

PROYECTO FONTAGRO RG-T1654

**Variabilidad y Cambio Climático en la Expansión de la
Frontera Agrícola en el Cono Sur:
Estrategias Tecnológicas para Reducir Vulnerabilidades**

Informe Final

Resumen Consolidado de los Informes por Componentes

Mayo 2014

COMPONENTE 1. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.

Este componente del proyecto se propone caracterizar el proceso de expansión e intensificación agrícola en la última década. Este periodo 2001-2011 es extraordinariamente relevante pues todos los antecedentes de información indican que la celeridad y alcance del fenómeno en el Cono Sur de AL no tienen parangón en la historia de la agricultura agrícola de la región y difícilmente puede reconocerse un proceso de tal magnitud a escala mundial en tan breve periodo de tiempo. El estudio incluye cinco países; Argentina, Bolivia, Chile Paraguay y Uruguay.

Dos fuentes de información se emplean con ese propósito:

1. El estudio mediante imágenes satelitales del proceso de expansión de la agricultura en los cinco países¹.
2. Compilación de la información de áreas y producción agrícola que reportan las oficinas especializadas de los países².

Ciertamente el primer estudio es la contribución más importante por el esfuerzo que requirió y por su significación ya que es la primera vez que se caracterizan las áreas agrícolas de secano en cuatro países.

Para la elaboración de los mapas de localización de los cultivos se emplearon imágenes de satélites de baja resolución MODIS con el empleo de una metodología basada en la caracterización de imágenes temporales a lo largo del año que permiten identificar la "firma fenológica" de cada cultivo propia de cada región y sistema de producción. Para caracterizar y confirmar las diferentes "firmas fenológicas" se hicieron talleres con expertos de cada país que tenían experiencia en imágenes remotas y/o conocimiento agronómico de las diferentes regiones. De esta manera se identifican los cultivos en cada lote se generan los mapas (ver figura 1) y luego se estiman las superficies totales mediante la lectura de los píxeles correspondientes a cada uno.

Las principales inferencias cuantitativas sobre superficie sembrada basadas en el estudio de imágenes son las siguientes:

1. En la región se cultivaron 30 millones de hectáreas en el ciclo 2000/01 y 42,9 millones en 2010/11 (Tabla 1), lo que representa un incremento de la superficie cultivada de 12.9 millones de ha (43%).
2. Argentina posee más del 80% del total del área cultivada en la región. El país con mayor crecimiento en el periodo Uruguay (265%) seguido por Bolivia (127%), Paraguay (83%), Argentina (35%) y Chile (17%).
3. El área de cultivos de invierno permanece estable (+2%) disminuye su siembra como cultivo único (-66%) y aumenta la superficie de doble cultivo (+52%).

¹ ANEXO 1. I

² ANEXO 1. II

4. El uso de suelo únicamente con cultivos de verano actualmente alcanza al 78%. No se ha incrementado, solamente en algunas zonas en el centro sur de la región pampeana y en Chile.
5. Los cultivos de verano desplazan dos grandes tipos de cobertura vegetal; en la región chaqueña el bosque nativo por deforestación y en la región pampeana de Argentina y Uruguay remplacea pasturas naturales y cultivadas.

