10/10	Emergencia	
R0	100	30/12	Primordio	2 – Desarrollo
R3-R4	120	29/01	50% Floración	3 - Temporada media
R8	155	6/3	Madurez fisiológica	4 - Temporada final

Tabla 10 | Kc empleado en cada etapa del ciclo del arroz

Kc inicial	Kc medio	Kc final
1,05	1,2	0,75

Se utilizaron estos mismos datos para todas las regiones analizadas (este, norte y centro).

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Posteriormente, considerando las proyecciones climáticas obtenidas a partir de diferentes modelos y escenarios de cambio climático y utilizando el modelo de regresión de la anomalía del rendimiento, se estudiaron los cambios esperados de dicho indicador hacia el futuro.

Teniendo en cuenta la anomalía del rendimiento nacional y las variables de clima y balance hídrico comentadas anteriormente, se procedió a calcular los coeficientes de correlación (ver anexo I). Las variables que mostraron una mayor correlación con la anomalía del rendimiento fueron: temperatura máxima durante el ciclo de cultivo, y precipitaciones durante el ciclo de cultivo. En el caso de la temperatura máxima la correlación fue positiva, es decir, en las zafras que la temperatura máxima es mayor, los rendimientos son mayores. En el caso de la variable precipitación durante el ciclo

de cultivo la correlación fue negativa, es decir, cuanto mayores son las lluvias durante el ciclo de cultivo, menor el rendimiento. Aquí es importante aclarar que la matriz de correlaciones también muestra una relación fuerte e inversa entre temperatura máxima y precipitaciones, por lo que no incluimos las dos variables a la misma vez en la regresión para evitar problemas de multicolinealidad. La función encontrada con un mayor grado de ajuste fue la siguiente:

$$\text{Anomalía Nacional} = -16.891 + 529 \text{ Tmax en el ciclo} \quad \text{Ec. 2}$$

Observaciones 30, Datos de 1987 a 2017. | R^2 (grado de ajuste) = 0,42

Como se podía anticipar, las variables de balance hídrico no resultaron significativas en las regresiones múltiples obtenidas.

La regresión indica que por cada grado celsius de aumento en la temperatura máxima promedio en todo el ciclo, los rendimientos del arroz tenderían a caer en aproximadamente 530 kg/ha.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Luego de obtenida la función de anomalía del rendimiento nacional, se procedió a aplicarla a las proyecciones de clima obtenidas de los modelos MPI, CANESM y CNRM para dos períodos de tiempo: futuro cercano (2010-2039) y futuro lejano (2040-2069) en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCPs 4.5 y 8.5).

Los resultados indican un aumento significativo de los rendimientos en el futuro cercano y muy significativo en el futuro lejano, para los modelos MPI y CANESM en ambos escenarios de calentamiento global.

Cuando utilizamos la información climática del modelo de circulación CNMR, la proyección de aumento de rendimiento no es significativa en el futuro cercano y es significativa para el futuro lejano bajo el RCP 4.5. Los resultados se pueden observar a continuación.

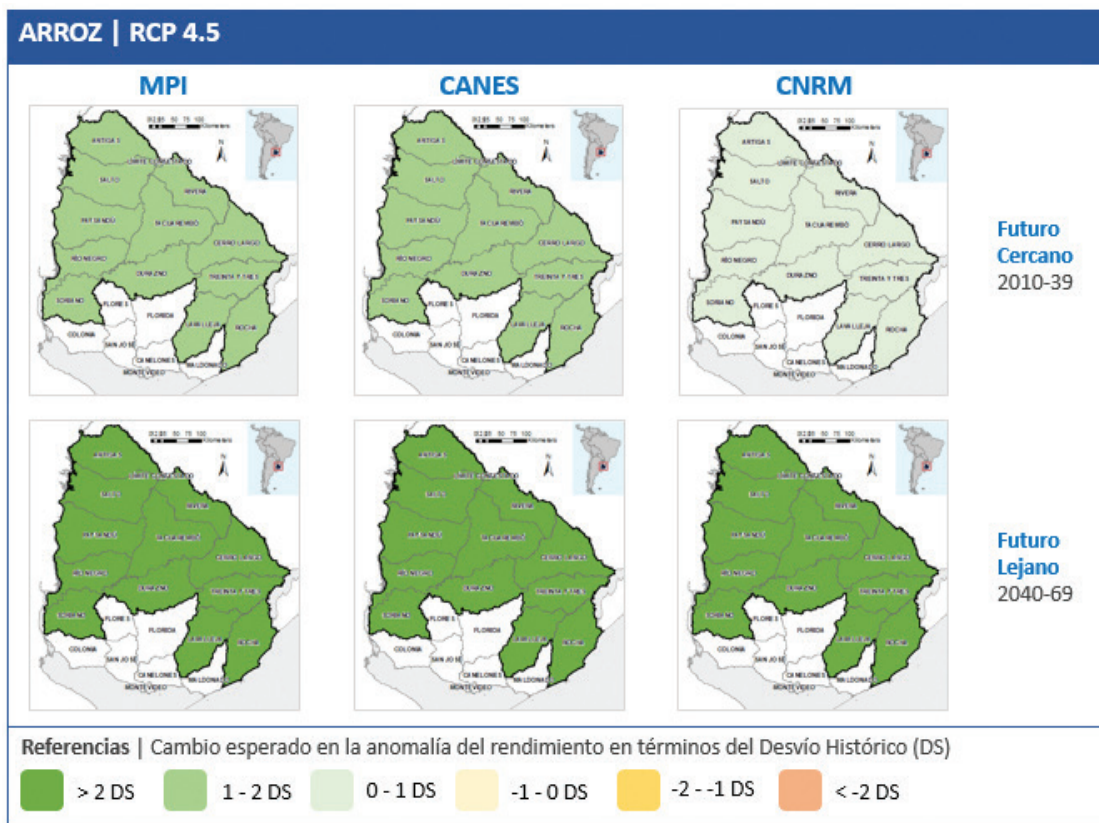
Los resultados son consistentes con el incremento esperado de la temperatura máxima en todos los modelos climáticos.

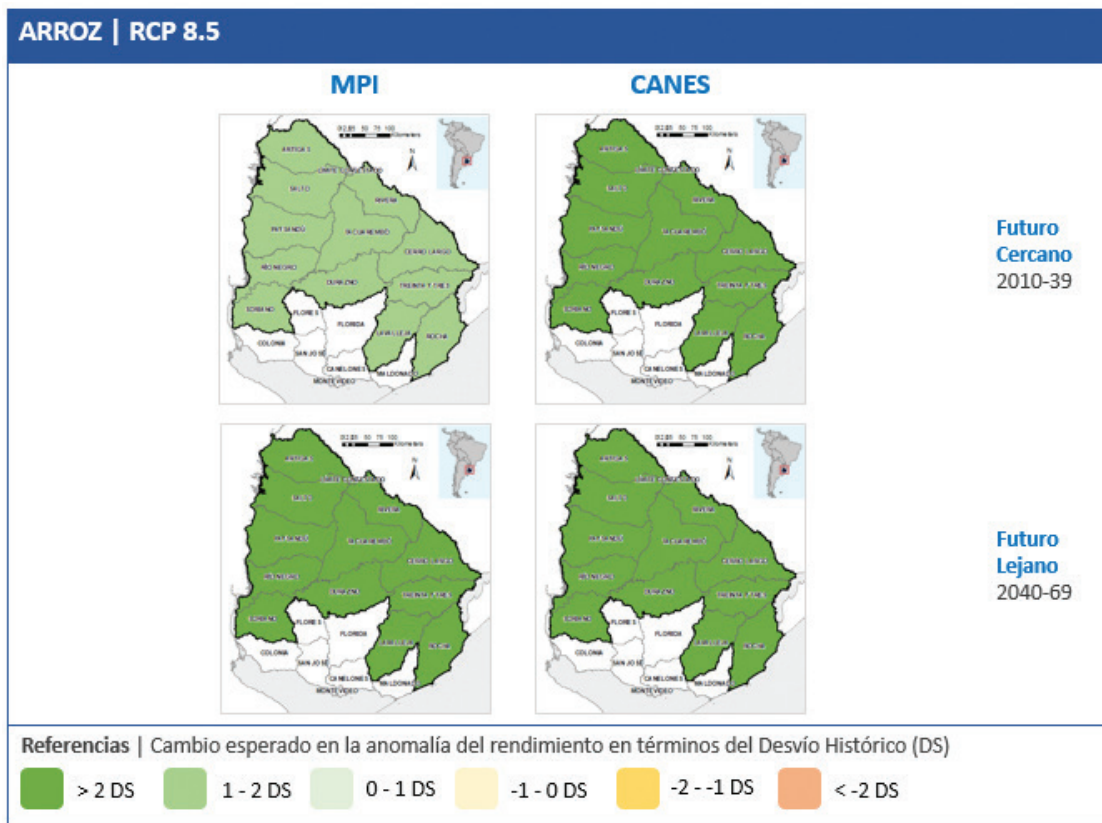
Tabla 11 | Resultados arroz - Promedio Nacional

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	551	325,30	1,7	*
		Futuro 2	1 041		3,2	**
	RCP 8.5	Futuro 1	587		1,8	*
		Futuro 2	1 318		4,1	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	532	299,37	1,8	*
		Futuro 2	964		3,2	**
	RCP 8.5	Futuro 1	637		2,1	**
		Futuro 2	1 427		4,8	**
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	318	332,79	1,0	N.S.
		Futuro 2	803		2,4	**
Promedio 4.5		Futuro 1	467		1,5	
		Futuro 2	936		2,9	
Promedio 8.5		Futuro 1	612		2,0	
		Futuro 2	1 372		4,4	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

Figura 18. | Mapas de resultados para el arroz – Promedio Nacional





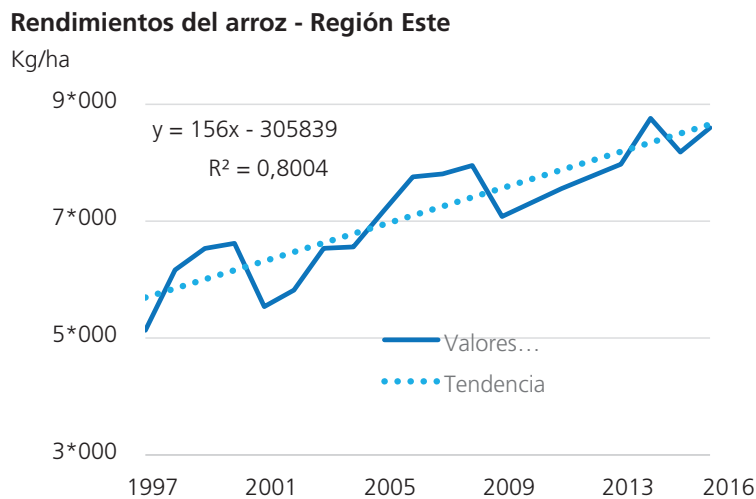
Fuente: Elaboración propia. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 325 kg/ha, para el CANES fue de 299 kg/ha y para el CNRM fue de 333 kg/ha.

A. MACRO REGIONES

En esta sección se describen los resultados obtenidos para las tres macro regiones analizadas; zona este (Treinta y Tres, Cerro Largo, Rocha y Lavalleja), zona centro (Rivera, Tacuarembó y Durazno) y zona norte y litoral oeste (Artigas, Salto, Paysandú, Río Negro y Soriano).

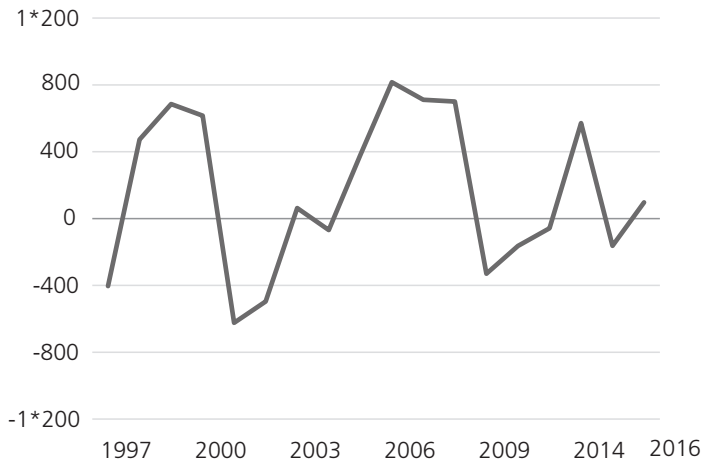
A continuación se presentan las tendencias y anomalías calculadas para cada una de las zonas.

Figura 19. | Rendimientos del Arroz – Zona Este, Centro y Norte y Litoral Oeste



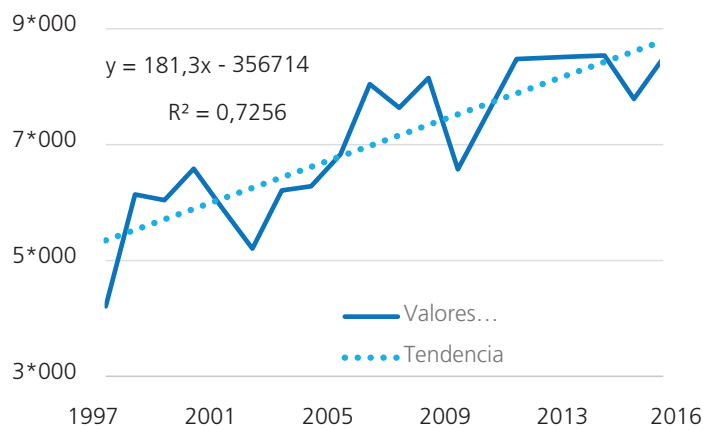
Anomalía Rendimiento del Arroz

Región Este - Kg/ha



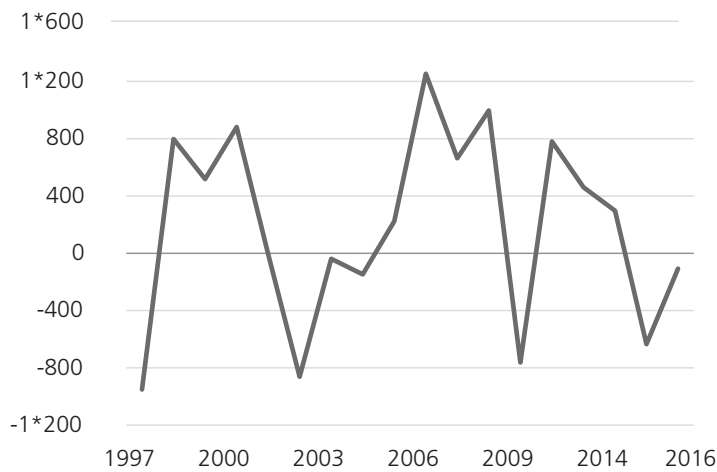
Rendimientos del arroz - Región Centro

kg/ha

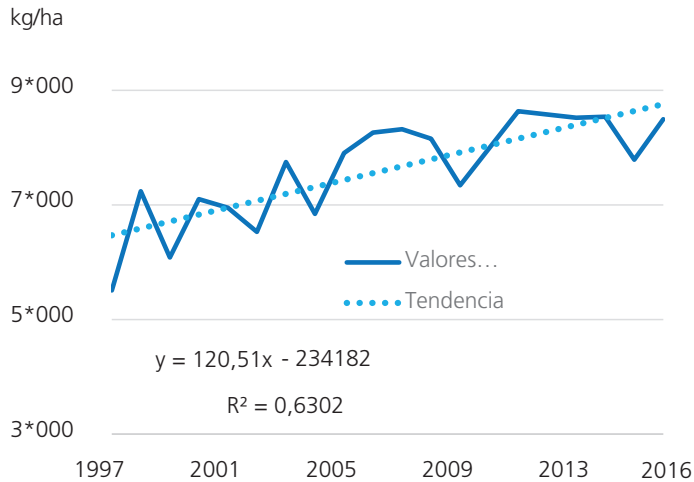


Anomalía Rendimiento del Arroz

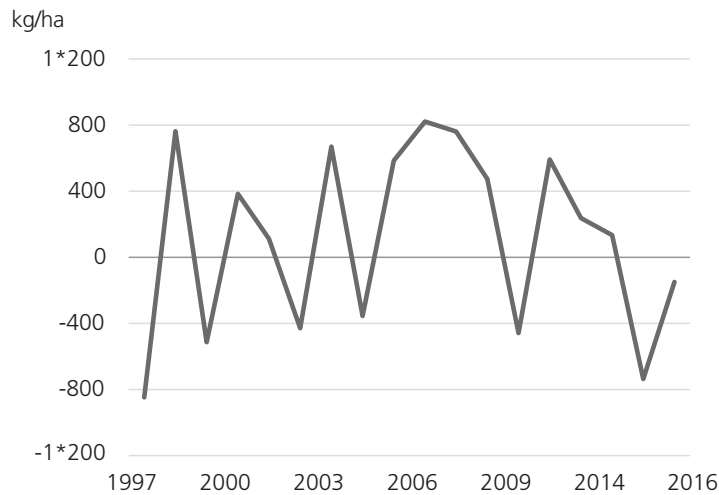
Región Centro - Kg/ha



Rendimientos del arroz - Región Norte y Litoral Oeste



Anomalía Rendimiento del Arroz



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Como se puede observar, los rendimientos tuvieron una trayectoria creciente en todos los casos. En el caso de la zona Este y Centro, la tendencia de crecimiento de los rendimientos fue algo mayor a la tendencia nacional: 156 y 181 kg/ha/año respectivamente, mientras en el Norte el crecimiento interanual fue algo inferior a la tendencia nacional, 120 kg/ha/año. Los ajustes de las curvas de tendencia fueron buenos para todas las zonas, desde 63 por ciento en la zona norte y litoral oeste, hasta 80 por ciento en la zona este.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Luego del cálculo de la anomalía de rendimiento por zona, se procedió a calcular su correlación con las variables de clima y balance hídrico. Al igual que a nivel nacional, las variables que tuvieron una mayor correlación con las anomalías de los rendimientos regionales fueron la temperatura máxima y las precipitaciones durante el ciclo de cultivo. Como se señaló anteriormente, en las ecuaciones solo se tomó en cuenta una de las dos variables, para evitar problemas de multicolinealidad, ya que ambos factores están muy vinculados entre sí.

Anomalía Zona Este = $-11.047 + 362 T_{\max}$ en el ciclo Ec. 3

Anomalía Zona Centro = $-23.197 + 735 T_{\max}$ en el ciclo Ec. 4

Anomalía Zona Norte y Litoral Oeste = $-15.098 + 467 T_{\max}$ en el ciclo Ec. 5

Observaciones 20, Datos de 1997 a 2016³⁵ | $R^2 = 0,29$ Este y Norte y Litoral Oeste; $0,54$ Centro.

a. Resultados Zona Este

Las proyecciones obtenidas para la zona este en el futuro cercano bajo un escenario intermedio de emisión de gases de efecto invernadero (RCP 4.5), con la información climática de los Modelos de Circulación General MPI y CANES indican un aumento significativo de los rendimientos; mientras que el cambio proyectado a partir del modelo CNRM no fue significativo.

Bajo el mismo escenario de emisiones de gases, en el futuro lejano, las predicciones obtenidas con los tres GCM indican un aumento de rendimiento muy significativo (el aumento de la media del rendimiento más que duplica el desvío estándar de la serie histórica).

Si miramos las proyecciones para un escenario de incremento alto de emisiones (RCP 8.5) y consideramos la información del modelo MPI, tendríamos incrementos del rendimiento muy significativos, tanto para el mediano como para el largo plazo. Si nos basamos en la predicción climática de CANESM, el resultado indica incrementos del rendimiento; significativos en el futuro cercano y muy significativos en el futuro lejano.