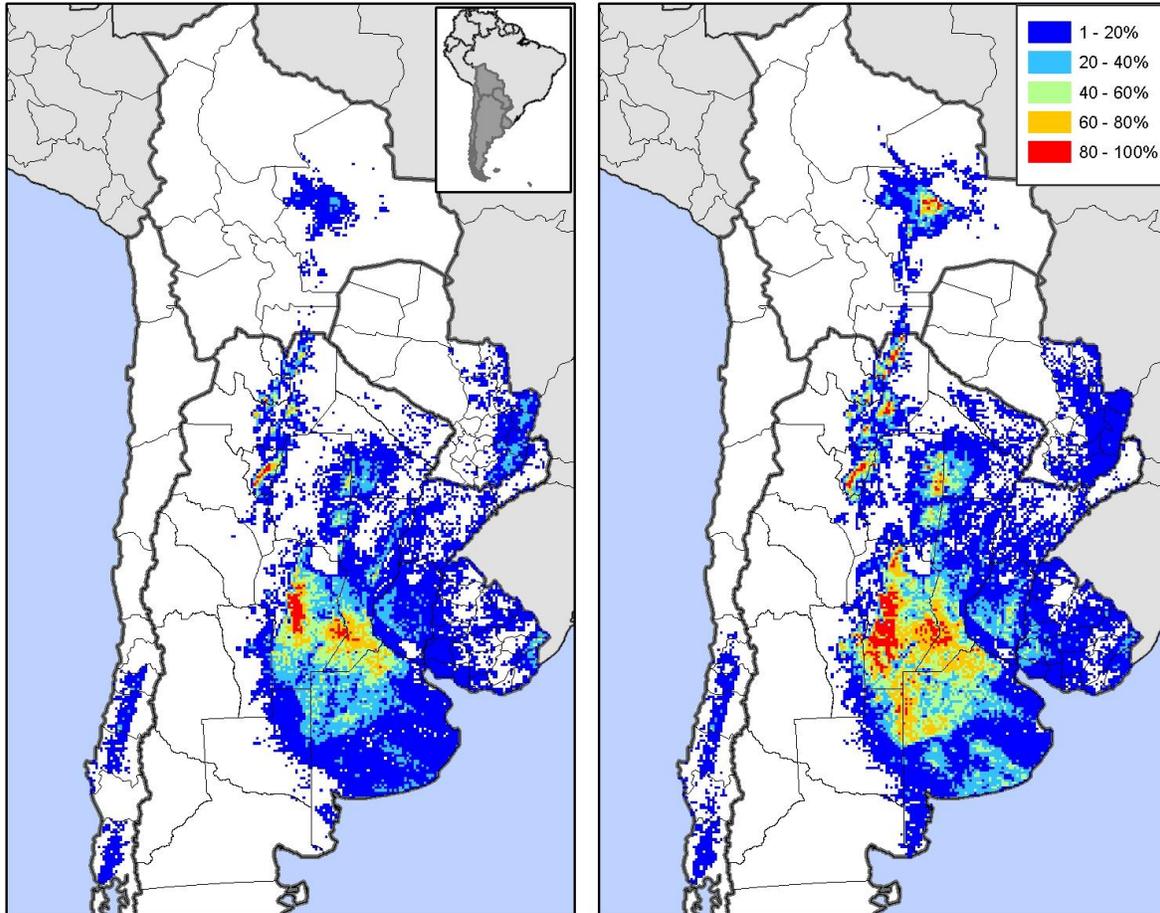


Figura 1. Mapas de **densidad de cultivos de verano** en dos momentos. El color de cada píxel de 10 x 10 km (10.000 ha) representa e porcentaje de la presencia de cultivos de verano detectada en esa unidad cartográfica.

El análisis de imágenes permite identificar donde esta ocurriendo el crecimiento y vincularlo a los sistemas de producción y la aptitud de los recursos naturales del lugar...

1. La naturaleza del proceso de intensificación es muy similar en todas las subregiones. En todas ellas preexistía la agricultura y se adensa la zona más tradicional produciéndose un desplazamiento de frontera hacia suelos de menor aptitud.
2. Es importante el incremento de la superficie ocurrido en zonas extra-pampeanas como en la región chaqueña argentina, boliviana y el Este paraguayo, Son zonas de clima

caliente y baja estabilidad de la materia orgánica, cuyo crecimiento o expansión de frontera en la mayoría de los casos se hace hacia zonas de menor precipitación y potencial de crecimiento.

3. Entre la zonas de mayor crecimiento de área se encuentran las regiones pampeanas vecinas de Entre Ríos y Uruguay en ambas el crecimiento de frontera avanza hacia suelos de menor capacidad de almacenaje de agua y mayores pendientes. Se trata de una región donde se ha diagnosticado un fuerte incremento de tormentas convectivas que por su intensidad incrementan el riesgo de erosión (Karl, 2006).
4. Cierta avance constatado hacia el sur oeste de la región agrícola más tradicional de Argentina incrementa el riesgo de encontrar un ciclo de veranos más secos. Este fenómeno ha sido reiteradamente levantado por estudios climáticos de la región.
5. En Chile se observa un cierto desplazamiento de los cultivos hacia la región sur que aparentemente acompañaría la mejor condición pluviométrica respecto a la creciente pérdida de precipitaciones en la región central

Una vez alcanzadas las estimaciones de área de cultivo mediante el estudio de imágenes se procedió a analizar esa información conjuntamente con la proveniente de las estimaciones de área de siembra y producción que llevan adelante los países a través de sus oficinas de estadísticas agropecuarias (Tabla 1).

Esa información fue analizada a partir de la fuente FAOSTAT que la compendia en informes anuales que llegan hasta el 2011. Para las áreas de cultivo además de los cultivos mayores: Soja, maíz, girasol, sorgo, trigo y cebada se incluyeron dos cultivos menores avena y algodón cuyas imágenes pueden confundirse con cultivos del mismo ciclo.