Tabla 12 | Resultados arroz - Zona Este

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	384	207,38	1,9	*
		Futuro 2	691		3,3	**
	RCP 8.5	Futuro 1	392		1,9	*
		Futuro 2	881		4,2	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	384	188,00	2,0	**
		Futuro 2	676		3,6	**
	RCP 8.5	Futuro 1	439		2,3	**
		Futuro 2	989		5,3	**
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	232	215,55	1,1	*
		Futuro 2	557		2,6	**
Promedio 4.5		Futuro 1	333		1,7	
		Futuro 2	641		3,2	
Promedio 8.5		Futuro 1	416		2,1	
		Futuro 2	935		4,8	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.

El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.

Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.

Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.

Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

³⁵ Si bien lo ideal es utilizar al menos 30 datos para construir una regresión, en este caso solo se encontraban disponibles 20 observaciones. Entendimos que igualmente era aceptable trabajar con estos datos, ya que las relaciones entre las variables analizadas serían bastante estable y además interviene sólo una variable en la regresión.

b. Resultados Zona Centro

En el caso de la zona centro, todas las proyecciones indican aumentos de rendimiento, significativos o muy significativos, excepto para el futuro cercano bajo el modelo de circulación CNMR y el escenario 4.5, cuyo resultado fue no significativo.

Tabla 13 | Resultados arroz - Zona Centro

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	762	421,34	1,8	*
		Futuro 2	1 406		3,3	**
	RCP 8.5	Futuro 1	801		1,9	*
		Futuro 2	1 803		4,3	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	834	399,00	2,1	**
		Futuro 2	1 451		3,6	**
	RCP 8.5	Futuro 1	972		2,4	**
		Futuro 2	2 117		5,3	**
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-1	421,08	0,0	N.S.
		Futuro 2	669		1,6	*
Promedio 4.5		Futuro 1	532		1,3	
		Futuro 2	1 960		2,9	
Promedio 8.5		Futuro 1	887		2,2	
		Futuro 2	1 960		4,8	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

c. Resultados Zona Norte y Litoral Oeste

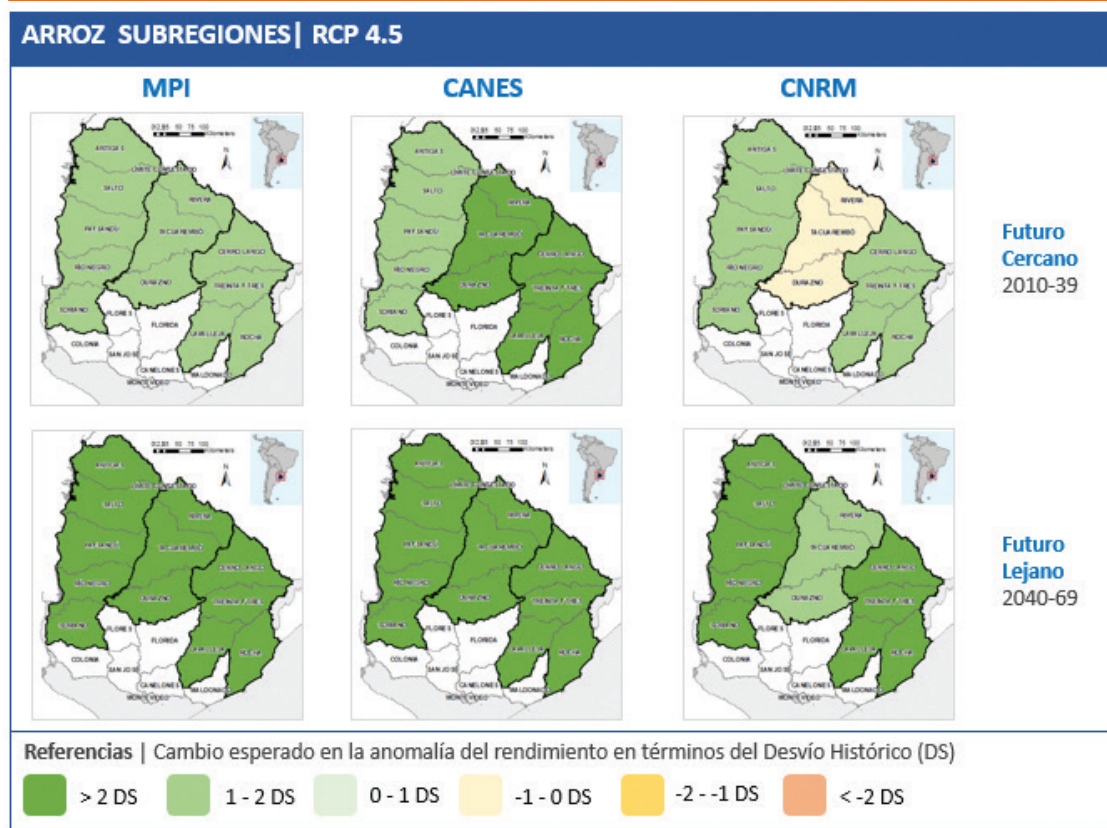
Para la zona norte el resultado es muy similar a la región anterior. Se pronostican aumentos de rendimientos significativos o muy significativos para todos los GCM y RCP, menos en el caso de la proyección basada en el modelo CNMR bajo el RCP 4.5.

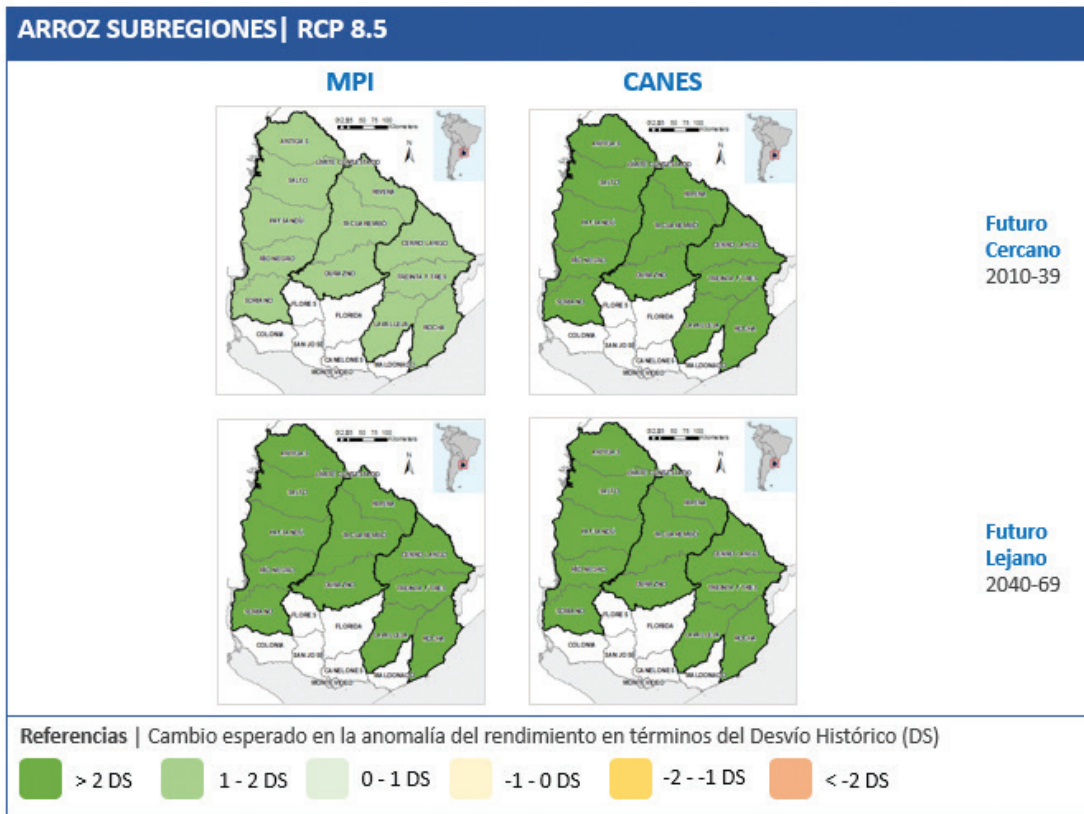
Tabla 14 | Resultados arroz - Zona Norte y Litoral Oeste

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	490	291,34	1,7	*
		Futuro 2	938		3,2	**
	RCP 8.5	Futuro 1	535		1,8	*
		Futuro 2	1 194		4,1	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	538	278,66	1,9	*
		Futuro 2	944		3,4	**
	RCP 8.5	Futuro 1	641		2,3	**
		Futuro 2	1 397		5,0	**
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	290	300,49	1,0	N.S.
		Futuro 2	714		2,4	**
Promedio 4.5		Futuro 1	439		1,5	
		Futuro 2	865		3,0	
Promedio 8.5		Futuro 1	588		2,1	
		Futuro 2	1 296		4,6	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

Figura 20. | Mapas de resultados para el arroz – Zona Este, Centro y Norte y Litoral Oeste





Fuente: elaboración propia. Para la zona este el DS encontrado para el modelo MPI fue de 207 kg/ha, para el CANES fue de 188 kg/ha y para el CNRM fue de 216 kg/ha. Para la zona centro el DS encontrado para el modelo MPI fue de 421 kg/ha, para el CANES fue de 399 kg/ha y para el CNRM fue de 421 kg/ha. Para la zona norte y litoral oeste el DS encontrado para el modelo MPI fue de 291 kg/ha, para el CANES fue de 279 kg/ha y para el CNRM fue de 300 kg/ha.

6.3 Trigo

El trigo es el cultivo de invierno más importante del país, pese a que el área sembrada se redujo desde un pico de casi 0,8 millones de hectáreas en 2011/12, hasta 0,2 millones de hectáreas en 2017/18 (equivalentes a un 40 por ciento del total).

En este estudio se analizó el posible impacto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de trigo para tres situaciones: i- trigo inserto en una secuencia de cultivos continuos; ii- trigo en secuencia de cultivos que rotan con pasturas; iii- cultivo de trigo a escala nacional. Para los ítems i e ii, se emplearon los rendimientos de trigo obtenidos entre 1975 - 2017 en los tratamientos que evaluaban cultivos continuo y cultivos en rotaciones con pasturas (67 por ciento cultivos - 33 por ciento pasturas), del experimento de larga duración de INIA La Estanzuela. Para el ítem iii se emplearon los rendimientos nacionales de trigo reportados por DIEA desde 1950 a 2016. Con dichos datos, se procedió a estimar la tendencia de los rendimientos, calcular las anomalías y ajustar un modelo estadístico que permitiera estimar el efecto del cambio climático en los rendimientos del cultivo de trigo, para cada una de las situaciones evaluadas.

CULTIVO DE TRIGO A NIVEL NACIONAL

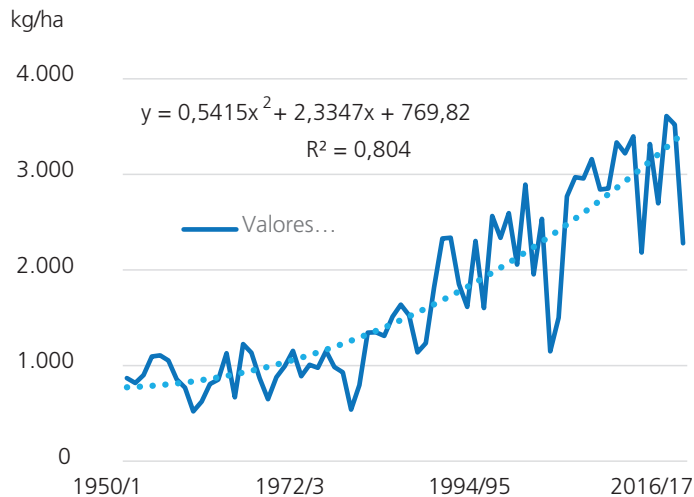
Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

El análisis de tendencia del rendimiento del trigo a nivel nacional mostró que la función cuadrática es la más representativa de su evolución de largo plazo, al alcanzar un ajuste de 80 por ciento. En cuanto a la anomalía y tal como se puede observar en el gráfico de

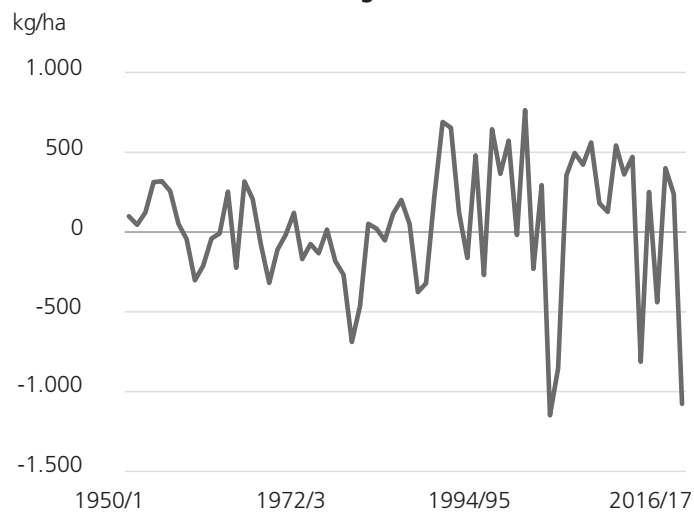
la derecha, el desvío del rendimiento observado respecto a lo esperado se incrementó en los últimos años de acuerdo a la metodología utilizada.

Figura 21. | Rendimientos del Trigo - Promedio Nacional

Rendimientos del Trigo



Anomalía Rendimiento del Trigo



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Variables climáticas y de balance hídrico

Para poder estimar la relación entre la anomalía del rendimiento y el clima, se consideraron las variables climáticas que a priori podrían tener una mayor incidencia. Ellas son: temperatura mínima, máxima y precipitaciones en junio, julio y agosto; en agosto y setiembre y entre setiembre y octubre. En cuanto a las variables de balance hídrico, para su cálculo se tomaron en cuenta los datos que aparecen en los siguientes cuadros.

Tabla 15 | Estados fenológicos del trigo

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
Siembra	0	20/06	Siembra	
V2	23	08/07	Segundo nudo	1 – Inicial
V10	130	23/10	Décimo nudo	2 – Desarrollo
R5	150	12/11	Formación de semillas	3 - Temporada media
R8	170	30/11	Maduración completa	4 - Temporada final

Tabla 16 | Kc empleado en cada etapa del ciclo del trigo

Kc inicial	Kc medio	Kc final
0,7	1,15	0,25

Se utilizaron estos mismos datos para los casos del cultivo de trigo inserto en una rotación con pasturas y con cultivos continuos en la estación experimental de La Estanzuela.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Con las variables climáticas y de balance hídrico se construyó luego una matriz de correlación (ver anexo 1) para analizar los factores que tuvieran una mayor relación con la anomalía del rendimiento. Se seleccionaron las variables más correlacionadas con la anomalía, evitando incorporar al modelo de regresión variables que presentan una alta correlación entre sí.

Se generaron varios modelos de regresión, siendo el que mostró el mejor ajuste el que se muestra a continuación:

$$y = -0,004 \text{ EXC}_t - 0,2 \text{ SOT}_{\text{min}} + 1,32 \quad \text{Ec. 6}$$

Observaciones 42, Datos de 1975 a 2017 | R^2 (grado de ajuste) = 0,50

Siendo y la anomalía del rendimiento (en ton/ha), EXC_t el exceso hídrico total (durante todo el ciclo del cultivo, en mm) y SOT_{min} la temperatura mínima promedio de los meses septiembre-octubre (en °C).

Los resultados de esta regresión indican que, por una parte, el exceso hídrico está negativamente relacionado con los rendimientos del trigo, esto es decir que, cuanto mayor el exceso hídrico, menores los rendimientos. Por otra parte, el modelo de regresión ajustado, indica que por cada grado celsius de aumento en la temperatura mínima promedio de los meses de septiembre-octubre en conjunto, los rendimientos de trigo tenderían a caer en aproximadamente 200 kg/ha.

Proyección de la anomalía del rendimiento

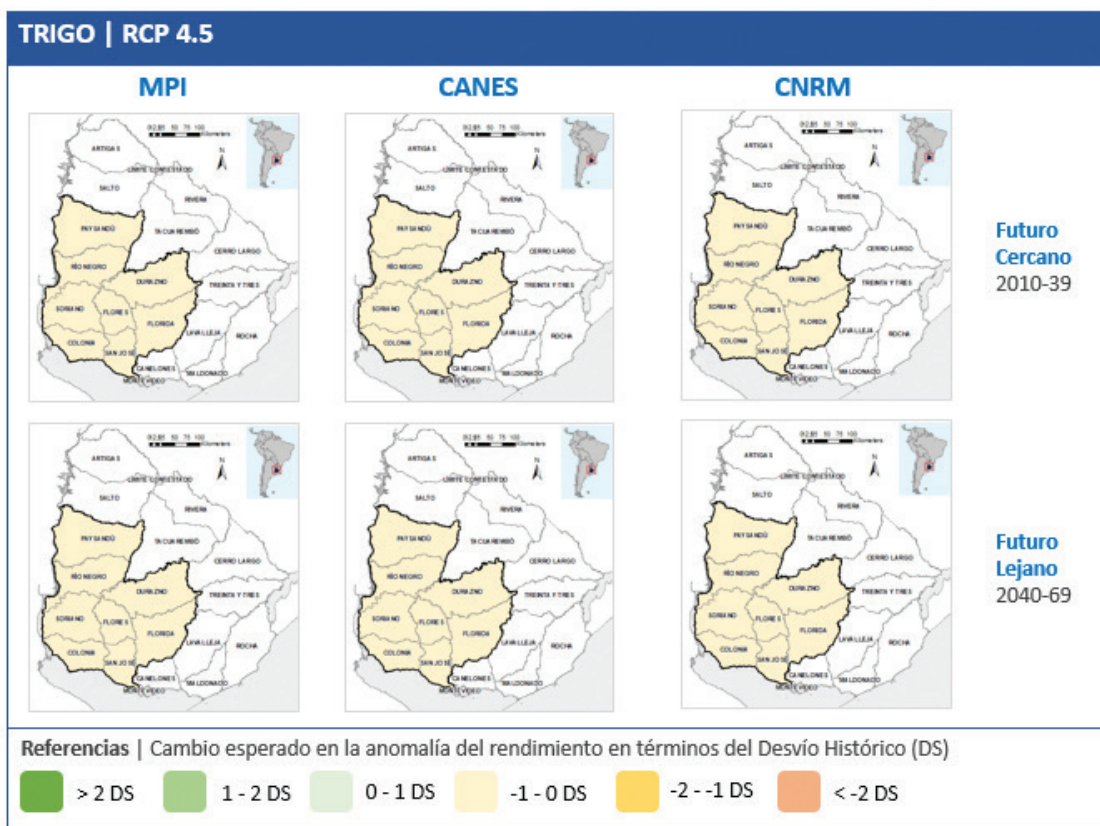
Los resultados apuntan a un deterioro de la media del rendimiento del trigo a escala nacional, aunque no sería significativo en ninguno de los dos escenarios estudiados, con los GCM empleados (Tabla 17).