Tabla 1. Superficies cultivadas en la región de estudios (en miles de has) en las campañas agrícolas 2000/01 y 2010/11 estimadas a partir de teledetección (Píxeles) y estimaciones oficiales (FAOSTAT).

Sistemas de cultivo	TELEDETECCION				FAOSTAT				% Diferencia TELEDET-FAO	
	2001	2011	(Dif.)	%	2001	2011	(Dif.)	%	2001	2011
Invierno	8480	8635	155	2	8779	7548	-1231	-15	4	-13
Verano	21553	34358	12805	59	19652	32560	12908	66	-9	-5
Doble	5059	7550								
Total Efectiva	30033	42993	12960	43	28432	40109	11677	41	-5	-7

Lógicamente son esperables diferencias porque ambos procedimientos tienen variadas fuentes de error y también objetivos diferentes. Diversos estudios de esta naturaleza han reportado diferencias importantes en las áreas estimadas y ello ha sido muy útil para rectificar y ajustar procedimientos y metodologías, (Paruelo et al, 2004; Paruelo et al, 2006;

Guerschman, 2004). En este caso las diferencias con lo promedios de la region presento buen ajuste aunque las estadísticas de algunos países si mostraron diferencias muy significativas.

Mas allá de las estimaciones de áreas de producción, el estudio de imágenes es muy apropiado para mostrar geográficamente donde están ocurriendo los cambios y FAO complementa su información con estimaciones de rendimientos que habilitan comentarios y conclusiones adicionales.

Las grandes cifras de la región en su conjunto coinciden cuantitativamente pero como puede apreciarse algunas diferencias de estimación entre los dos métodos son muy importantes. Esos contrastes pueden contribuir a la revisión recíproca del trabajo con cada metodología. En esta fase de expansión de la agricultura, donde resulta muy dificultosa la definición de las muestras para las encuestas, las imágenes pueden ser una contribución muy significativa en el diseño de esas muestras.

Conclusiones y Consideraciones Relevantes:

1. El estudio de cambio de uso agrícola de la tierra en los cinco países participantes del proyecto caracterizó el período más expansivo de la historia agrícola de la región, cuantificando exitosamente su localización regional y su dinámica espacial.
2. Permitió discriminar tres tipos de agricultura; invierno, verano y doble cultivo y los cambios en sus proporciones
3. Los resultados se constituyeron en una herramienta complementaria para revisar los resultados de las encuestas nacionales y facilitar el rediseño de las muestras de las mismas.
4. Permitió establecer hipótesis acerca del riesgo de algunas variables climáticas frente a la expansión en regiones cada vez más marginales.
5. Capacitó técnicos de Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay en el empleo de la metodología de imágenes y en su potencial uso mediante talleres de trabajo en el centro especializado de INTA Salta en Argentina.

COMPONENTE 2. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SELECCIONADOS.

Clima

El clima siempre ha sido un factor de riesgo para el sector agropecuario. Aunque los cambios observados en las últimas décadas, tanto en los valores medios como en los extremos (sequías, inundaciones, etc.) agudizaron la problemática, aumentaron la preocupación del sector y pusieron de manifiesto la necesidad de disponer de información de apoyo para enfrentar la nueva situación climática³.

En América Latina los eventos climáticos extremos (derivados de la variabilidad interanual del clima) aumentaron 2,4 veces entre 1970-1999 y 2000-2006. Las principales manifestaciones se relacionaron con mayor ocurrencia de sequías e inundaciones. Otro cambio notable fue el aumento de la temperatura, especialmente la mínima en gran parte de la región.

³ ANEXOS 2. I, 2. II, 2. III y 2. IV.

El clima presenta variaciones en diferentes escalas temporales que van desde la variabilidad diaria hasta los cambios o tendencias de largo plazo que incluyen siglos. Varios estudios indican la gran importancia de la variabilidad interanual del clima, por ejemplo años secos ó muy lluviosos, en las economías nacionales y regionales. También se resalta, que en varias regiones del planeta, el clima presenta variaciones de más largo plazo (una o varias décadas) donde el clima suele ser más seco ó más húmedo y esto afecta significativamente la productividad. Por último es conocido que el cambio climático produciría modificaciones permanentes del clima que afectarían la mayor parte de los ecosistemas actuales.

La finalidad de este componente es caracterizar la variabilidad climática observada durante las últimas décadas en la región de estudio, con el objetivo de comprender la importancia relativa del cambio climático en relación a la variabilidad natural del clima y su impacto en los registros de producción seriados provenientes de los Experimentos de Larga Duración (ELDs) y evaluaciones de cultivos. Asimismo generar escenarios a futuro basados en las variaciones observadas.