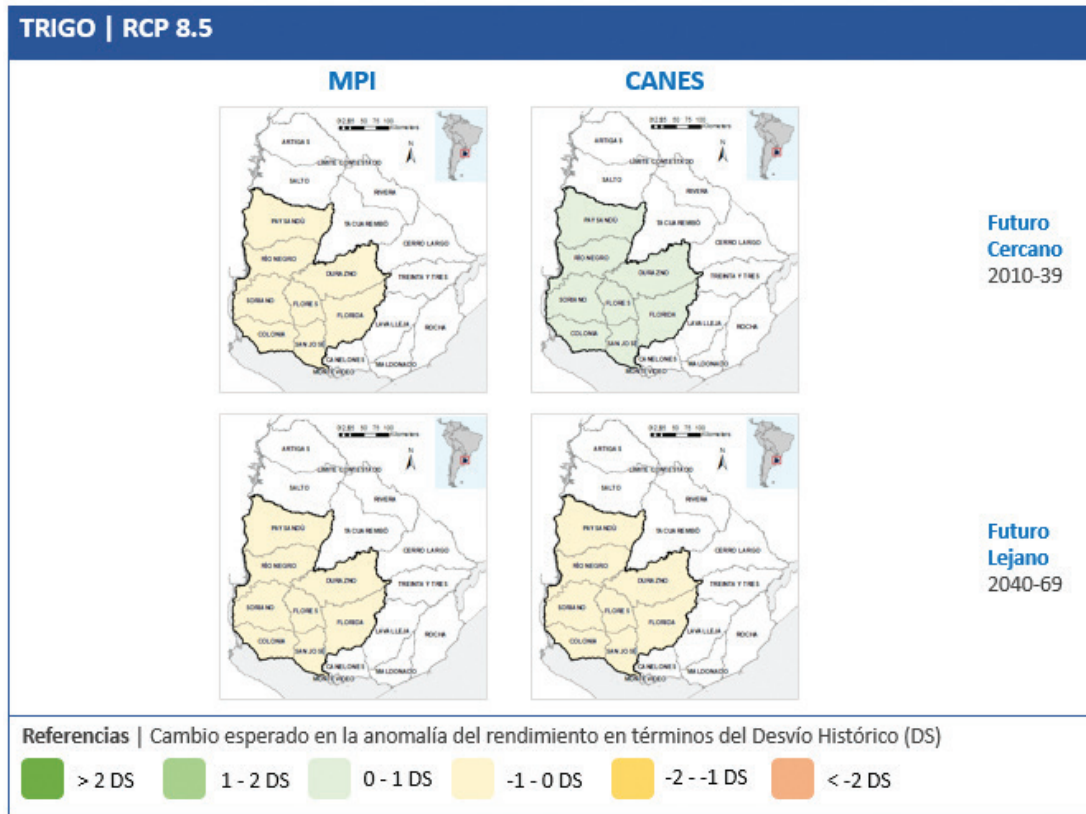
Tabla 17 | Resultados trigo - Promedio Nacional

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-166,95	462,84	-0,4	N.S.
		Futuro 2	-248,50		-0,5	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-121,22		-0,3	N.S.
		Futuro 2	-317,89		-0,7	N.S.
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	-117,34	524,20	-0,2	N.S.
		Futuro 2	-303,14		-0,6	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	16,16		0,0	N.S.
		Futuro 2	-455,60		-0,9	N.S.
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-151,80	434,41	-0,3	N.S.
		Futuro 2	-278,95		-0,6	N.S.
Promedio 4.5		Futuro 1	-145,4		-0,3	
		Futuro 2	-276,9		-0,6	
Promedio 8.5		Futuro 1	-52,5		-0,1	
		Futuro 2	-386,7		-0,8	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

Figura 22. | Mapas de resultados para el trigo – Promedio Nacional





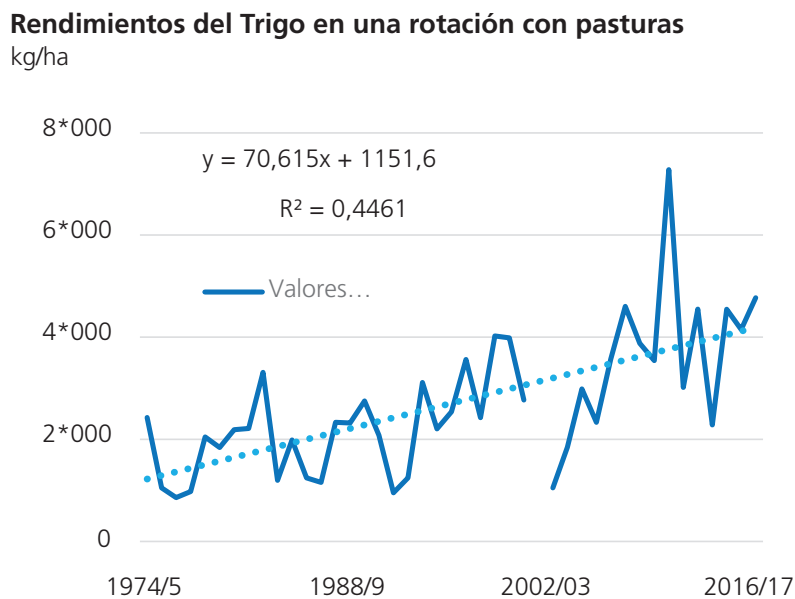
Fuente: Elaboración propia. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 462 kg/ha, para el CANES fue de 524 kg/ha y para el CNRM fue de 434 kg/ha.

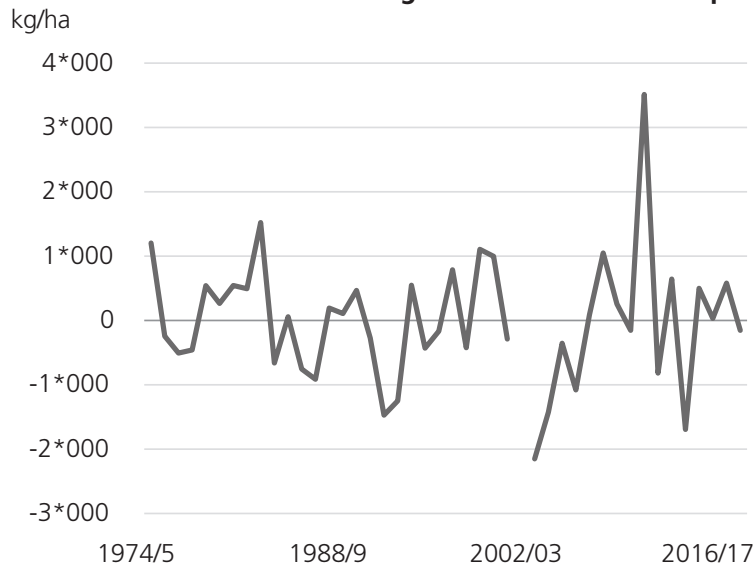
a. Cultivo de trigo inserto en una rotación de cultivos con pasturas

Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

En el caso de los rendimientos del trigo producido en una secuencia de cultivos con pasturas se obtuvo un ajuste de 45 por ciento a través de una regresión lineal.

Figura 23. | Rendimientos del Trigo - Rotación con pasturas



Anomalia Rendimiento del Trigo en una rotación con pasturas

Fuente: Elaborado en base a datos de INIA.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Al igual que en el caso anterior, con las variables climáticas y de balance hídrico se construyó una matriz de correlación para analizar los factores que tuvieran una mayor relación con la anomalía del rendimiento. Se seleccionaron las variables más correlacionadas con la anomalía, evitando incorporar al modelo de regresión las variables que presentaron multicolinealidad.

Se generaron varios modelos de regresión, siendo el siguiente el que mostró el mejor ajuste:

$$y = 0,89 \text{ DEF}_3 - 432,9 \text{ SOT}_{\text{min}} + 2.051,1 \quad \text{Ec. 7}$$

Observaciones 42, Datos de 1975 a 2017 | R^2 (grado de ajuste) = 0,20

Siendo y la anomalía del rendimiento, DEF_3 la deficiencia hídrica durante la etapa 3 del cultivo (floración - madurez fisiológica) y SOT_{min} la temperatura mínima promedio de los meses septiembre-octubre.

Los resultados de esta regresión muestran que menores precipitaciones en las etapas finales del ciclo del cultivo (por lo tanto, mayores valores de DEF_3) están directamente relacionados a mayores rendimientos del trigo. Estas menores precipitaciones permitirán incrementar la captura de radiación solar por la presencia de menores días nublados, y por ende incrementar la producción de fotosintatos. Es preciso agregar que, debido a que en Uruguay el trigo se cultiva en invierno, cuanto las tasas de evapotranspiración son bajas, es poco probable que el cultivo este expuesto a déficit hídrico durante su ciclo, siendo DEF_3 un indicador de bajas precipitaciones. A su vez, el modelo de regresión ajustado, indica que por cada aumento en un grado celsius de la temperatura mínima promedio de los meses de septiembre-octubre en conjunto, los rendimientos de trigo tenderían a caer en aproximadamente 433 kg/ha.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Para el caso del cultivo de trigo que forma parte de una rotación de cultivos con pasturas, todos los modelos coinciden en que el cambio climático tendrá un efecto negativo significativo o muy significativo en los rendimientos. Esto es consistente con las proyecciones de aumento de la temperatura mínima, variable explicativa de los rendimientos del trigo.

Tabla 18 | Resultados trigo - Rotación de cultivos con pasturas

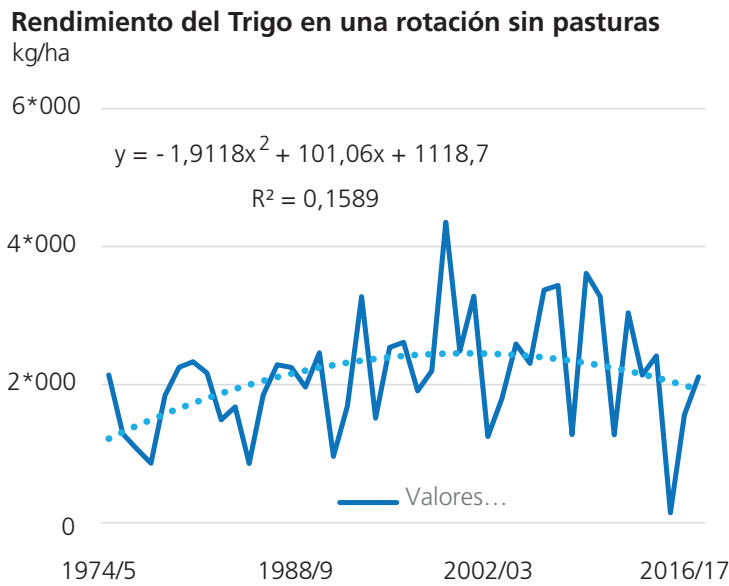
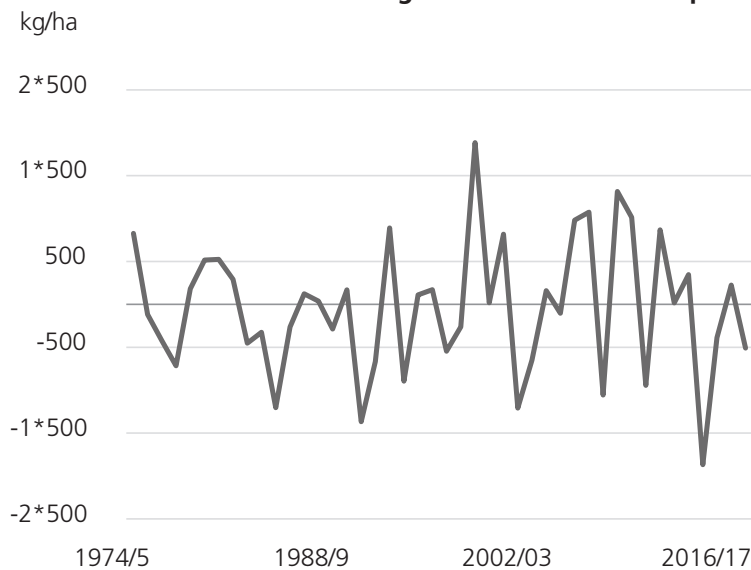
Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-472	334,26	-1,4	*
		Futuro 2	-751		-2,2	**
	RCP 8.5	Futuro 1	-549		-1,6	*
		Futuro 2	-952		-2,8	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	-484	328,86	-1,5	*
		Futuro 2	-782		-2,4	**
	RCP 8.5	Futuro 1	-522		-1,6	*
		Futuro 2	-1146		-3,5	**
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-372	346,80	-1,1	*
		Futuro 2	-613		-1,8	*
	RCP 8.5	Futuro 1	-443		-1,3	*
		Futuro 2	-794		-2,3	**
Promedio 4.5	Futuro 1	-443	-1,3			
	Futuro 2	-715	-2,1			
Promedio 8.5	Futuro 1	-504	-1,6			
	Futuro 2	-964	-3,2			

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

B. Cultivo de trigo inserto en una rotación de cultivos sin pasturas

Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

En el análisis de tendencia de los rendimientos obtenidos en agricultura continua sin rotación con pasturas el ajuste encontrado fue menor que en los casos anteriores (menos del 20 por ciento). En este caso no se observa una tendencia creciente tan clara, sino que los rendimientos parecen haberse estabilizado en los últimos años e incluso recientemente también se registró el valor mínimo en toda la serie en la zafra 2014/15.

Figura 24. | Rendimientos del Trigo – Rotación sin pasturas**Anomalía Rendimiento del Trigo en una rotación sin pasturas**

Fuente: Elaborado en base a datos de INIA.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Con las variables climáticas y de balance hídrico se construyó luego una matriz de correlación (ver anexo 1) para analizar los factores que tuvieran una mayor relación con la anomalía del rendimiento. Se seleccionaron las variables más correlacionadas con la anomalía, evitando incorporar al modelo de regresión las variables que presentaron multicolinealidad.

Se generaron varios modelos de regresión, siendo el siguiente el que mostró el mejor ajuste:

$$y = -15,0 \text{ EXC}_2 + 22 \text{ WSI_Corrected} - 736$$

Ec. 8

Observaciones 42, Datos de 1975 a 2017 | R^2 (grado de ajuste) = 0,21

Siendo y la anomalía del rendimiento, EXC_2 el exceso de precipitaciones en la segunda etapa del ciclo del cultivo de trigo (desde que el cultivo cubre el 10 por ciento del suelo al 70-80 por ciento) y $WSI_Corrected$ el Índice de Satisfacción de Agua Corregido por exceso de agua.

Los resultados de esta regresión indican que, por una parte, el exceso de precipitaciones está relacionado negativamente con los rendimientos de trigo (es decir que, cuanto mayor el exceso hídrico, menores los rendimientos). Por otra parte, un mayor índice de satisfacción del agua requerida por el cultivo determinaría una mayor productividad. A diferencia del rendimiento promedio nacional e inserto en una rotación con pasturas, en este caso la temperatura mínima promedio para setiembre-octubre no resultó significativa y por eso no fue incluida en el modelo.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Como se puede apreciar en el siguiente cuadro, los resultados obtenidos indican cambios muy menores en la anomalía del rendimiento del trigo en sistemas de agricultura continua, tanto en el futuro lejano como cercano. Esta conclusión es válida para casi todos los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y modelos empleados. Solo el modelo CANES bajo el RCP 8.5 proyecta una mejora significativa.

La diferencia en los resultados encontrados para el trigo en rotación con pasturas o sin pasturas no es evidente, pero podría responder a las interacciones que se dan entre el clima y otras variables que afectan los rendimientos como por ejemplo, las

Tabla 19 | Resultados trigo - Rotación de cultivos sin pasturas

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	47	1 202,19	0,0	N.S.
		Futuro 2	173		0,1	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	53		0,0	N.S.
		Futuro 2	-20		0,0	N.S.
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	216	1 240,40	0,2	N.S.
		Futuro 2	379		0,3	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	1 297		1,0	*
		Futuro 2	589		0,5	N.S.
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	90	1 312,14	0,1	N.S.
		Futuro 2	-65		0,0	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-107		-0,1	N.S.
		Futuro 2	65		0,0	N.S.
Promedio 4.5		Futuro 1	118		0,1	
		Futuro 2	162		0,1	
Promedio 8.5		Futuro 1	414		0,5	
		Futuro 2	212		0,2	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.

El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.

Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.

Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.

Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

características del suelo o el manejo. Las diferencias observadas en esos otros factores podrían amortiguar o acentuar los impactos del clima en los cultivos. Sin embargo, estas dinámicas y retroalimentaciones son complejas y no fueron contempladas en este estudio.

6.4 Maíz

El maíz es el segundo cultivo de verano de secano más relevante en Uruguay, aunque se ubica muy por detrás de la soja. En el ejercicio agrícola 2017/18 abarcó alrededor de 70.000 hectáreas, representando menos del 10 por ciento del área total estival. En cuanto a los rendimientos, en este estudio se decidió trabajar con los datos para el promedio país, ya que se encontraban disponibles para un período de más de 40 años. Dado la concentración geográfica del área de cultivo, el rendimiento promedio refleja mayormente lo que sucede en el litoral sur-oeste y centro del país, en los departamentos de Soriano, Río Negro, Paysandú, Colonia, Flores, Durazno, San José y Florida.

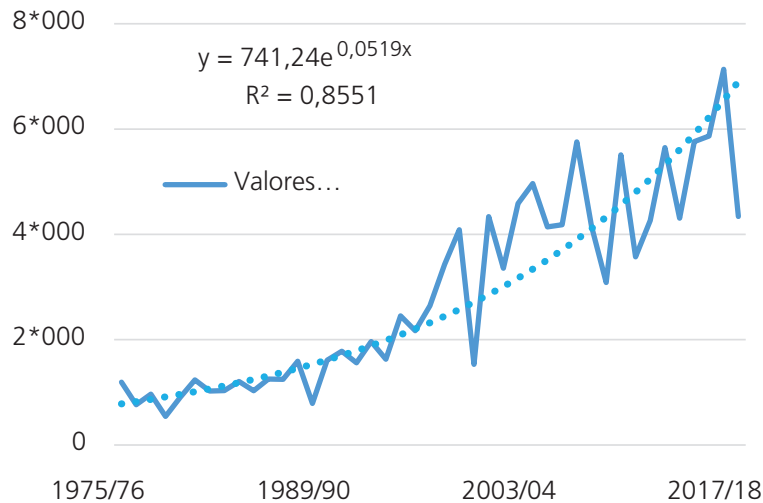
Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

Para calcular la tendencia de los rendimientos del maíz para la media nacional se estimó una regresión exponencial ($y = 715,91 * e^{0,0497x}$) que alcanzó un ajuste de 85 por ciento. Por su parte, la anomalía del rendimiento, que se obtuvo como la diferencia entre el valor observado y el esperado de acuerdo a su tendencia, aumentó en las últimas dos décadas en comparación con los registros históricos.

Figura 25. | Rendimientos del Maíz - Promedio Nacional

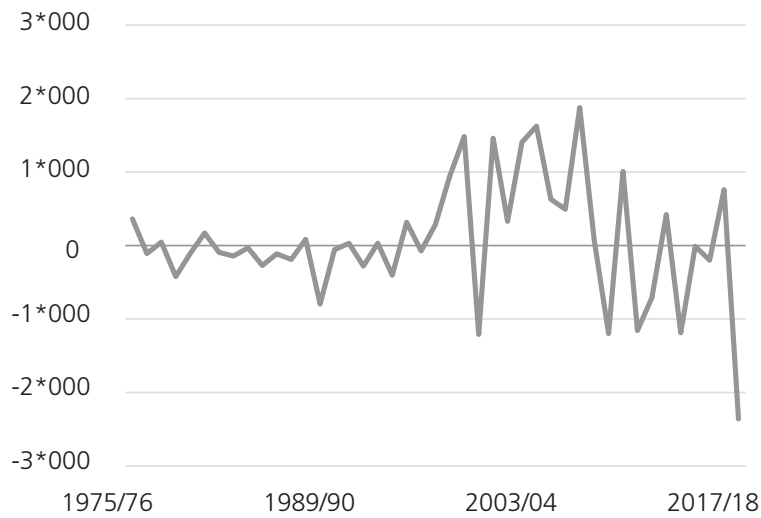
Rendimientos del Maíz

Promedio Nacional - Kg/ha



Anomalia Rendimiento del Maíz

Promedio Nacional - Kg/ha



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Variables climáticas y de balance hídrico

Para estimar las variables de balance hídrico se tomaron en cuenta datos de fenología publicados por INIA para la zona sur del país y de DGRN para Colonia. Se consideró que el cultivo comienza a sembrarse a principios de octubre y que tiene un ciclo de madurez medio. Las distintas etapas de desarrollo pueden observarse en la siguiente tabla. Por su parte, los datos de Kc que aparecen en la tabla 20, corresponden a los difundidos por FAO (Allen R.G. *et al.*, 1998).

Tabla 20 | Estados fenológicos del maíz

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
Siembra	0	01/10	Siembra	
VE	10	11/10	Emergencia	1 – Inicial
V2	19	20/10	2 hojas	
V4	30	31/10	4 hojas	
V6	41	11/11	6 hojas	
V8	52	22/11	8 hojas	2 – Desarrollo
V10	61	1/12	10 hojas	
V16	77	17/12	16 hojas	
FM	80	20/12	Floración masculina	
R1	83	23/12	Floración femenina	3 - Temporada media
R5	121	30/01	Línea de leche	
R7	139	18/02	Inicio de senescencia	4 - Temporada final
R8	170	19/03	Maduración completa	

Tabla 21 | Kc maíz por etapa

Kc inicial	Kc medio	Kc final
0,35	1,2	0,6

En tanto, las variables climáticas que se contemplaron en el análisis surgen del estudio realizado por Giménez, L. (2012) sobre la "Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo". En el mismo se analiza cómo se ven impactados los rendimientos ante un déficit hídrico en períodos críticos, que ocurren entre 15 días antes y después de la floración femenina, en el llenado de grano y en la fase vegetativa. Tomando en cuenta lo anterior, en este estudio se tomaron en cuenta las variables de lluvia y temperatura durante esos períodos y a lo largo de todo el ciclo, para incluirlas en el análisis de correlación y posteriormente en la regresión de la anomalía.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

A partir de la información proporcionada en la matriz de correlaciones entre la anomalía del rendimiento y las variables de clima recién mencionadas y las de balance hídrico (ver anexo I), se generaron varios modelos de regresión, siendo el siguiente el que mostró el mejor ajuste (p -valor = 0,0002; $R^2 = 0,41$):

$$y = 37,8 * WSI_Corrected + 4,3 * Precip_Madurez - 2.155 \quad \text{Ec. 9}$$

Siendo y la anomalía del rendimiento, $WSI_Corrected$ el Índice de Satisfacción de Agua Corregido por exceso de agua y $Precip_Madurez$ las lluvias ocurridas durante la madurez del cultivo.

Observaciones 37, Datos de 1981 a 2017. | R^2 (grado de ajuste) = 0,41

Los resultados de esta regresión muestran que, a medida que es mayor el índice de satisfacción de agua durante todo el desarrollo (mayor porcentaje del requerimiento de agua del cultivo satisfecho) los rendimientos del maíz se incrementarían. De igual forma, cuando el registro de lluvias durante la etapa de madurez es más alto, la productividad del cultivo aumentaría.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Siguiendo la metodología explicada en el capítulo 4, la anomalía del rendimiento del maíz fue estimada utilizando la ecuación anterior y los datos climáticos y de balance hídrico históricos simulados y futuros para cada uno de los GCM y RCP seleccionados en el primer informe de MOSAICC. En la siguiente tabla se muestran los resultados, la variación de la media y desvío estándar esperado, en cada uno de los modelos y escenarios analizados, tanto para el mediano como para el largo plazo (2010-2039 y 2040-2069 respectivamente).

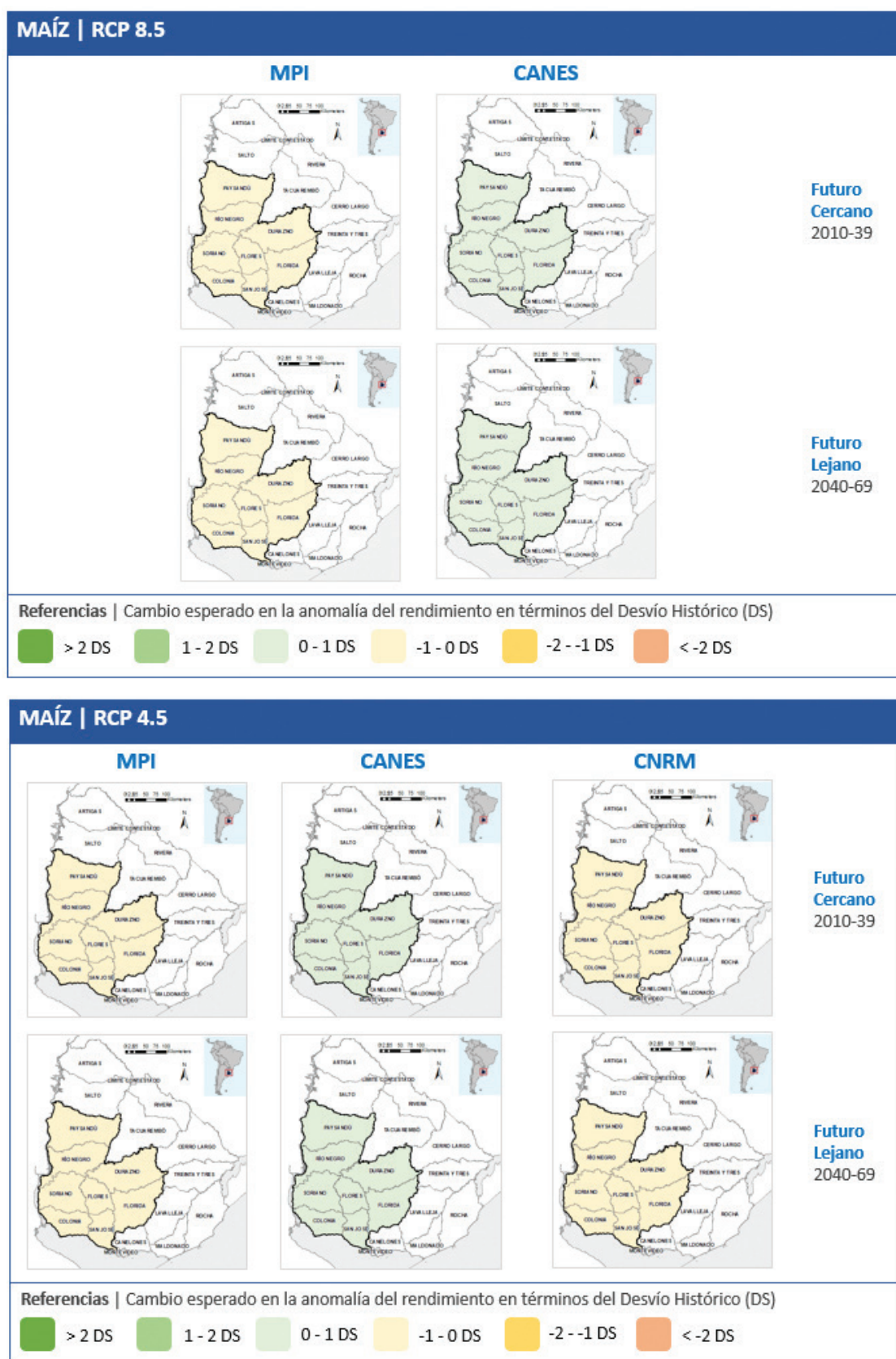
Tabla 22 | Resultados Maíz - Promedio Nacional

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-70	450,57	-0,2	N.S.
		Futuro 2	-414		-0,9	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-319		-0,7	N.S.
		Futuro 2	-355		-0,8	N.S.
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	96	522,00	0,2	N.S.
		Futuro 2	112		0,2	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	114		0,2	N.S.
		Futuro 2	264		0,5	N.S.
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-103	352,47	-0,3	N.S.
		Futuro 2	-106		-0,3	N.S.
	Promedio 4.5	Futuro 1	-26		-0,1	
		Futuro 2	-136		-0,3	
	Promedio 8.5	Futuro 1	-102		-0,2	
		Futuro 2	-45		-0,1	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

Como se puede ver en la tabla, los resultados obtenidos muestran señales mixtas respecto al impacto del cambio climático en los rendimientos del maíz. En efecto, los valores obtenidos en los modelos MPI y CNRM apuntan a una mejora de la productividad, mientras que en el caso del CANES muestran lo contrario. Sin embargo, ninguno de los valores resultó significativo.

Figura 26. | Mapas de resultados para el maíz – Promedio Nacional



Fuente: Elaboración propia. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 451 kg/ha, para el CANES fue de 522 kg/ha y para el CNRM fue de 352 kg/ha.

6.5 Papa

La papa es uno de los cultivos hortícolas más importantes en nuestro país y uno de los más intensivos en mano de obra. En el ejercicio 2017/18 este cultivo ocupó unas 4.150 hectáreas, que se concentraron en la zona sur del país, que abarca los departamentos de San José, Canelones, Montevideo, Florida, Colonia y Soriano. Dicha región representa aproximadamente el 90 por ciento del área total sembrada con papa y es por eso que, en este estudio solo se analizaron los datos para esa zona y no se consideraron las regiones este y norte (que comprenden los departamentos de Maldonado y Rocha y Tacuarembó, Rivera, Salto, Paysandú y Río Negro respectivamente).

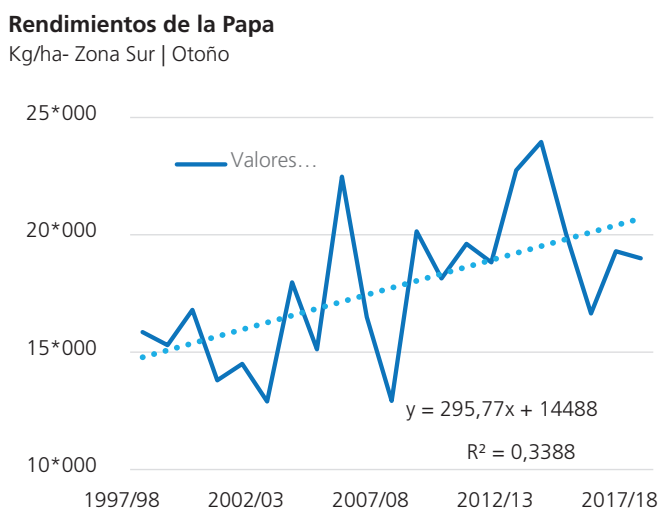
La siembra del cultivo de papa tiene lugar dos veces al año en Uruguay, durante el otoño y en primavera. La zafra de otoño es más relevante ya que allí es cuando se obtiene en torno de un 70 por ciento de la cosecha total del año agrícola. De todos modos, en este trabajo se analizaron los rendimientos obtenidos en la zona sur tanto en la zafra de otoño como de primavera. Los resultados se presentan por separado ya que los estados fenológicos se dan en fechas diferentes en un caso y otro. Se utilizaron los datos de rendimientos reportados por DIEA desde 1996 a 2017.³⁶ Con dichos datos, se procedió a estimar la tendencia de los rendimientos, calcular las anomalías y ajustar un modelo estadístico que permitiera estimar el efecto del cambio climático en la papa, en cada una de las estaciones evaluadas.

TEMPORADA DE OTOÑO

Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

Para el cálculo de la tendencia de los rendimientos de la papa producida en la zona sur en la zafra de otoño se estimó una regresión lineal ($y = 296x + 14.488$) que alcanzó un ajuste de más de 30 por ciento. Por su parte, la anomalía se obtuvo como la diferencia entre el valor observado y el esperado de acuerdo a la tendencia (ver gráfico de la derecha).

Figura 27. | Rendimientos de la Papa- Temporada de Otoño



³⁶ Cabe aclarar que los datos de rendimiento para la zona sur hasta 2001 fueron estimados a partir de los datos promedio país.

Anomalía Rendimiento de la Papa

Kg/ha- Zona Sur | Otoño



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Variables climáticas y de balance hídrico

En relación a las variables climáticas que tendrían un mayor impacto en la producción de papa se consideraron las siguientes: temperaturas mínimas y máximas durante el crecimiento vegetativo y las precipitaciones en la etapa de floración y desde la floración hasta la madurez. En cuanto a las variables de balance hídrico, la información que se tuvo en cuenta para realizar los cálculos aparece en las siguientes tablas. Los datos referidos a los estados fenológicos surgen del anexo explicativo de la revisión de normas técnicas para riego (DGRN *et al.*, 2017), mientras que los del Kc también se obtuvieron de FAO (Allen R.G. *et al.*, 1998).

Tabla 23 | Estados fenológicos de la papa

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
Siembra	0	01/02	Siembra	1 - Inicial
VE	19	20/02	Emergencia	
-	42	15/03	Cobertura total	2 - Desarrollo
R7	73	15/04	Inicio de maduración (senescencia)	3 - Temporada media
R8	103	15/05	Maduración completa	4 - Temporada final

Tabla 24 | Kc empleado en cada etapa del ciclo de la papa

Kc inicial	Kc medio	Kc final
0,5	1,15	0,75

Se utilizaron estos mismos datos de Kc para el caso del arroz de primavera-verano.

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

A partir de la información proporcionada en la matriz de correlaciones entre la anomalía del rendimiento y las variables climáticas mencionadas anteriormente y las de balance hídrico (ver anexo I), se generaron varios modelos de regresión. El siguiente modelo de regresión es el que mostró el mejor ajuste (p -valor = 0,04; $R^2 = 0,51$):

$$y = 0,03*ETA_2 - 0,05*EXC_3 - 0,27*Tmin_flor + 3,99$$

Ec. 10

Siendo y la anomalía del rendimiento, ETA_2 la evapotranspiración real en el segundo período de crecimiento, EXC_3 el exceso hídrico en la tercera etapa de desarrollo y $Tmin_{flor}$ la temperatura mínima durante el crecimiento vegetativo.

Observaciones 21, Datos de 1997 a 2017.³⁷ | R^2 (grado de ajuste) = 0,51

Los resultados de esta regresión reflejarían, por una parte, el hecho de que a medida que es mayor la evapotranspiración real (es decir, cuando dicha variable se asemeja más a la evapotranspiración potencial), el rendimiento de la papa se ve favorecido y por eso se observa una relación positiva entre ambas variables. En tanto, la presencia de exceso hídrico durante la tercera etapa de desarrollo de la papa afectaría negativamente su crecimiento, al igual que un incremento de la temperatura mínima en la etapa de floración.

Proyección de la anomalía del rendimiento

A la ecuación previamente definida se le aplicaron los datos climáticos y de balance hídrico históricos simulados y futuros para cada uno de los GCM y RCP seleccionados en el primer informe de MOSAICC. En la siguiente tabla se muestra la variación de la media y el desvío estándar esperados de la anomalía del rendimiento de la papa en la zona sur en la temporada de otoño en cada uno de esos modelos y escenarios, tanto para el mediano como para el largo plazo (2010-2040 y 2040-2070 respectivamente).

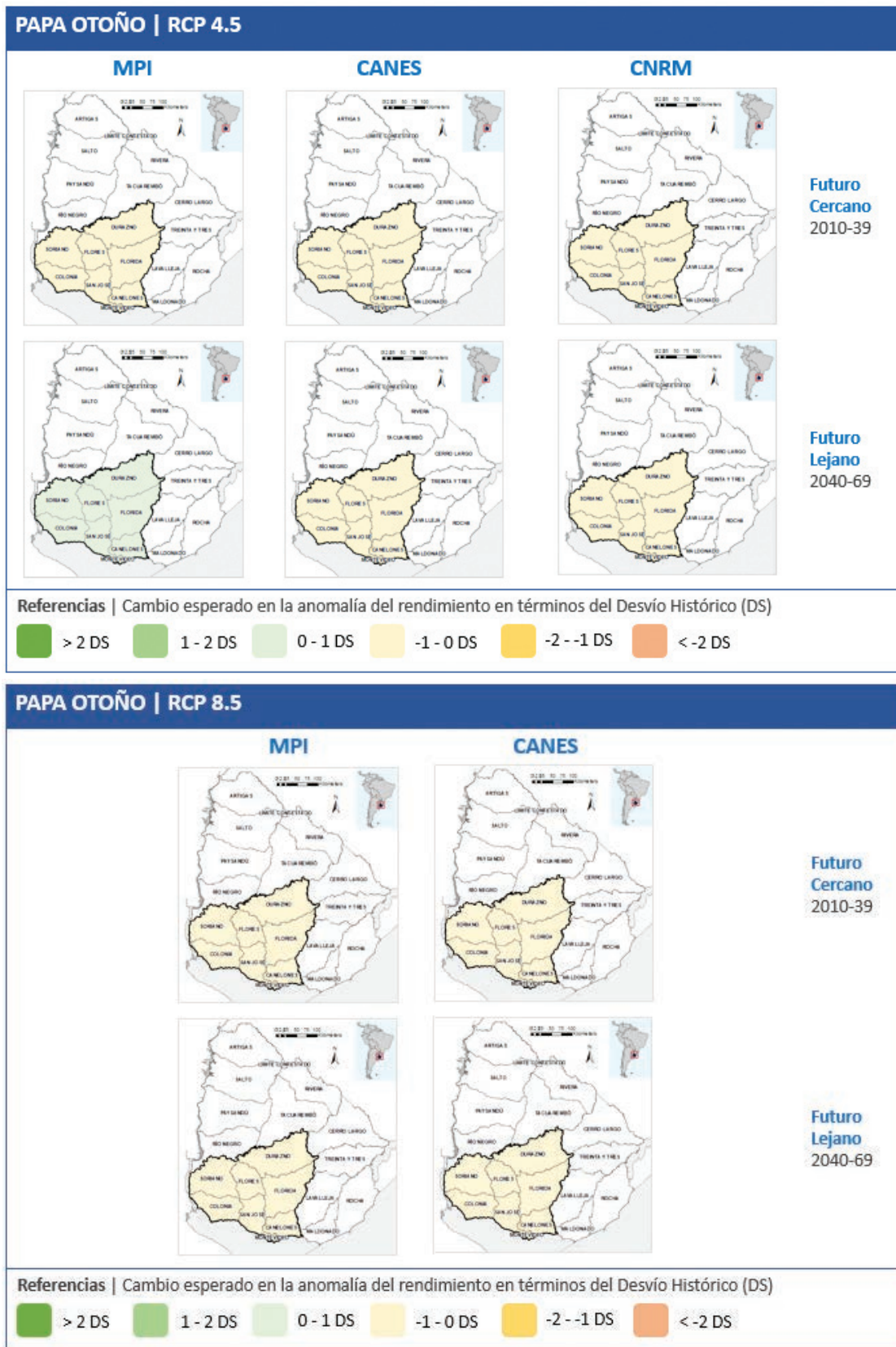
Tabla 25 | Resultados Papa - Temporada de Otoño

Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-378,53	2 049,54	-0,2	N.S.
		Futuro 2	131,04		0,1	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-729,60		-0,4	N.S.
		Futuro 2	-770,65		-0,4	N.S.
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	-244,47	1 381,94	-0,2	N.S.
		Futuro 2	-358,98		-0,3	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-1 271,28		-0,9	N.S.
		Futuro 2	-1 157,03		-0,8	N.S.
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-398,08	1 098,01	-0,4	N.S.
		Futuro 2	-747,81		-0,7	N.S.
Promedio 4.5		Futuro 1	-340,36		-0,2	
		Futuro 2	-325,25		-0,3	
Promedio 8.5		Futuro 1	-1 000,44		-0,6	
		Futuro 2	-963,84		-0,6	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

³⁷ Ídem comentario realizado para las diferentes zonas de arroz.

Figura 28. | Mapas de resultados para la papa - Temporada de Otoño



Fuente: Elaboración propia. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 2.049 kg/ha, para el CANES fue de 1.382 kg/ha y para el CNRM fue de 1.098 kg/ha.