El área de estudio abarca la región Pampeana y norte de Argentina, Uruguay y Paraguay (que forman parte de la región denominada SESA); Bolivia; el centro de Chile y parte de Méjico. En cada región se recopiló información climática diaria de precipitación, temperatura máxima y mínima. Se reunieron 22 series provenientes de Argentina (Balcarce, Bordenave, Las Breñas, Marcos Juarez, Pergamino, y Roque Saenz Peña), Bolivia (Camiri, San José de Chiquitos, Montero y San Ignacio de Velasco), Chile (Chillán y Curicó), Méjico (Batán, Obregón y Toluca), Paraguay (Caacupé y Choré), y Uruguay (Las Brujas, La Estanzuela, Salto, Tacuarembó y Treinta y Tres).

Análisis de la variabilidad climática

El análisis se efectuó para las 22 series climáticas disponibles en el área de estudio luego de verificar la calidad de las mismas. Las variables analizadas fueron precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a paso mensual, estacional y anual. La variabilidad de los registros de cada parámetro se dividió en tres clases de variaciones: la “tendencia” que representa el cambio de largo plazo ó cambio climático y que es debida a forzantes externas; y la “variabilidad entre décadas” y “variabilidad interanual” que correspondería a la variabilidad natural del clima.

Se siguió la metodología propuesta por el IRI (International Research Institute for Climate and Society) y detallada en Greene, et. al (2011). La metodología se basa en el análisis estadístico de series temporales y remoción de tendencias. En primer término se obtiene la regresión de la serie con la temperatura media del planeta derivada de un ensamble de modelos de circulación global. Los valores ajustados de la regresión representan la porción de la variabilidad local que es linealmente dependiente del calentamiento global y representa el cambio climático. Luego, los residuales -que representarían la variabilidad natural del clima- son pasados por un filtro para separar la variación a escala decadal de la variación interanual. Cabe aclarar que las variaciones derivadas del fenómeno del ENSO (El Niño, La Niña) quedan incluidas dentro de la variabilidad interanual.

RESULTADOS: Componentes de la variabilidad climática

En la Figura 2, se presentan un ejemplo de descomposición de la variabilidad de la lluvia en sus tres componentes (tendencia, decádica e interanual).

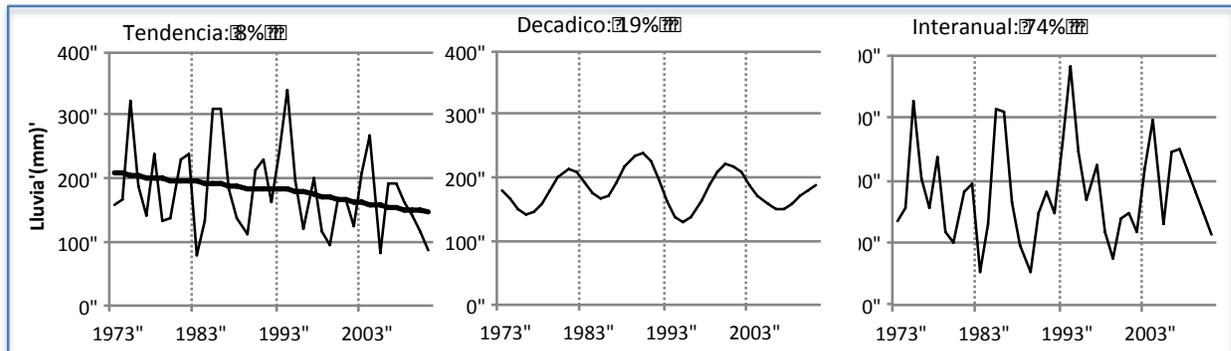


Figura 2: Análisis de las lluvias con indicaciones de tendencias, variabilidad decádica y variabilidad interanual para: Lluvias del mismo trimestre para la estación de Batán (Méjico).

El ejemplo, de la Figura, corresponde a las lluvias del período Abril a Junio en Batán (Méjico). En este caso la tendencia explica el 8% de la variación, y las lluvias pasan de 209mm (en 1973) a 148mm (en 2011) con una reducción del 29%. La variabilidad decádica explica el 19% de la variación, y muestra que existen períodos más secos y más húmedos que se suceden en el tiempo sin periodicidad definida afectando directamente la producción y las reservas de agua para riego. Por ultimo, la variabilidad interanual es responsable del 74% de la varianza con condiciones extremas que van de 340mm de lluvia en el trimestre en 1994, a 80mm en 1983.