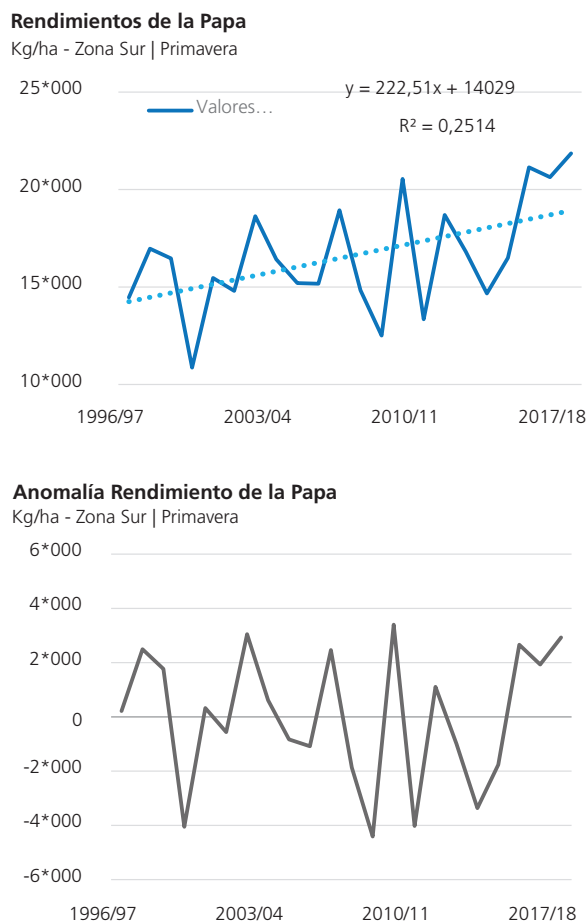
Si bien todos los resultados que aparecen en la tabla muestran que en todos los escenarios futuros (excepto en el RCP 4.5 de largo plazo) el rendimiento del cultivo de papa se vería perjudicado por el cambio climático, ninguno de los valores resultó significativo.

Temporada de primavera-verano

Remoción de tendencia y obtención de la anomalía de rendimientos

Para el cálculo de la tendencia de los rendimientos de papa producida en la zona sur en la zafra de primavera también se estimó una regresión lineal ($y = 223x + 14.029$) y en este caso el ajuste fue de 25 por ciento. Por su parte, la anomalía se obtuvo como la diferencia entre el valor observado y el esperado de acuerdo a la tendencia (ver gráfico de la derecha).

Figura 29. | Rendimientos de la Papa- Temporada de Primavera-Verano



Fuente: Elaborado en base a datos de DIEA.

Variables climáticas y de balance hídrico

Las variables climáticas que se tomaron en cuenta en este caso fueron las mismas que para la papa de otoño: temperaturas mínimas y máximas durante el crecimiento vegetativo y las precipitaciones en la etapa de floración y desde la floración hasta la madurez. Los datos de estados fenológicos utilizados para obtener los indicadores de balance hídrico se presentan a continuación.

Tabla 26 | Estados fenológicos de la papa

EF	Ciclo	Fecha	Referencia	Etapas definidas en Mosaicc
Siembra	0	01/09	Siembra	1 – Inicial
VE	19	20/09	Emergencia	
-	44	15/10	Cobertura total	2 – Desarrollo
R7	90	30/11	Inicio de maduración (senescencia)	3 - Temporada media
R8	120	30/12	Maduración completa	4 - Temporada final

Obtención de la regresión de la anomalía del rendimiento

Se generaron varios modelos de regresión, siendo el siguiente el que mostró el mejor ajuste (p -valor = 0,008; $R^2 = 0,49$):

$$y = -0,06 * TWR - 0,005 * DEF_4 + 0,003 * P_flor_mad + 39,64 \quad \text{Ec. 11}$$

Siendo y la anomalía del rendimiento, TWR el Requerimiento Total de Agua durante todo el ciclo del cultivo, DEF_4 el déficit hídrico en el segundo período de crecimiento y P_flor_mad las lluvias ocurridas desde la floración hasta la madurez del cultivo.

Observaciones 21, Datos de 1997 a 2017. | R^2 (grado de ajuste) = 0,49

La regresión muestra por un lado que, cuanto mayor sean los requerimientos de agua del cultivo debido por ejemplo, a mayores temperaturas o a una menor capacidad de almacenaje de agua en algunos suelos, los rendimientos obtenidos serían menores probablemente debido al desarrollo de condiciones de déficit hídrico. Asimismo, el déficit hídrico en la etapa final de desarrollo también afectaría negativamente los rendimientos. Por otra parte, lluvias mayores entre la floración y la maduración del cultivo favorecerían su desarrollo.

Proyección de la anomalía del rendimiento

Al igual que en los anteriores casos, fueron aplicados los datos históricos simulados y futuros proyectados de las variables climáticas y de balance hídrico a la regresión descrita previamente. La tabla 27 muestra la variación de la media y el desvío estándar esperados de la anomalía del rendimiento de la papa en la zona sur en la temporada de primavera-verano en cada uno de los GCM y RCP seleccionados, tanto para el mediano como para el largo plazo (2010-2040 y 2040-2070 respectivamente).

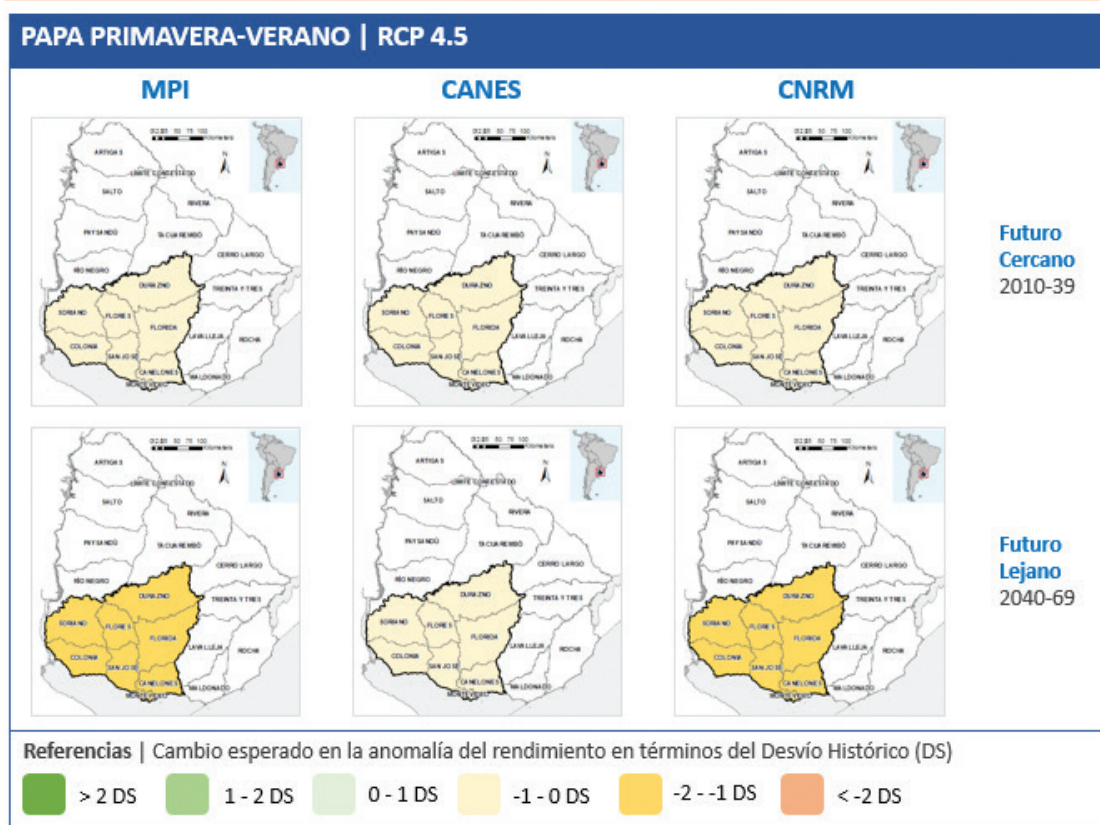
Tabla 27 | Resultados Papa - Temporada de Primavera-Verano

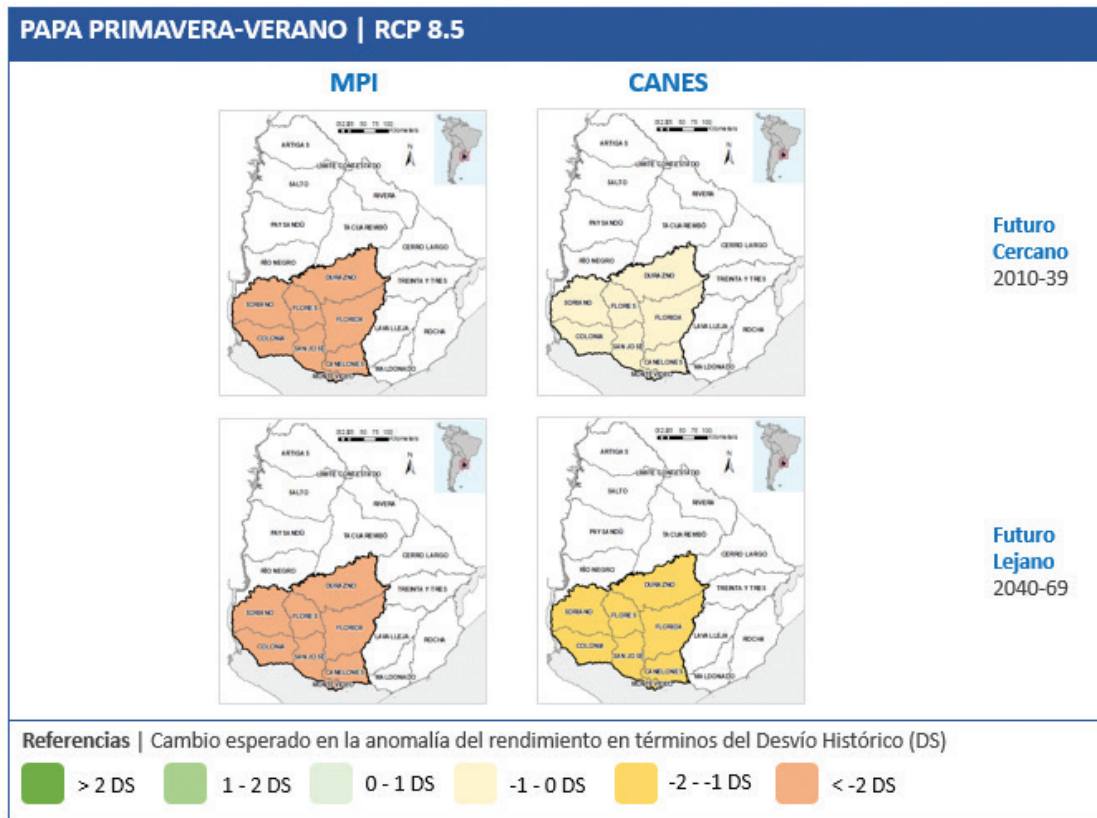
Modelo	RCP	Período	Δ Promedio (kg/ha)	Desvío Estándar (kg/ha)	Δ / DS	Significancia
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-803,36	941,35	-0,9	N.S.
		Futuro 2	-1 205,43		-1,3	*
	RCP 8.5	Futuro 1	-2 220,38		-2,4	**
		Futuro 2	-2 645,64		-2,8	**
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	-329,76	1 413,57	-0,2	N.S.
		Futuro 2	-654,48		-0,5	N.S.
	RCP 8.5	Futuro 1	-982,01		-0,7	N.S.
		Futuro 2	-1 538,54		-1,1	*
CNRM	RCP 4.5	Futuro 1	-181,97	1 244,95	-0,1	N.S.
		Futuro 2	-1 260,86		-1,0	*
Promedio 4.5		Futuro 1	-438,36		-0,4	
		Futuro 2	-1 040,26		-0,9	
Promedio 8.5		Futuro 1	-1 601,19		-1,5	
		Futuro 2	-2 092,09		-1,9	

Δ Promedio = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento.
 El Desvío Estándar (DS) corresponde al desvío histórico simulado para cada modelo.
 Δ / DS = Cambio esperado en la media de la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar.
 Significancia: N.S. = No Significativo; * Significativo; ** Muy Significativo.
 Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

En este caso, todos los modelos y escenarios climáticos que resultaron significativos apuntan a un deterioro de los rendimientos de la papa de primavera-verano en el mediano y largo plazo debido al cambio climático.

Figura 30. | Mapas de resultados para la papa – Temporada Primavera-Verano





Fuente: Elaboración propia. El DS encontrado para el modelo MPI fue de 941 kg/ha, para el CANES fue de 1.432 kg/ha y para el CNRM fue de 1.245 kg/ha.

6.6 Resumen de resultados

La tabla que aparece a continuación muestra que, en términos generales, los resultados encontrados para los promedios nacionales de rendimiento no fueron significativos en la mayoría de los casos, mientras que fueron mayormente significativos cuando se analizaron los rendimientos a nivel de regiones o lugares específicos. A su vez, las proyecciones que resultaron más significativas en general fueron las correspondientes al futuro más lejano, de 2040 a 2069 y al modelo de circulación general MPI.³⁸

A nivel de cultivos, los resultados muestran que solo el arroz se vería afectado positivamente por el cambio climático mientras que los rendimientos de la papa se verían perjudicados. Los resultados obtenidos para los restantes cultivos analizados - soja, trigo y maíz - no permiten extraer una conclusión clara, ya que algunos escenarios indican una evolución desfavorable de los rendimientos, mientras que en otros apuntan a una mejora.

En efecto, en el caso del cultivo de arroz el análisis indica un aumento significativo o muy significativo del rendimiento en todas las combinaciones de MCG y RCP tanto en el mediano como en el largo plazo, excepto en el caso del modelo CNRM para el futuro más cercano. Además, los cambios más importantes se darían en las regiones este y centro. Por el contrario, el cambio esperado en los rendimientos del cultivo de papa sería negativo en la mayoría de los contextos analizado, menos en el caso en el

³⁸ Vale recordar que en este estudio la significancia de los cambios en la media de la anomalía se midió en términos del desvío histórico de la anomalía y no en función de un test estadístico. En el último caso, que un cambio sea significativo refiere a que hay evidencia estadística de que hay un cambio efectivamente, sin importar si el cambio es chico o grande. En el caso contemplado aquí, que un cambio sea significativo refiere a que el cambio es mayor a la referencia que se estableció (1 desvío estándar de la anomalía del rendimiento).

que se utilizó información para el largo plazo del modelo MPI, escenario 4.5. Por otra parte, los cambios esperados para la soja serían significativos solo en el caso del modelo MPI en el futuro lejano tanto para el escenario de gases de efecto invernadero medio como alto (4.5 y 8.5 respectivamente). En estos casos se espera que el promedio de la anomalía disminuya, lo cual es un pronóstico desfavorable. En los otros casos en los que los resultados no fueron significativos, las señales fueron mixtas, al proyectar tanto cambios positivos como negativos. En tanto, los resultados encontrados para el trigo fueron los más heterogéneos. En efecto, los mismos apuntan a un cambio negativo, aunque no significativo, en el rendimiento promedio nacional en la mayoría de los casos, un cambio negativo y significativo en el caso del trigo inserto en una rotación con pasturas y un cambio positivo para el trigo que rota con otros cultivos. Por último, en el caso del maíz los valores obtenidos en los modelos MPI y CNRM apuntan a una mejora de la productividad, mientras que en el caso del CANES indican un empeoramiento de la misma. Sin embargo, ninguno de los valores resultó significativo.

Finalmente vale aclarar que los resultados presentados previamente deben tomarse con cautela. En efecto, los mismos contemplan información proveniente de distintos modelos de circulación global y de diferentes escenarios de gases de efecto invernadero, que están sujetos a un alto grado de incertidumbre.

Adicionalmente, también debe considerarse que los resultados parten de estimaciones de regresiones de la anomalía del rendimiento que en general, presentaron bajos grados de ajuste (ver el cuadro de resumen de regresiones). Esto podría explicarse principalmente por falta de información, ya sea porque no se dispone de una serie de datos lo suficientemente larga o porque no hay datos disponibles para otros factores que también podrían estar incidiendo en la anomalía del rendimiento de los cultivos, más allá de la temperatura y la lluvia. Estos factores podrían ser, por ejemplo, cambios en la localización de las chacras que componen el promedio nacional pasando a tierras más o menos productivas, variaciones en la fecha de siembra y cosecha entre distintos productores, etc. Entendemos a priori que dichas variables toman más relevancia cuando se analiza el rendimiento promedio para una zona geográfica más amplia, que cuando se estudia un lugar en particular, como puede ser la estación experimental de La Estanzuela. En ese marco, en la medida en que se haga disponible información georreferenciada para varios años sobre todas las variables de clima, suelos y de manejo que determinarían la variación de los rendimientos, podrían mejorarse sustancialmente las estimaciones realizadas en este trabajo.

Otra de las debilidades de este análisis, que podría superarse en el futuro, está vinculada a la resolución de los datos de capacidad de almacenaje de agua, que fueron utilizados para calcular las variables de balance hídrico. La plataforma MOSAICC trabaja por defecto con la base de datos armonizados de suelos del mundo (HWSD por sus siglas en inglés) que contiene información muy gruesa para Uruguay, de escala 1:5 millones (ver anexo II). En nuestro país contamos con una estimación de la capacidad de almacenaje de agua de los suelos con una resolución mucho más fina, de 1:40.000, realizada por Molfino, J. (2009). Sin embargo, estos datos no pudieron ser utilizados ya que la plataforma no permitía ingresar directamente el valor de dicha variable. El programa tiene previsto ingresar información respecto a todos los factores que determinan la capacidad de almacenaje y a partir de ellos la calcula. En ese cálculo se utiliza una fórmula más sofisticada que la utilizada en Uruguay y que requiere más datos que los disponibles, por lo que no fue posible reemplazar los datos globales por los locales.

Por último, también cabe advertir que la metodología de trabajo empleada aquí no contempla el impacto que el cambio climático pueda tener en el avance o retroceso de ciertas enfermedades o plagas que podrían afectar la cantidad y/o calidad de los cultivos.

A pesar de las limitantes que pueda tener el análisis presentado en este informe, los resultados obtenidos dan indicios de posibles impactos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos estudiados y, por lo tanto, proporcionan información relevante para la toma de decisiones en materia de políticas de adaptación.

Tabla 28 | Resumen de resultados

MODELO	RCP	PERÍODO	SOJA			ARROZ			TRIGO			MAÍZ			PAPA									
			Nacional	Δ	Δ/DS	Nacional	Δ	Δ/DS	Nacional	Δ	Δ/DS	Nacional	Δ	Δ/DS	Nacional	Δ	Δ/DS	Nacional	Δ	Δ/DS				
			Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)	Media (kg/ha)			
MPI	RCP 4.5	Futuro 1	-52	-0,5	1,7	384	1,9	762	1,8	490	1,7	-167	-0,4	47	0,0	-472	-1,4	-70	-0,2	-379	-0,2	-803	-0,9	
		Futuro 2	-140	-1,2	1 041	691	3,3	1 406	3,3	938	3,2	-248	-0,5	173	0,1	-751	-2,2	-414	-0,9	131	0,1	-1 205	-1,3	
	RCP 8.5	Futuro 1	-102	-0,9	587	1,8	392	1,9	801	1,9	535	1,8	-121	-0,3	53	0,0	-549	-1,6	-319	-0,7	-730	-0,4	-2 220	-2,4
		Futuro 2	-137	-1,2	1 318	4,1	881	4,2	1 803	4,3	1 194	4,1	-318	-0,7	-20	0,0	-952	-2,8	-355	-0,8	-771	-0,4	-2 646	-2,8
CANESM	RCP 4.5	Futuro 1	58	0,3	532	1,8	384	2,0	834	2,1	538	1,9	-117	-0,2	216	0,2	-484	-1,5	96	0,2	-244	-0,2	-330	-0,2
		Futuro 2	81	0,5	964	3,2	676	3,6	1 451	3,6	944	3,4	-303	-0,6	379	0,3	-782	-2,4	112	0,2	-359	-0,3	-654	-0,5
	RCP 8.5	Futuro 1	84	0,5	637	2,1	439	2,3	972	2,4	641	2,3	16	0,0	1 297	1,0	-522	-1,6	114	0,2	-1 271	-0,9	-982	-0,7
		Futuro 2	106	0,6	1 427	4,8	989	5,3	2 117	5,3	1 397	5,0	-456	-0,9	589	0,5	-1 146	-3,5	264	0,5	-1 157	-0,8	-1 539	-1,1
CNRM	RCP 4.5	-36	-0,3	318	1,0	232	1,1	-1	0,0	290	1,0	-152	-0,3	90	0,1	-372	-1,1	-103	-0,3	-398	-0,4	-182	-0,1	
	Futuro 2	-33	-0,3	803	2,4	557	2,6	669	1,6	714	2,4	-279	-0,6	-65	0,0	-613	-1,8	-106	-0,3	-748	-0,7	-1 261	-1,0	

Referencias

- No significativo, evolución positiva
- Significativo, evolución positiva
- Muy significativo, evolución positiva
- No significativo, evolución negativa
- Significativo, evolución negativa
- Muy significativo, evolución negativa

Δ Media = Cambio esperado en la anomalía del rendimiento.

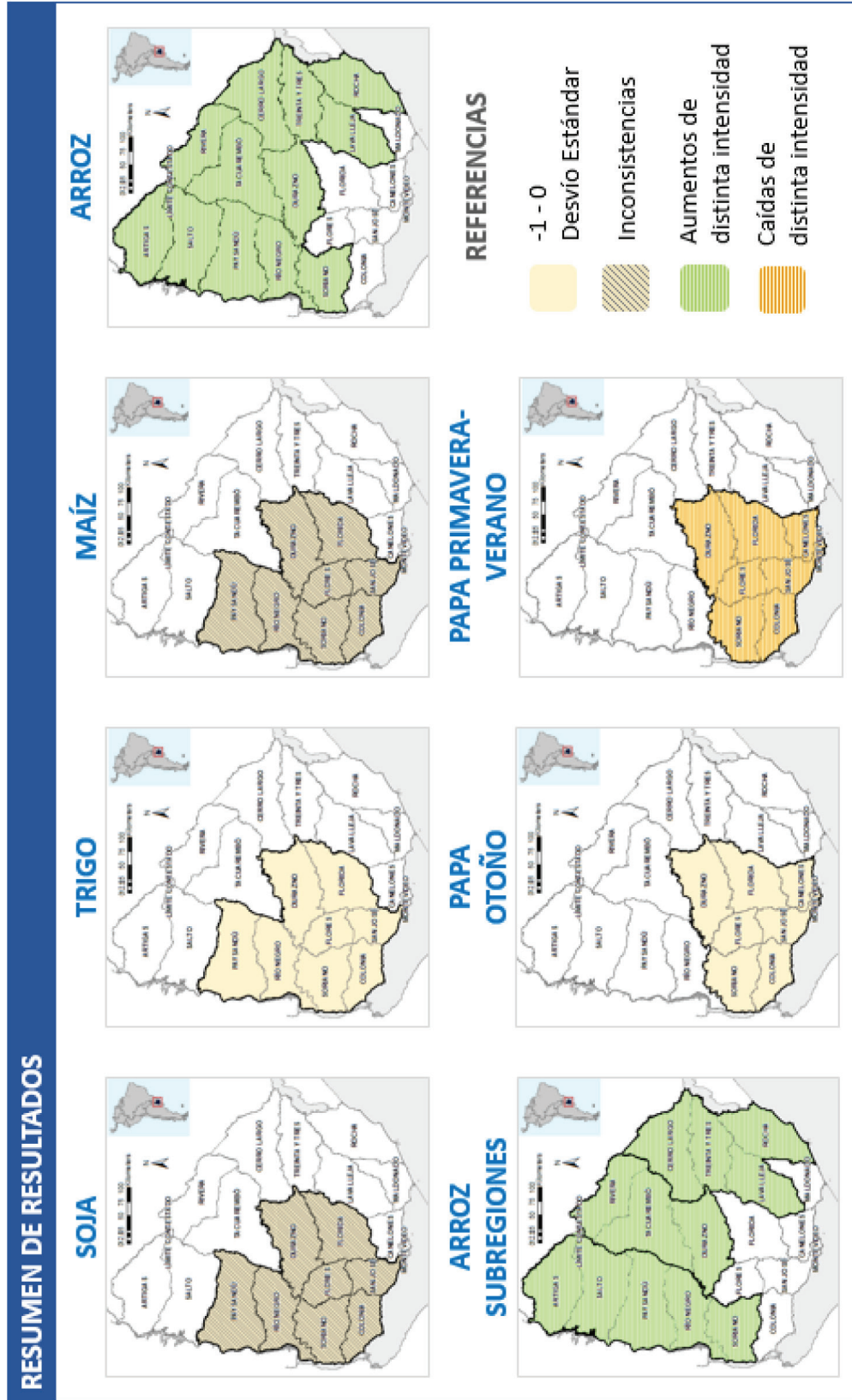
Δ / DS = Cambio esperado en la anomalía del rendimiento / Desvío Estándar (histórico simulado para cada modelo).

Futuro 1 = 2010 - 2039; Futuro 2 = 2040 - 2069.

LE 1 = La Estanzuela - Trigo inserto en una secuencia de cultivos continuos.

LE 2 = La Estanzuela - Trigo en secuencia de cultivos que rotan con pasturas.

Figura 31. | Resumen de resultados. Consistencias e inconsistencias entre los resultados encontrados para los diferentes modelos y escenarios



Aclaración: En el caso del trigo, el arroz zona centro y la papa de otoño, el resultado fue opuesto al señalado solo en un caso y por eso dejamos el resultado predominante.

Tabla 29 | Resumen de regresiones

		Modelo								
CULTIVO	ALCANCE	PERÍODO	Constante	Parámetro 1	Coef. 1	Parámetro 2	Coef. 2	Parámetro 3	Coef. 3	R ²
SOJA	Nacional	1987-2017	-	ETA _t	1,42	TWR	-0,84	-	-	0,32
	Nacional	1987-2017	-16 891	T_max_ciclo	529	-	-	-	-	0,42
	Este	1997-2016	-11 047	T_max_ciclo	362	-	-	-	-	0,29
	Centro	1997-2016	-23 197	T_max_ciclo	735	-	-	-	-	0,54
ARROZ	Norte	1997-2016	-15 098	T_max_ciclo	467	-	-	-	-	0,29
	Nacional	1975-2017	1,32	EXC _t	-0,004	SOT_min	-0,20	-	-	0,50
TRIGO	LE 1	1975-2017	-736	EXC ₂	-15	WSL_corr	22	-	-	0,21
	LE 2	1975-2017	2 051	DEF ₃	0,89	SOT_min	-433	-	-	0,20
MAÍZ	Nacional	1981-2017	-2 155	WSL_corr	37,79	PP_madurez	4,34	-	-	0,41
	Sur/Otoño	1997-2017	3,99	ETA ₂	0,03	EXC ₃	-0,05	T_min_flor	-0,27	0,51
PAPA	Sur/Primavera	1997-2017	39,64	TWR	-0,06	DEF ₄	-0,005	PP_flor_mad	0,003	0,49

Referencias

Cultivo

LE 1 = La Estanzuela - Trigo inserto en una secuencia de cultivos continuos.

LE 2 = La Estanzuela - Trigo en secuencia de cultivos que rotan con pasturas.

Parámetros

ETA_t Evapotranspiración real en el ciclo

ETA₂ Evapotranspiración real en la etapa 2

TWR Requerimiento total de agua en el ciclo

WSL_corr Índice de satisfacción de agua corregido por exceso de agua

EXC_t Exceso hídrico en el ciclo

EXC₁ Exceso hídrico en la etapa 1

EXC₃ Exceso hídrico en la etapa 3

DEF₃ Déficit hídrico en la etapa 3

DEF₄ Déficit hídrico en la etapa 4

EXC_t Exceso hídrico en el ciclo

EXC₁ Exceso hídrico en la etapa 1

EXC₃ Exceso hídrico en la etapa 3

DEF₃ Déficit hídrico en la etapa 3

DEF₄ Déficit hídrico en la etapa 4

EXC_t Exceso hídrico en el ciclo

EXC₁ Exceso hídrico en la etapa 1

EXC₃ Exceso hídrico en la etapa 3

DEF₃ Déficit hídrico en la etapa 3

DEF₄ Déficit hídrico en la etapa 4

EXC_t Exceso hídrico en el ciclo

EXC₁ Exceso hídrico en la etapa 1

EXC₃ Exceso hídrico en la etapa 3

DEF₃ Déficit hídrico en la etapa 3

DEF₄ Déficit hídrico en la etapa 4

PP_ciclo Lluvias en todo el ciclo

PP_madurez Lluvias en la etapa de madurez

SOT_min Temperatura mínima promedio entre setiembre y octubre

T_max_ciclo Temperatura máxima en el promedio del ciclo

Tabla 30 | Resumen de información fenológica

CULTIVO	ALCANCE	Fechas			Duración de las etapas en días				Kc	
		Siembra	Cosecha	Inicial	Desarrollo	T. Media	T. Final	Inicial	Medio	Final
SOJA	Nacional	16/10	14/04	23	31	72	54	0,40	1,15	0,50
	Nacional	01/10	06/03	10	90	20	35	1,05	1,20	0,75
	Este	01/10	06/03	10	90	20	35	1,05	1,20	0,75
ARROZ	Centro	01/10	06/03	10	90	20	35	1,05	1,20	0,75
	Norte	01/10	06/03	10	90	20	35	1,05	1,20	0,75
	Nacional	20/06	30/11	23	107	20	20	0,70	1,15	0,25
TRIGO	LE 1	20/06	30/11	23	107	20	20	0,70	1,15	0,25
	LE 2	20/06	30/11	23	107	20	20	0,70	1,15	0,25
MAÍZ	Nacional	01/10	19/03	19	42	60	49	0,35	1,20	0,60
	Sur/Otoño	01/02	15/05	19	23	31	30	0,50	1,15	0,75
PAPA	Sur/Primavera	01/09	30/12	19	25	46	30	0,50	1,15	0,75

Referencias

Cultivo

LE 1 = La Estanzuela - Trigo inserto en una secuencia de cultivos continuos.

LE 2 = La Estanzuela - Trigo en secuencia de cultivos que rotan con pasturas.

Duración de las etapas:

Inicial = período que se extiende desde la siembra hasta que el cultivo cubre el 10% del suelo.

Desarrollo = esta fase comienza cuando termina la anterior y dura hasta que el terreno ha sido cubierto en un 70%-80%.

T. Media = Temporada Media = período que se extiende hasta que el cultivo alcanza la madurez, incluye la floración y el llenado de granos.

T. Final = Temporada Final = corresponde al período entre que termina la tercera fase y que se cosecha el cultivo.

Fuente: FAO y DGRN.

Kc

Medio = En floración

Final = Cuando termina el ciclo del cultivo

7. Recomendaciones de política

Contemplando los resultados comentados en el capítulo anterior se realizan las siguientes recomendaciones:

- Generar/consolidar una base de datos de rendimientos y de sus posibles variables explicativas (variables climáticas, edáficas, de manejo y socio-culturales) más amplia y georreferenciada.
- Incorporar información de suelos más precisa, para afinar el cálculo de las variables de balance hídrico.
- Proyectar otras variables climáticas relevantes para el análisis (ej. evapotranspiración).
- Realizar un análisis de riesgo más completo. Es decir, a modo de atender la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas se recomienda generalmente trabajar con diferentes escenarios. En este estudio se consideraron tres GCM y dos RCP. Sin embargo, podría ser muy útil incorporar más escenarios y estimar probabilidades, para llegar a conclusiones más robustas.
- Fomentar la investigación en posibles instrumentos/acciones que permitan contrarrestar el posible impacto negativo del cambio climático en la papa (cambios de variedad, relocalización, inversión en infraestructura, por mencionar posibles ejemplos).
- Estudiar la posible evolución de distintas plagas y enfermedades antes los cambios climáticos esperados y en base a eso, promover la investigación orientada a generar variedades que mejor se adapten a las nuevas condiciones.
- Integrar este tipo de análisis en otros estudios para realizar evaluaciones más holísticas.
- Finalmente y tal como se ha propuesto en otros estudios de adaptación previos, también se recomienda extender el uso de seguros climáticos, diversificar la producción, entre otros.



8. Referencias

- Allen, R.G. et al. (1998), R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998).** *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage*. Paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Balian, C., Silva, M.E. y Borges, M. (2018).** *Análisis Costo-Beneficio del riego intermitente en el cultivo de arroz en Uruguay*. Anuario OPYPA.
- Bentancur, V. y Molinari, M. (2018).** "Proyecciones climáticas mediante reducción de escala estadística para Uruguay".
- Borges, M. (2018).** *Climate change and variability impacts on soybean production in Uruguay*. M.Science (Research) thesis, School of Life and Environmental Sciences and Centre for Regional and Rural Futures, Deakin University.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Forest, J., Aunchayna, R., & Bidegain, M. (2011).** *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009* (No. 551.58: 631 CAR).
- García, F. (2012).** *Efectos del clima, el suelo y el manejo sobre la productividad de cultivos en un agroecosistema experimental*. Tesis de Maestría. Facultad de ciencias, Universidad de la República.
- Giménez, A., Castaño, J. P., Baethgen, W., & Lanfranco, B. (2009).** *Cambio climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario*. INIA, Serie técnica, (178), 56.
- Giménez, Luis. (2012).** *Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo*. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 92-102. Recuperado en 25 de junio de 2019, de www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482012000200011&lng=es&tlng=es.
- IPCC, 2014:** Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. *In: Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.
- Jones, C. y Balian, C. (2017).** *Diálogos de adaptación para la construcción del Plan Nacional de Adaptación al cambio y la variabilidad climática para el sector agropecuario*. Anuario OPYPA.
- MGAP-FAO, 2013.** Compilado. *Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay*. Resultado del Proyecto FAO TCP URU 3302, Nuevas Políticas para la Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático. Montevideo.
- MGAP-FAO, 2013.** *Variabilidad climática de importancia para el sector productivo*. Volumen I de Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Autores: Bidegain, M.; Crisci, C.; del Puerto, L.; Inda, H.; Mazzeo, N.; Taks, J. y Terra, R. Resultado del proyecto TCP URU/3302, Montevideo.
- MGAP-FAO, 2013.** *Sensibilidad y capacidad adaptativa de la agricultura de secano y el arroz frente al cambio climático*. Volumen V de Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Autores: Mazzilli, Sebastián; Bonilla, Camila; Siri, Guillermo; Arbeletche, Pedro; Rubio, Valentina; Bacigaluz, Pilar; Taks, Javier; García, Martín; Cobas, Paula; Mondelli, Mario; Cruz, Gabriela; Astigarraga, Laura; Picasso, Valentín. Resultado del Proyecto FAO TCP URU 3302, Montevideo.
- MGAP-FAO, 2013.** *Sensibilidad y capacidad adaptativa de la viticultura y la fruticultura frente al cambio climático*. Volumen VI de Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Autores: Ferrer, Milka; Camussi, Gianfranca; Fourment, Mercedes; Varela, Victoria; Pereyra, Gustavo; Taks, Javier, Contreras, Soledad; Cruz, Gabriela; Astigarraga, Laura; Picasso, Valentín. Resultado del proyecto FAO TCP URU 3302, Montevideo.

MGAP, 2018. Informe sobre Riego en Uruguay. Trabajos Especiales N.º 354. Estadísticas Agropecuarias (DIEA). Cited 22 November 2019]. www.mgap.gub.uy/sites/default/files/informe_riego_en_uruguay.pdf

Molfino, J. (2009). *Estimación del Agua Disponible en los grupos CONEAT*. Metodología empleada.

Anexo I - Matriz de Correlaciones | Anomalía, variables climáticas y variables de balance hídrico

%	Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSI (raw)	WSI (corr)	T_Min Ene.	T_Min Feb.	T_Min Mad.	T_Min Flor.	T_Min Ene.	T_Min Feb.	T_Min Mad.	T_Min Flor.	T_Max Ene.	T_Max Feb.	T_Max Mad.	T_Max Flor.	Prec. Ciclo	Prec. Ene.	Prec. Feb.	Prec. Mad.	Prec. Flor.														
	T_Max Ciclo	-0,31	-0,56	-0,03	-0,36	-0,18	-0,29	-0,13	-0,36	-0,09	0,13	-0,19	-0,19	-0,08	0,38	0,42	0,40	0,16	0,31	0,48	-0,33	-0,34	-0,04	0,34	-0,17	-0,03	-0,32	-0,06	-0,07	0,60	1,00																
	T_Max Emergencia	-0,01	-0,30	-0,18	-0,29	-0,13	-0,36	-0,09	0,13	-0,19	-0,19	-0,08	0,38	0,42	0,40	0,16	0,31	0,48	-0,33	-0,34	-0,04	0,34	-0,17	-0,03	-0,32	-0,06	-0,07	0,60	1,00																		
	T_Max Floración	-0,26	-0,44	-0,14	-0,31	-0,58	0,17	-0,20	-0,21	-0,27	-0,12	0,07	0,41	0,07	0,33	0,67	-0,14	0,82	-0,50	-0,53	0,18	-0,23	0,43	0,05	0,17	0,41	0,25	0,70	0,16	1,00																	
	T_Max Llenado de grano	-0,34	-0,65	0,00	-0,28	-0,61	-0,38	-0,22	-0,04	0,03	-0,43	-0,17	0,64	0,18	0,22	0,58	0,51	0,66	-0,67	-0,68	-0,11	-0,30	0,06	0,04	-0,05	0,28	-0,03	0,70	0,18	0,33	1,00																
	T_Max Madurez	-0,18	-0,22	0,35	0,05	-0,20	-0,28	-0,11	-0,05	-0,04	-0,17	-0,04	0,27	0,05	-0,06	0,25	0,29	0,18	-0,23	-0,19	0,11	-0,23	0,17	0,09	0,25	0,25	-0,03	0,50	0,14	0,15	0,17	1,00															
	T_Max Enero	-0,28	-0,36	-0,04	-0,26	-0,46	0,10	-0,19	-0,14	-0,12	-0,11	-0,07	0,35	0,10	0,27	0,51	-0,07	0,70	-0,41	-0,46	0,05	-0,24	0,38	-0,04	0,05	0,36	0,22	0,62	0,15	0,73	0,45	0,15	1,00														
	T_Max Febrero	-0,30	-0,43	0,05	0,00	-0,52	-0,14	-0,08	-0,02	-0,05	-0,32	0,06	0,39	-0,09	-0,03	0,50	0,27	0,59	-0,46	-0,51	0,11	-0,12	0,12	0,09	0,17	0,31	0,14	0,55	0,08	0,44	0,72	0,07	0,31	1,00													
	Precip Ciclo	0,37	0,84	0,16	0,51	0,72	0,53	0,70	0,22	0,35	0,55	0,50	-0,90	-0,40	-0,51	-0,71	-0,72	-0,58	0,84	0,64	0,35	0,31	0,02	0,21	0,16	-0,22	0,22	-0,60	-0,35	-0,31	-0,57	-0,30	-0,24	-0,34	1,00												
	Precip Emergencia	0,25	0,56	0,48	0,64	0,58	-0,08	0,55	0,58	0,60	0,11	-0,01	-0,61	-0,53	-0,73	-0,61	-0,02	-0,41	0,56	0,33	-0,02	0,41	-0,21	-0,15	-0,11	-0,30	-0,23	-0,35	-0,10	-0,48	-0,20	-0,06	-0,27	-0,15	0,51	1,00											
	Precip Floración	0,37	0,68	0,15	0,24	0,72	0,23	0,21	-0,03	0,03	0,59	0,11	-0,63	-0,22	-0,18	-0,72	-0,31	-0,58	0,70	0,74	0,10	0,14	-0,10	0,10	0,04	-0,25	0,09	-0,57	-0,15	-0,47	-0,59	-0,17	-0,48	-0,41	0,57	0,10	1,00										
	Precip Llenado de grano	0,27	0,55	-0,23	0,16	0,35	0,74	0,57	-0,02	0,15	0,45	0,67	-0,59	-0,07	-0,10	-0,30	-0,90	-0,26	0,54	0,34	0,44	0,21	0,17	0,37	0,09	-0,04	0,44	-0,30	-0,21	0,08	-0,41	-0,29	0,04	-0,31	0,72	0,02	0,25	1,00									
	Precip Madurez	-0,13	0,01	0,06	0,07	-0,07	0,12	0,04	-0,11	-0,11	0,06	0,19	-0,08	-0,09	-0,12	0,07	-0,18	-0,07	0,02	0,04	0,19	-0,20	0,19	0,07	0,43	0,12	0,10	-0,14	-0,36	0,12	-0,04	-0,12	0,12	0,17	0,36	-0,04	0,04	0,06	1,00								
	Precip Enero	0,24	0,47	0,12	0,17	0,58	0,01	0,10	-0,07	-0,11	0,59	0,05	-0,43	-0,14	-0,11	-0,50	-0,21	-0,26	0,46	0,46	-0,05	0,09	-0,10	0,01	-0,14	-0,21	0,17	-0,29	0,01	-0,14	-0,49	-0,09	-0,12	-0,49	0,40	0,02	0,57	0,35	-0,05	1,00							
	Precip Febrero	0,15	0,51	-0,14	0,07	0,31	0,76	0,32	-0,17	0,34	0,44	0,31	-0,53	-0,07	-0,06	-0,28	-0,80	-0,27	0,51	0,40	0,39	0,08	0,35	0,22	0,16	0,17	0,37	-0,23	-0,25	0,14	-0,45	-0,03	0,06	-0,28	0,47	-0,02	0,17	0,70	-0,01	0,14	1,00						