A modo de síntesis, en la Tabla 2 se presenta el valor promedio de aporte de cada tipo de variabilidad para las series climáticas analizadas considerando los valores anuales. Si bien este promedio es de poca utilidad por su gran variación espacial, permite inferir en términos generales la importancia relativa de la tendencia, la variabilidad decádica y la interanual. La variabilidad interanual -que como se explicitó incluye las variaciones asociadas al fenómeno ENSO- explica la mayor proporción de la variación total de las series: entre el 57% y el 77%. Le sigue la variabilidad decádica que explica entre el 21% y el 31%; y por último la tendencia (o cambio climático) que explica entre el 1% y el 17% de la varianza total.

Variable	Período	Tendencia	Decadas	Interanual
Lluvia	Anual	3,2	26,6	70,1
	Verano	1,4	23,0	75,6
	Otoño	3,8	26,3	69,9
	Invierno	4,5	24,0	71,5
	Primavera	2,4	20,5	77,0
Temperatura Máxima	Anual	10,3	29,4	60,2
	Verano	5,4	27,2	67,4
	Otoño	6,1	24,3	69,9
	Invierno	7,7	25,1	67,2
	Primavera	6,8	23,8	69,3
Temperatura Mínima	Anual	10,1	30,9	58,9
	Verano	16,8	26,1	57,0
	Otoño	4,9	26,5	68,6
	Invierno	4,7	21,2	74,1
	Primavera	9,7	24,8	65,5

Tabla 2: Proporción de la variabilidad asociada a cada uno de los componentes temporales para las 22 estaciones climáticas analizadas. Los valores corresponden a las precipitaciones anuales y las temperaturas máximas y mínimas medias del año.

Análisis de las tendencias relacionadas al cambio climático

En este apartado se analizan más detalladamente los cambios de largo plazo ó tendencias climáticas. El análisis se basa en la diferencia entre el valor final e inicial de la tendencia de largo plazo. Dado que la longitud de las series climáticas es variable, las diferencias se expresan en cambios por décadas (cada 10 años). En el caso de las temperaturas la diferencia se expresa en °C/década, mientras que las diferencias en precipitaciones se presentan como valor absoluto y como porcentaje, siempre a paso decádico.

Las lluvias anuales se incrementaron en 10 de las 13 series climáticas del SESA (las 2 de Paraguay, las 5 de Uruguay, y 3 de Argentina: Pergamino-Balcarce y Bordenave), la tasa media de incremento fue de 19 mm/década. En el resto de las series se observó una tendencia decreciente de las lluvias del orden de 37 mm/década en Bolivia; 24mm/década en Méjico; 22mm/década en tres estaciones de Argentina; y 15mm/década en Chile (Figura 3).

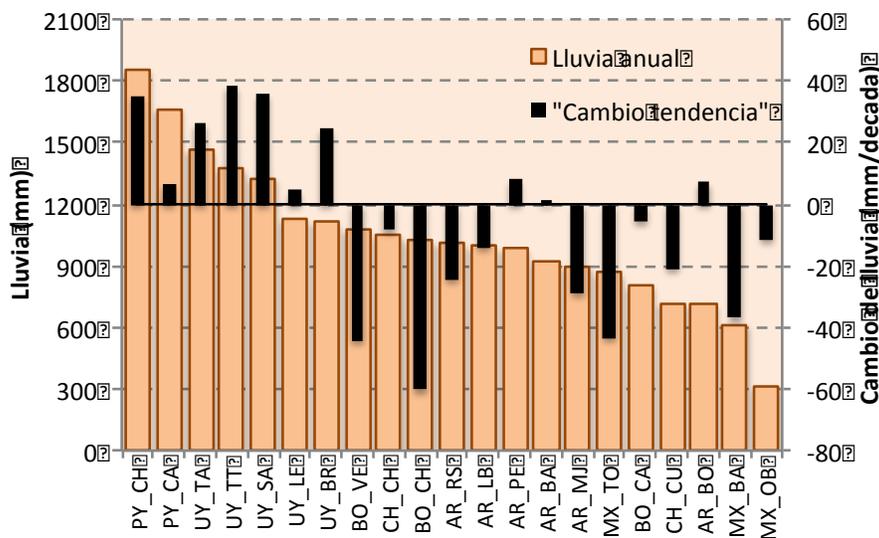


Figura 3: Precipitación anual (barras naranjas) en los sitios analizados y cambio de la lluvia (valor final menos valor inicial de la tendencia) expresado en mm/década.

La temperatura máxima media anual incrementó en la mayor parte de los sitios, a excepción de las dos estaciones en Paraguay, Tacuarembó en Uruguay y Bordenave en Argentina (Figura 4). El aumento medio fue de 0.2°C/década, con un máximo de 0.94°C/década en Montero (Bolivia) y un mínimo de 0.04°C/década en La Estanzuela (Uruguay). En general, los incrementos se producen en todas las estaciones del año.

La Temperatura mínima media anual también aumentó en la mayor parte de los sitios, a excepción de Bordenave y Roque Saenz Peña en Argentina, Las Brujas y Tacuarembó en Uruguay y Obregón en Méjico (Figura 4). El aumento promedio fue de 0.2°C/década, con un aumento máximo de 1.06°C/década en Toluca (Méjico) y un mínimo de 0.02°C/década en Camiri (Bolivia). Los aumentos de la temperatura mínima fueron generalizados en el

semestre octubre-marzo, mientras que en el trimestre Julio-Agosto (invierno en el hemisferio sur) las mínimas tendieron a bajar en varios sitios (Figura 4).

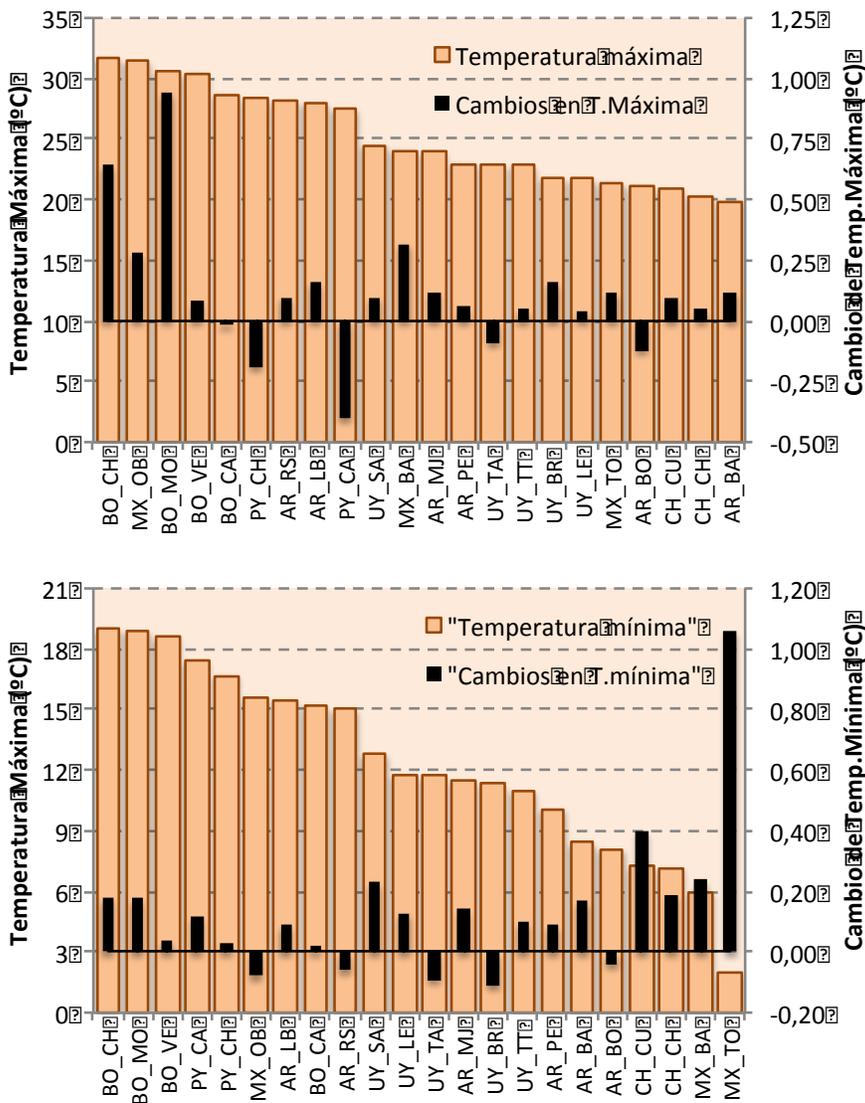


Figura 4: Temperatura máxima/mínima media anual (barras naranjas) en los sitios analizados y cambio de la temperatura máxima/mínima (valor final menos valor inicial de la tendencia) expresado en °C/década.