Trigo
Trigo inserto en una rotación de cultivos sin pasturas - La Estanzuela

Anomalia	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	DEFT	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	ETAT	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	EXCT	TWR	WSL_RAW	WSL_CORR	SOT_MIN
Anomalia	1,00																		
DEF1	0,02	1,00																	
DEF2	-0,10	0,27	1,00																
DEF3	-0,09	-0,01	0,15	1,00															
DEF4	0,10	0,01	0,29	0,41	1,00														
DEFT	-0,05	0,35	0,85	0,53	0,64	1,00													
ETA1	-0,10	-0,85	-0,31	0,01	-0,06	-0,38	1,00												
ETA2	0,18	-0,15	-0,91	-0,14	-0,30	-0,77	0,23	1,00											
ETA3	0,16	-0,13	-0,21	-0,92	-0,49	-0,60	0,12	0,21	1,00										
ETA4	-0,12	0,02	-0,27	-0,34	-0,91	-0,57	0,03	0,29	0,38	1,00									
ETAT	0,12	-0,22	-0,76	-0,56	-0,69	-0,93	0,30	0,81	0,66	0,66	1,00								
EXC1	0,03	-0,31	-0,20	-0,09	-0,01	-0,22	0,28	0,14	0,10	0,03	0,16	1,00							
EXC2	-0,34	-0,19	-0,49	-0,16	-0,35	-0,53	0,23	0,38	0,16	0,31	0,42	0,04	1,00						
EXC3	0,08	-0,13	-0,29	-0,21	-0,39	-0,41	0,10	0,33	0,25	0,43	0,45	-0,06	0,13	1,00					
EXC4	0,18	-0,13	0,11	-0,44	-0,28	-0,17	0,02	-0,13	0,51	0,24	0,21	0,13	-0,09	-0,02	1,00				
EXCT	-0,07	-0,37	-0,36	-0,40	-0,40	-0,55	0,30	0,26	0,45	0,37	0,49	0,65	0,55	0,13	0,57	1,00			
TWR	0,18	-0,02	0,27	0,35	0,20	0,35	0,02	0,00	-0,18	-0,04	-0,09	0,01	-0,36	0,10	0,10	-0,13	1,00		
WSL_RAW	0,08	-0,20	-0,78	-0,60	-0,70	-0,96	0,28	0,79	0,67	0,65	0,99	0,16	0,48	0,41	0,18	0,50	-0,25	1,00	
WSL_CORR	0,22	-0,07	-0,65	-0,59	-0,65	-0,83	0,20	0,72	0,66	0,61	0,92	0,00	0,21	0,39	0,13	0,23	-0,17	0,92	1,00
SOT_MIN	0,01	-0,34	-0,17	-0,34	0,05	-0,26	0,27	0,12	0,29	0,01	0,22	0,10	0,23	0,33	-0,11	0,16	-0,18	0,20	1,00

Trigo inserto en una rotación de cultivos con pasturas - La Estanzuela

	Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSL_raw	WSL_Corr	ijatmin	ijatmax	ijatmed	jjapp	astmin	astmax	aspp	sotmin	sotmax	sotmed	sopp	
Anomalia	1,00																											
ETA1	0,00	1,00																										
ETA2	0,06	0,28	1,00																									
ETA3	0,08	0,81	0,20	1,00																								
ETA4	-0,14	0,67	0,12	0,22	1,00																							
EXC1	0,01	0,68	0,02	0,31	0,39	1,00																						
EXC2	-0,07	0,48	0,29	0,22	0,47	0,38	1,00																					
EXC3	0,05	0,16	0,26	0,12	0,11	0,04	0,63	1,00																				
EXC4	-0,12	0,39	0,21	0,34	0,16	0,31	0,50	-0,03	1,00																			
DEF1	0,02	0,45	0,10	0,34	0,25	0,42	0,14	-0,06	0,14	1,00																		
DEF2	-0,06	0,21	0,02	-0,12	0,51	0,24	0,60	0,13	-0,09	-0,02	1,00																	
DEF3	0,00	-0,92	-0,37	-0,76	-0,61	-0,57	-0,53	-0,19	-0,50	-0,42	-0,17	1,00																
DEF4	-0,03	-0,19	-0,85	-0,12	-0,11	0,04	-0,35	-0,29	-0,17	-0,13	-0,13	0,34	1,00															
TWR	-0,06	-0,74	-0,30	-0,90	-0,22	-0,27	-0,32	-0,17	-0,46	-0,30	0,11	0,85	0,25	1,00														
WSL_raw	0,20	-0,56	0,01	-0,14	-0,92	-0,33	-0,42	-0,09	-0,18	-0,21	-0,44	0,55	-0,01	0,16	1,00													
WSL_corr	-0,06	-0,69	-0,05	-0,29	-0,50	-0,91	-0,38	0,00	-0,33	-0,39	-0,28	0,64	-0,02	0,27	0,42	1,00												
ijatmin	0,03	-0,02	0,02	0,06	-0,16	0,01	-0,08	0,06	-0,33	0,10	0,10	0,32	-0,01	0,24	0,36	0,16	1,00											
ijatmax	0,00	0,99	0,26	0,78	0,68	0,66	0,48	0,14	0,45	0,42	0,19	-0,96	-0,17	-0,77	-0,61	-0,70	-0,18	1,00										
ijatmed	0,10	0,93	0,19	0,73	0,66	0,62	0,23	0,01	0,20	0,39	0,13	-0,83	-0,05	-0,65	-0,58	-0,65	-0,12	0,93	1,00									
jjapp	-0,14	0,07	0,23	0,23	-0,19	-0,06	0,10	0,21	0,13	0,04	-0,17	-0,13	-0,14	-0,32	0,20	0,13	-0,07	0,06	0,00	1,00								
astmin	0,00	0,06	-0,03	0,12	-0,06	0,04	-0,12	0,02	-0,16	0,12	-0,10	0,12	0,17	0,08	0,09	0,01	0,44	-0,01	0,06	0,28	1,00							
astmax	-0,13	0,12	0,18	0,23	-0,10	0,01	0,11	0,21	0,14	0,05	-0,17	-0,17	-0,11	-0,27	0,09	0,00	-0,07	0,12	0,04	0,88	0,52	1,00						
aspp	0,02	0,52	0,39	0,62	0,20	0,11	0,54	0,50	0,42	0,00	0,03	-0,67	-0,37	-0,78	-0,14	-0,12	-0,21	0,55	0,36	0,49	0,03	0,51	1,00					
sotmin	-0,40	0,13	0,11	0,17	0,06	-0,02	0,05	0,10	0,22	0,12	-0,25	-0,23	-0,04	-0,33	-0,12	0,10	-0,29	0,17	0,09	0,63	0,21	0,58	0,39	1,00				
sotmax	-0,04	0,07	-0,05	0,10	-0,08	0,14	-0,22	-0,11	-0,15	0,16	-0,15	0,11	0,01	0,15	0,11	-0,07	0,55	-0,02	0,03	0,01	0,58	0,19	-0,14	0,07	1,00			

Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSI_ raw	WSI_ Corr	jjatmin	jjatmax	jjatmed	jjapp	astmin	astmax	astmed	aspp	sotmin	sotmax	sotmed	sopp			
astmed	0,30	0,02	0,32	0,13	0,18	0,02	-0,02	0,24	0,21	-0,22	-0,30	0,00	-0,30	0,00	-0,12	-0,10	0,31	0,25	0,53	0,38	0,63	0,29	0,74	0,50	1,00					
aspp	-0,05	0,57	-0,03	0,80	0,09	0,19	0,05	-0,08	0,28	0,11	-0,13	-0,45	0,25	-0,65	-0,04	-0,17	0,07	0,56	0,54	0,23	0,22	0,38	0,24	0,02	0,31	1,00				
sotmin	-0,44	0,26	0,30	0,20	0,32	-0,03	0,21	0,13	0,27	0,28	-0,08	-0,31	-0,32	-0,26	-0,34	0,08	-0,16	0,28	0,22	0,19	-0,01	0,15	0,16	0,60	-0,01	0,44	1,00			
sotmax	-0,08	0,24	0,27	0,17	0,16	0,14	0,20	0,23	-0,06	0,17	0,14	-0,03	-0,24	0,07	0,05	-0,13	0,70	0,11	0,09	-0,11	0,15	-0,08	-0,09	-0,19	0,48	0,02	0,03	0,18	1,00	
sotmed	-0,39	0,50	0,31	0,40	0,37	0,23	0,22	0,09	0,29	0,39	-0,05	-0,44	-0,31	-0,32	-0,36	-0,18	0,06	0,47	0,44	0,05	0,04	0,07	0,12	0,37	0,27	0,53	0,20	0,82	1,00	
sopp	-0,08	0,85	0,13	0,70	0,70	0,43	0,30	0,03	0,20	0,03	0,20	-0,04	-0,54	-0,60	-0,46	0,11	0,82	0,84	-0,10	0,02	-0,11	0,23	0,03	0,04	0,17	0,56	0,35	0,31	0,57	1,00

Trigo promedio nacional

	Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXCt	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEFt	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSL_raw	WSL_Corr	jjatmin	jjatmax	jjapp	astmin	astmax	aspp	sotmin	sotmax	sopp			
Anomalia	1,00																													
ETA1	-0,52	1,00																												
ETA2	-0,19	0,41	1,00																											
ETA3	-0,26	0,68	0,33	1,00																										
ETA4	-0,49	0,83	0,32	0,36	1,00																									
EXCt	-0,38	0,62	0,08	-0,02	0,46	1,00																								
EXC1	-0,61	0,73	0,36	0,61	0,58	0,33	1,00																							
EXC2	-0,13	0,38	0,28	0,35	0,30	0,13	0,51	1,00																						
EXC3	-0,60	0,58	0,23	0,56	0,47	0,17	0,91	0,32	1,00																					
EXC4	-0,61	0,37	0,19	0,15	0,34	0,32	0,33	-0,01	0,27	1,00																				
DEFt	-0,25	0,46	0,26	0,21	0,35	0,43	0,43	-0,09	0,13	0,21	1,00																			
DEF1	0,55	-0,93	-0,44	-0,80	-0,74	-0,40	-0,80	-0,43	-0,66	-0,35	-0,44	1,00																		
DEF2	0,30	-0,53	-0,81	-0,59	-0,41	0,00	-0,52	-0,46	-0,43	-0,15	-0,13	0,66	1,00																	
DEF3	0,34	-0,67	-0,35	-0,95	-0,39	0,02	-0,67	-0,44	-0,61	-0,15	-0,20	0,86	0,66	1,00																
DEF4	0,55	-0,85	-0,28	-0,38	-0,96	-0,53	-0,59	-0,27	-0,48	-0,38	-0,39	0,77	0,35	0,42	1,00															
TWR	0,49	-0,69	-0,14	-0,08	-0,61	-0,89	-0,50	-0,08	-0,31	-0,42	-0,63	0,55	0,07	0,10	0,65	1,00														
WSL_raw	-0,04	-0,19	0,27	-0,18	-0,24	-0,03	-0,25	-0,17	-0,32	0,14	0,10	0,29	-0,02	0,30	0,31	0,07	1,00													
WSL_corr	-0,49	0,99	0,35	0,68	0,84	0,60	0,74	0,40	0,60	0,33	0,42	-0,94	-0,51	-0,69	-0,86	-0,67	-0,35	1,00												
jjatmin	-0,09	0,73	0,14	0,36	0,67	0,56	0,17	0,06	0,07	0,06	0,27	-0,58	-0,22	-0,34	-0,68	-0,54	-0,33	0,75	1,00											
jjatmax	-0,27	0,17	0,06	0,21	0,10	0,03	0,39	0,31	0,36	0,25	0,05	-0,26	-0,22	-0,30	-0,10	-0,05	-0,09	0,17	-0,26	1,00										
jjapp	-0,22	-0,01	0,11	0,02	-0,03	-0,03	0,02	-0,10	-0,07	0,41	0,21	0,11	0,05	0,12	0,08	0,02	0,62	-0,12	-0,31	0,26	1,00									
astmin	-0,37	0,45	0,23	0,71	0,28	-0,13	0,73	0,52	0,75	0,20	0,01	-0,64	-0,53	-0,80	-0,27	0,01	-0,39	0,49	0,04	0,44	-0,09	1,00								
astmax	-0,33	0,16	-0,04	0,14	0,11	0,10	0,28	0,17	0,27	0,24	0,03	-0,20	-0,06	-0,21	-0,16	-0,04	-0,12	0,16	-0,10	0,67	0,15	0,35	1,00							
aspp	-0,14	-0,02	0,20	-0,08	-0,03	0,04	-0,06	-0,20	-0,06	0,19	0,08	0,16	-0,05	0,24	0,04	0,01	0,52	-0,11	-0,21	0,06	0,65	-0,30	0,10	1,00						
sotmin	-0,22	0,45	0,00	0,53	0,31	0,10	0,45	-0,09	0,49	0,26	0,28	-0,49	-0,01	-0,49	-0,39	-0,26	-0,17	0,45	0,19	0,31	0,08	0,36	0,42	-0,10	1,00					
sotmax	-0,60	0,46	0,23	0,31	0,43	0,23	0,46	0,25	0,45	0,48	0,06	-0,47	-0,35	-0,36	-0,48	-0,22	-0,15	0,46	0,25	0,21	0,00	0,43	0,54	0,05	0,21	1,00				
sopp	-0,05	0,19	0,46	0,08	0,07	0,21	0,11	0,05	0,03	0,02	0,20	-0,08	-0,37	0,04	0,01	-0,22	0,63	0,08	0,07	-0,19	0,21	-0,11	-0,26	0,46	-0,14	0,03	1,00			
sopp	-0,61	0,83	0,38	0,39	0,85	0,63	0,15	0,53	0,57	0,44	-0,74	-0,34	-0,39	-0,88	-0,72	-0,14	0,82	0,57	0,04	0,07	0,23	0,11	0,02	0,47	0,54	0,09	0,09	1,00		

Anomalía	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSI (raw)	WSI (corr.)	T_Min L.Gr.	T_Min Flor.	T_Min Eme.	T_Min Feb.	T_Min Ene.	T_Max L.Gr.	T_Max Flor.	T_Max Eme.	T_Max Feb.	T_Max Ene.	Prec. Ciclo	Prec. Eme.	Prec. Flor.	Prec. L.Gr.	Prec. Mad.	Prec. Ene.	Prec. Feb.									
T_Min Febrero	-0.09	0.06	0.11	-0.06	-0.04	0.28	0.10	-0.11	-0.03	-0.05	0.35	-0.06	-0.03	0.08	0.11	-0.34	0.03	0.06	-0.02	0.57	0.05	0.21	0.87	0.19	0.19	1.00															
T_Max Ciclo	-0.43	-0.54	-0.20	-0.30	-0.55	-0.18	-0.22	-0.03	-0.10	-0.40	-0.18	0.56	0.16	0.31	0.59	0.24	0.93	-0.61	-0.67	0.09	-0.02	0.08	0.24	-0.04	0.30	0.14	1.00														
T_Max Emergencia	-0.19	-0.27	-0.23	-0.29	-0.10	-0.24	-0.06	0.17	0.02	-0.15	-0.20	0.35	0.27	0.38	0.14	0.22	0.54	-0.30	-0.35	0.07	0.34	-0.26	0.02	0.00	-0.05	-0.07	0.62	1.00													
T_Max Floración	-0.36	-0.45	-0.13	-0.29	-0.59	0.11	-0.26	-0.21	-0.30	-0.29	0.09	0.41	0.02	0.24	0.65	-0.07	0.77	-0.51	-0.51	0.14	-0.23	0.45	0.29	-0.11	0.42	0.19	0.66	0.14	1.00												
T_Max Llenado de grano	-0.43	-0.47	-0.17	-0.18	-0.56	-0.10	-0.17	-0.01	-0.08	-0.33	-0.14	0.44	0.04	0.17	0.55	0.18	0.74	-0.51	-0.57	-0.01	-0.20	0.23	0.28	-0.26	0.36	0.19	0.73	0.16	0.46	1.00											
T_Max Madurez	-0.09	-0.27	-0.05	-0.07	-0.19	-0.33	-0.09	-0.09	0.23	-0.18	-0.43	0.30	0.01	0.02	0.17	0.47	0.18	-0.27	-0.32	-0.07	-0.09	-0.30	-0.02	0.34	0.06	-0.01	0.31	0.03	-0.08	0.17	1.00										
T_Max Eneiro	-0.50	-0.40	-0.23	-0.27	-0.50	0.06	-0.21	-0.13	-0.22	-0.25	0.02	0.39	0.21	0.27	0.54	-0.05	0.72	-0.46	-0.48	0.02	-0.23	0.35	0.30	-0.26	0.36	0.22	0.66	0.15	0.55	0.81	0.02	1.00									
T_Max Febrero	-0.12	-0.39	0.10	0.05	-0.49	-0.25	-0.19	0.02	-0.05	-0.34	-0.24	0.35	-0.25	-0.07	0.46	0.37	0.57	-0.42	-0.45	0.05	-0.11	0.09	0.21	-0.11	0.31	0.14	0.61	0.08	0.45	0.73	0.27	0.31	1.00								
Precip Ciclo	0.44	0.95	0.06	0.61	0.82	0.51	0.75	0.36	0.46	0.38	0.64	-0.96	-0.11	-0.59	-0.82	-0.62	-0.57	0.95	0.79	0.38	0.41	0.00	0.00	0.11	-0.30	0.13	-0.48	-0.24	-0.37	-0.41	-0.30	-0.33	-0.39	1.00							
Precip Emergencia	0.19	0.63	-0.18	0.78	0.61	-0.12	0.65	0.40	0.69	-0.01	0.15	-0.65	0.01	-0.76	-0.63	0.04	-0.38	0.62	0.42	0.13	0.40	-0.21	-0.28	0.08	-0.29	-0.23	-0.24	-0.09	-0.46	-0.17	0.05	-0.25	-0.13	0.63	1.00						
Precip floración	0.54	0.70	0.14	0.24	0.73	0.35	0.32	0.16	0.03	0.71	0.34	-0.67	-0.06	-0.22	-0.74	-0.42	-0.61	0.72	0.76	0.13	0.16	-0.08	-0.07	0.19	-0.32	0.07	-0.61	-0.29	-0.39	-0.57	-0.28	-0.57	-0.41	0.67	0.16	1.00					
Precip Llenado de grano	0.04	0.49	0.15	0.04	0.31	0.74	0.31	-0.09	-0.07	0.09	0.83	-0.51	-0.04	-0.03	-0.26	-0.84	-0.22	0.48	0.44	0.35	0.11	0.30	0.39	-0.06	0.08	0.40	-0.20	-0.15	0.09	-0.21	-0.44	0.11	-0.43	0.55	-0.05	0.25	1.00				
Precip Madurez	0.33	0.23	-0.12	0.08	0.12	0.34	0.23	-0.03	0.16	0.31	0.20	-0.24	0.14	-0.04	-0.10	-0.41	-0.01	0.21	0.14	0.23	0.24	0.08	-0.07	0.14	-0.21	0.11	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.02	-0.03	0.40	0.08	0.32	0.06	1.00			
Precip Eneiro	0.17	0.46	0.17	0.17	0.55	0.09	0.15	-0.09	-0.08	0.40	0.38	-0.41	-0.04	-0.14	-0.47	-0.24	-0.23	0.45	0.47	-0.01	0.08	-0.12	0.05	-0.02	-0.21	0.17	-0.27	0.00	-0.13	-0.45	-0.19	-0.12	-0.49	0.41	0.00	0.43	0.52	0.09	1.00		
Precip Febrero	0.02	0.43	0.13	0.02	0.16	0.85	0.34	-0.05	-0.02	0.82	-0.48	-0.06	-0.04	-0.15	-0.90	-0.23	0.43	0.37	0.42	0.08	0.42	0.41	-0.05	0.17	0.37	-0.19	-0.25	0.15	-0.12	-0.46	0.06	-0.28	0.52	-0.02	0.23	0.90	0.05	0.14	1.00		