CONCLUSIONES

1. La variabilidad interanual del clima, junto con la observada entre décadas explica más del 80% de la variación total de las series climáticas.
2. La tendencia asociada al cambio climático explica alrededor del 10% de la variación total, y es sensiblemente mayor para las variables de temperatura. De acuerdo a esta tendencia la región se está calentando a una tasa promedio de 0.2°C/década aunque existen grandes variaciones espaciales y temporales, y leves enfriamientos en alguna

regiones y/o períodos del año. El comportamiento de las lluvias es variado con incrementos en gran parte del SESA y reducciones en Chile, Méjico y Bolivia.

3. La variabilidad del clima entre décadas explica, en términos generales, el doble de la variabilidad asociada a la tendencia. Este es un dato importante para la región, especialmente en el SESA donde el aumento de lluvias observado en las décadas de 1980 y 1990 permitió la expansión de la actividad agropecuaria a zonas consideradas semiáridas.
4. La variabilidad interanual del clima es sin duda la mayor fuente de variación y provoca cambios del clima entre años que superan ampliamente los cambios derivados de las variaciones entre décadas y las variaciones de largo plazo.
5. De acuerdo a estos resultados, en el corto y mediano plazo (próximos 10-20 años) las prácticas de adaptación al clima deberían enfocarse en aquellas acciones que reduzcan el impacto de la variabilidad interanual y permitan continuar con la actividad en décadas más o menos favorables.

COMPONENTE 2: EXPERIMENTOS DE LARGA DURACIÓN (ELDS)

Se analizaron experimentos de larga duración diseñados para comparar el impacto de diferentes secuencias y manejos de cultivos representativos de 9 agroecosistemas en: Balcarce, Bordenave, Las Breñas y Pergamino en Argentina; La Estanzuela en Uruguay; Chillan en Chile; el Batan y Oregón en Méjico⁴. Los experimentos incluyeron numerosos cultivos pero no todos los cultivos fueron de interés para el presente trabajo donde se analizaron los datos de rendimiento anuales en Kg/ha de trigo, maíz, soja, girasol y algodón. A partir de los tratamientos de cada uno de estos experimentos agronómicos se construyeron los siguientes factores o criterios de clasificación de especial importancia para el tratamiento de las variaciones en rendimiento anual: Factor Secuencia (monocultivo, rotación con anuales, rotación con pasturas), Fertilización (sí: el cultivo recibió un esquema recomendado de fertilización nitrogenada, no: cultivo sin fertilizar o con fertilización sub-óptima), labranza (LC labranza convencional, SD siembra directa; en algunos experimentos se ensayaron también otros tipos de labranza). Si el experimento incluía otros tratamientos, por ejemplo manejo de residuos o riego, las parcelas con tales manejos no fueron consideradas en el análisis. Los cultivos analizados seleccionados para el análisis dentro de la secuencia se denominaron cultivo objetivo. Estos fueron trigo, maíz, soja, girasol y algodón; siendo trigo y maíz los que se encontraron presentes

Para el estudio de tendencias y variabilidad se recurrió a la información de las estaciones meteorológicas cercanas a los experimentos. Y las variables estudiadas fueron las temperaturas (mínima, máxima y media) y la pluviometría. Adicionalmente se incluyó radiación solar pero sin análisis de tendencias y variabilidad.

Para sintetizar los resultados de cada sitio se recurrió a dos tablas que resumen la información climática y productiva respectivamente. Con ellas se comentan los resultados agronómicos más relevantes y se discuten los principales riesgos y oportunidades que se presentarán si se confirman las tendencias del clima que se observan en el análisis de las variables climáticas.

⁴ Los Experimentos de CIMMYT en Méjico fueron analizados estadísticamente pero no se completó la interpretación agronómica de los resultados.

Balcarce, Argentina⁵

En el contexto de las regiones representadas en las localidades de los experimentos la región más austral donde se encuentra Balcarce se caracteriza porque las temperaturas máximas y mínimas verifican la tendencia del calentamiento global. El régimen de lluvia al igual que en el resto del sudeste de Sudamérica aumenta, aunque escasamente en esta estación no se verifica la tendencia declinante de las lluvias de invierno (Tabla 3).