Arroz Promedio Nacional

Anormalia	ETA ₁	ETA ₂	ETA ₃	ETA ₄	ETA _T	EXC ₁	EXC ₂	EXC ₃	EXC ₄	EXC _T	TWR	PP_CICLO	PP_FLOR_LLEN	TMAX_CICLO	TMAX_FLOR_COS	TMIN_SIE_EME	TMIN_FLORACION
Anormalia	1,00																
ETA ₁	-0,23	1,00															
ETA ₂	-0,48	0,23	1,00														
ETA ₃	-0,39	0,21	0,46	1,00													
ETA ₄	0,12	0,45	0,04	-0,07	1,00												
ETA _T	-0,43	0,68	0,76	0,67	0,44	1,00											
EXC ₁	0,13	0,16	0,06	0,22	0,27	0,25	1,00										
EXC ₂	-0,05	0,26	0,44	0,09	0,00	0,34	-0,05	1,00									
EXC ₃	-0,35	-0,14	0,00	0,19	0,12	0,06	-0,03	-0,05	1,00								
EXC ₄	-0,16	0,07	0,21	-0,28	0,39	0,13	-0,05	-0,07	-0,03	1,00							
EXC _T	-0,16	0,08	0,24	-0,27	0,40	0,15	-0,04	-0,01	-0,02	1,00							
TWR	0,61	-0,22	-0,42	-0,50	0,06	-0,46	-0,01	-0,11	-0,38	0,01	0,00	1,00					
PP_CICLO	-0,63	0,29	0,64	0,52	0,25	0,69	0,14	0,21	0,32	0,40	0,41	-0,53	1,00				
PP_FLOR_LLEN	-0,34	0,05	0,20	0,01	0,54	0,27	-0,01	-0,10	0,32	0,73	0,72	-0,26	0,66	1,00			
TMAX_CICLO	0,65	-0,26	-0,37	-0,57	-0,10	-0,53	-0,08	-0,08	-0,54	0,02	0,01	0,77	-0,63	-0,38	1,00		
TMAX_FLOR_COS	0,28	-0,26	-0,36	-0,59	-0,19	-0,56	-0,05	-0,28	-0,33	0,09	0,07	0,57	-0,46	-0,27	1,00		
TMIN_SIE_EME	-0,12	0,24	0,15	0,27	-0,20	0,21	-0,09	0,46	0,01	-0,08	-0,06	0,29	-0,17	0,06	-0,05	1,00	
TMIN_FLORACION	0,20	-0,10	-0,20	-0,37	0,22	-0,22	0,28	0,06	-0,09	0,42	0,43	0,27	0,08	0,18	0,40	-0,18	1,00

Las variables de déficit hídrico no se consideraron en este caso porque el cultivo se desarrolla bajo riego y en periodos en los que no está regado (en la implantación, por ejemplo), en caso de que haya déficit severo, existe la posibilidad de hacer un "baño" de agua.

Región Este

Anomalía	ETA _T	EXC ₁	EXC ₂	PP_CICLO	PP_FLOR_LLEN	TMAX_CICLO	TMAX_FLOR_COS	TMIN_FLORACION	TMIN_SIE_EME	
Anomalía	1,00									
ETA _T	-0,34	1,00								
EXC ₁	-0,33	0,44	1,00							
EXC ₂	-0,32	0,53	0,51	1,00						
PP_CICLO	-0,49	0,80	0,45	0,51	1,00					
PP_FLOR_LLEN	-0,26	0,42	-0,09	0,22	0,67	1,00				
TMAX_CICLO	0,54	-0,42	-0,18	-0,28	-0,48	-0,15	1,00			
TMAX_FLOR_COS	0,17	-0,51	-0,38	-0,34	-0,44	-0,19	0,70	1,00		
TMIN_FLORACION	-0,03	0,33	-0,09	0,06	0,53	0,69	0,09	0,11	1,00	
TMIN_SIE_EME	-0,11	0,08	0,66	-0,03	0,18	-0,24	0,07	0,07	0,02	1,00

Región Norte y Litoral Oeste

Anomalía	ETA _T	EXC ₁	EXC ₂	PP_CICLO	PP_FLOR_LLEN	TMAX_CICLO	TMAX_FLOR_COS	TMIN_FLORACION	TMIN_SIE_EME	
Anomalía	1,00									
ETA _T	-0,28	1,00								
EXC ₁	-0,32	0,46	1,00							
EXC ₂	-0,29	0,42	0,26	1,00						
PP_CICLO	-0,45	0,86	0,45	0,50	1,00					
PP_FLOR_LLEN	-0,37	0,44	-0,10	0,50	0,71	1,00				
TMAX_CICLO	0,54	-0,67	-0,17	-0,36	-0,71	-0,53	1,00			
TMAX_FLOR_COS	0,19	-0,54	0,05	-0,24	-0,51	-0,38	0,78	1,00		
TMIN_FLORACION	-0,18	0,10	-0,17	0,00	0,02	0,07	-0,05	0,18	1,00	
TMIN_SIE_EME	0,06	0,27	0,37	-0,19	0,21	-0,17	0,08	-0,07	-0,02	1,00

Región Centro

	Anomalía	ETA _T	EXC ₁	EXC ₂	PP_CICLO	PP_FLOR_LLEN	TMAX_CICLO	TMAX_FLOR_COS	TMIN_FLORACION	TMIN_SIE_EME
Anomalía	1,00									
ETA _T	-0,47	1,00								
EXC ₁	-0,42	0,43	1,00							
EXC ₂	-0,38	0,34	-0,01	1,00						
PP_CICLO	-0,53	0,81	0,43	0,44	1,00					
PP_FLOR_LLEN	-0,27	0,32	-0,12	0,49	0,64	1,00				
TMAX_CICLO	0,73	-0,55	-0,20	-0,36	-0,62	-0,32	1,00			
TMAX_FLOR_COS	0,35	-0,58	-0,04	-0,21	-0,43	-0,14	0,75	1,00		
TMIN_FLORACION	0,22	0,17	-0,25	0,00	0,23	0,48	0,22	0,33	1,00	
TMIN_SIE_EME	0,07	0,13	0,31	-0,16	0,21	-0,18	-0,02	-0,02	0,03	1,00

Papa
Temporada de otoño

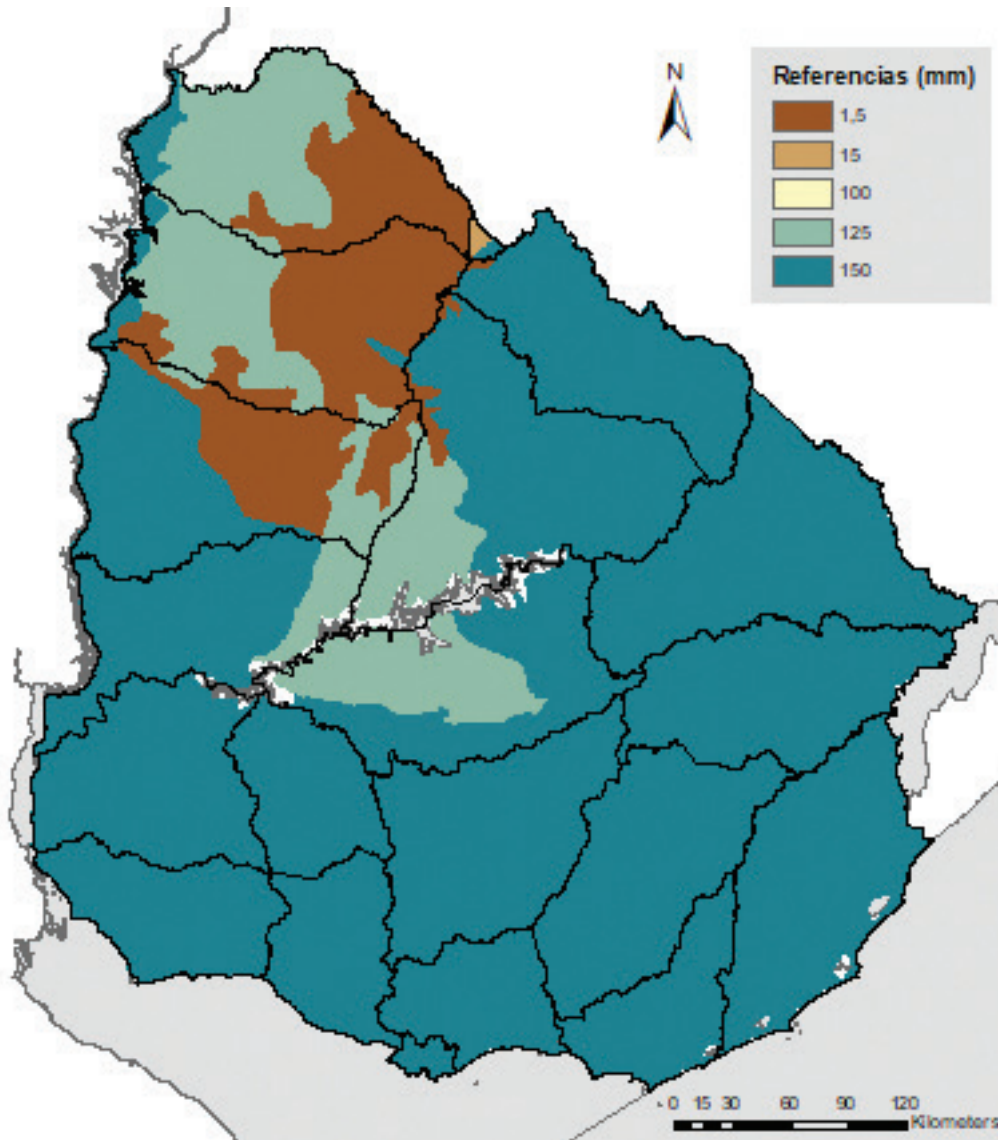
Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXCt	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEFt	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSI (raw)	WSI (corr. for surplus)	P d_7a14	Tmax d_7a8	Tmin d_7a8			
Anomalia	1,00																						
ETA1	0,08	1,00																					
ETA2	0,16	0,17	1,00																				
ETA3	0,29	0,77	0,19	1,00																			
ETA4	0,00	0,94	0,09	0,62	1,00																		
EXCt	-0,15	0,53	-0,20	0,05	0,44	1,00																	
EXC1	-0,34	0,46	-0,03	0,16	0,50	0,39	1,00																
EXC2	0,06	0,30	0,17	0,14	0,31	0,18	0,66	1,00															
EXC3	0,08	0,24	0,16	0,15	0,19	0,21	0,56	0,73	1,00														
EXC4	-0,49	0,29	0,18	0,07	0,30	0,26	0,59	-0,09	-0,08	1,00													
DEFt	-0,48	0,26	-0,46	0,05	0,36	0,30	0,58	-0,16	-0,15	0,68	1,00												
DEF1	0,00	-0,96	-0,08	-0,69	-0,94	-0,56	-0,54	-0,41	-0,26	-0,30	1,00												
DEF2	-0,28	-0,44	-0,76	-0,46	-0,36	0,06	0,02	-0,34	-0,33	0,17	0,50	0,40	1,00										
DEF3	-0,31	-0,81	-0,25	-0,92	-0,69	-0,12	-0,32	-0,39	-0,39	-0,04	0,02	0,76	0,57	1,00									
DEF4	0,14	-0,91	-0,05	-0,57	-0,97	-0,48	-0,57	-0,34	-0,15	-0,36	-0,43	0,95	0,28	0,62	1,00								
TWR	0,21	-0,62	0,32	-0,17	-0,61	-0,84	-0,48	-0,24	-0,07	-0,27	-0,48	0,73	-0,09	0,20	0,70	1,00							
WSI (raw)	0,12	-0,57	0,42	-0,47	-0,61	-0,30	-0,44	-0,38	-0,24	0,04	-0,35	0,68	-0,04	0,54	0,66	0,55	1,00						
WSI (corr. for surplus)	0,06	0,99	0,09	0,77	0,95	0,53	0,49	0,34	0,26	0,25	0,29	-0,98	-0,40	-0,81	-0,93	-0,64	-0,67	1,00					
P d_7a8	0,19	0,96	0,11	0,82	0,90	0,45	0,26	0,16	0,06	0,11	-0,92	-0,47	-0,83	-0,85	-0,55	-0,63	0,97	1,00					
P d_7a14	-0,36	0,63	0,11	0,53	0,63	0,19	0,32	-0,06	-0,22	0,52	0,46	-0,60	-0,12	-0,38	-0,71	-0,37	-0,36	0,63	0,58	1,00			
Tmax d_7a8	-0,40	0,52	-0,31	0,15	0,59	0,55	0,45	-0,10	-0,21	0,56	0,76	-0,59	-0,05	-0,68	-0,81	-0,40	-0,53	0,42	0,62	1,00			
Tmin d_7a8	-0,01	-0,02	0,27	-0,12	0,03	-0,05	-0,39	-0,46	-0,35	-0,04	-0,04	0,09	-0,24	0,24	0,00	0,10	0,46	-0,08	-0,01	0,15	0,05	1,00	
Tmax d_7a8	-0,41	0,00	-0,22	-0,04	0,11	-0,08	0,07	-0,17	-0,10	0,02	0,39	-0,08	0,06	0,08	-0,18	-0,08	-0,22	0,04	0,00	0,26	0,18	0,49	1,00

Temporada de primavera-verano

Anomalia	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4	EXCt	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4	DEFt	DEF1	DEF2	DEF3	DEF4	TWR	WSI (raw)	WSI (corr. for surplus)	P d_28a30	P d_28a1	Tmax d_28a30	Tmin d_28a30		
Anomalia	1,00																						
ETA1	0,42	1,00																					
ETA2	-0,30	-0,06	1,00																				
ETA3	0,29	0,48	-0,10	1,00																			
ETA4	0,31	0,97	0,07	0,44	1,00																		
EXCt	0,52	0,83	-0,33	0,26	0,67	1,00																	
EXC1	0,09	0,66	-0,15	0,18	0,63	0,62	1,00																
EXC2	-0,05	0,43	-0,15	0,06	0,44	0,38	0,73	1,00															
EXC3	0,09	0,53	-0,05	0,18	0,48	0,53	0,85	0,34	1,00														
EXC4	0,04	0,50	-0,21	0,08	0,52	0,40	0,69	0,85	0,20	1,00													
DEFt	0,24	0,04	-0,12	0,08	-0,06	0,21	-0,07	-0,08	-0,09	-0,09	1,00												
DEF1	-0,36	-0,98	0,10	-0,48	-0,94	-0,83	-0,70	-0,47	-0,55	-0,08	1,00												
DEF2	0,14	-0,18	-0,58	0,00	-0,22	-0,04	-0,20	-0,18	-0,10	-0,22	-0,12	0,26	1,00										
DEF3	-0,04	-0,60	0,15	-0,79	-0,59	-0,37	-0,36	-0,23	-0,28	-0,29	-0,09	0,68	0,18	1,00									
DEF4	-0,28	-0,96	0,00	-0,40	-0,99	-0,70	-0,68	-0,50	-0,48	-0,60	0,06	0,96	0,24	0,59	1,00								
TWR	-0,57	-0,74	0,31	-0,23	-0,57	-0,96	-0,60	-0,32	-0,57	-0,29	-0,31	0,76	0,08	0,30	0,59	1,00							
WSI (raw)	-0,65	-0,50	0,39	-0,14	-0,44	-0,56	-0,34	-0,28	-0,17	-0,37	-0,35	0,54	0,05	0,24	0,49	0,57	1,00						
WSI (corr. for surplus)	0,45	1,00	-0,09	0,47	0,96	0,84	0,67	0,45	0,52	0,07	-0,98	-0,18	-0,60	-0,96	-0,76	-0,57	1,00						
P d_28a30	0,51	0,98	-0,06	0,50	0,94	0,82	0,52	0,28	0,45	0,36	0,10	-0,95	-0,15	-0,59	-0,92	-0,74	-0,57	0,98	1,00				
P d_28a1	0,27	0,80	-0,02	0,21	0,80	0,65	0,73	0,51	0,56	0,59	0,00	-0,79	-0,20	-0,31	-0,84	-0,57	-0,38	0,80	0,72	1,00			
Tmax d_28a30	0,57	0,92	-0,08	0,40	0,86	0,84	0,55	0,32	0,47	0,36	0,32	-0,89	-0,14	-0,44	-0,84	-0,82	-0,56	0,93	0,93	0,73	1,00		
Tmin d_28a30	0,09	0,09	0,11	0,06	0,07	0,10	-0,22	-0,17	-0,09	-0,27	-0,26	0,01	0,24	0,12	0,00	-0,10	0,40	0,05	0,12	-0,01	0,08	1,00	
Tmin d_28a30	-0,06	0,45	-0,15	0,20	0,40	0,46	0,59	0,47	0,49	0,42	-0,03	-0,42	0,21	-0,15	-0,43	-0,37	0,13	0,42	0,32	0,68	0,42	0,19	1,00

Anexo II – Capacidad de almacenaje de agua de los suelos

HSWD - Base de datos armonizados de suelos del mundo - FAO.





ISBN 978-92-5-131995-6



9 789251 319956

CA7134ES/1/01.20