Tabla 3. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Balcarce entre 1960 y 2011.									
Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
Periodo	Obs.	°C		Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Enero	27.5	↑	1.7	13.9	↑	1.6	106.6	↑	6.7
Febrero	26.4	↑	0.1	13.6	↑	1.3	86	↑	4.5
Noviembre	22.4	↑	1.4	9.7	↑	1.5	88.3	↑	26.2
Verano	26	↑	0.8	13.3	↑	1.4	281.8	↑	60.6
Otoño	16.5	↑	0.9	6.4	↑	0.3	196.8		-38.9
Invierno	14.4		-0.3	4.1	↑	0.3	158.1	↑	50
Primavera	22.5	↑	0.9	9.8	↑	1	283.9		-67
Anual	19.9	↑	0.5	8.4	↑	0.7	920.6	↑	4.7

La variable climática que más incidió sobre la definición de los rendimientos fue las precipitaciones durante el período crítico. En el caso del cultivo trigo PP mayores que 133.5 mm provocaron reducción de los rendimientos, posiblemente por efectos sanitarios. Los rendimientos máximos se obtuvieron cuando las PP no son demasiado elevadas (menores que 133 mm pero mayores que 79 mm). La tendencia a largo plazo a un aumento en las precipitaciones durante parte del período crítico de trigo (noviembre), podría dar la posibilidad de tener menor frecuencia de déficits pero a su vez aumentar la probabilidad de tener mayor frecuencia de años de excesos que provocarían caídas en los rendimientos, especialmente sanitarias si se producen junto con un aumento en las temperaturas máximas (Tabla 4).

⁵ ANEXO 2. V

En los cultivos de verano, menores PP condujeron a reducciones en los rendimientos. En el caso del Girasol, cultivo con elevada capacidad para extraer agua en profundidad, si bien el riesgo de umbral fue en general bajo (en promedio, no se alcanzaría el rendimiento de indiferencia aproximadamente una vez cada 10 años), la utilización de SD condujo a reducirlo aún más posiblemente debido a una mejor economía del agua para el cultivo. No obstante, el efecto aleatorio para este cultivo fue alto, aunque el más bajo de los tres cultivos de verano analizados. Esto indica que, más allá de que la frecuencia con que no se alcanzaría el umbral es relativamente baja, el rendimiento es altamente dependiente de las condiciones meteorológicas durante el período crítico. Los mayores rendimientos de girasol se obtuvieron con PP mayores que 104 mm y Tmn mayores que 13,1 °C. En el caso de que continúe la tendencia a largo plazo de aumento de las temperaturas mínimas y las precipitaciones durante el mes de febrero, momento en que ocurre el período crítico de Girasol, se asistiría a un escenario de mayores rendimientos medios.

En el cultivo de maíz los efectos de Labranza, Rotación, Fertilización nitrogenada y la interacción Labranza*Fertilización nitrogenada fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$). Los efectos de los sistemas de labranza fueron mayores en condiciones sin fertilización nitrogenada; con el agregado de N las diferencias entre las labranzas disminuyen. La RA tuvo rendimientos con mayor variabilidad que los rendimientos en RP y que los rendimientos en RA fueron menores que en RP en años con rendimientos menores que 9400 kg/ha.

Con PP menores que 76 mm los rendimientos se redujeron a la mitad de los observados en años con mayor PP (4626 vs 8233 kg/ha).

Tabla 4, Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en Balcarce, Argentina.

CULTIVO	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol de Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	Manejo	Sistema	Desviación Estándar Relativa	Riesgo de Umbral (%)
TRIGO	NS	1°.PP < 2°.PP > 3°.Tmx <	48.6	Lab x N	LC_CON	18	6
					LC_SIN	21	34
					SD_CON	23	14
					SD_SIN	34	60
GIRASOL	NS	1°. PP > 2°. Tmn >	57.2	Lab x N	LC_CON	30	11
					LC_SIN	27	11
					SD_CON	24	4
					SD_SIN	22	7
MAIZ	NS	1°. PP > 2°. ETP < 3°. ETP <	61.3	Lab x N	LC_CON	33	15
					LC_SIN	35	31
					SD_CON	35	19
					SD_SIN	33	55
SOJA	NS	1°. PP > 2°. Tmn >	65.3	NS	NS	28	6

La tendencia a largo plazo hacia un aumento en las precipitaciones en el mes de enero (momento en que ocurre el período crítico del maíz), se determinaría condiciones favorables para el aumento de los rendimientos medios de maíz, aunque dependiendo también de los valores de ETP condicionados por la tendencia a un aumento en las temperaturas durante el período crítico, De esta manera, el efecto combinado de las PP y de la ETP definirá la tendencia del rendimiento medio de este cultivo.

La tendencia a un aumento en las precipitaciones en el mes de febrero, cuando en general ocurre el período crítico de Soja, sugeriría la posibilidad de aumentar los rendimientos medios de este cultivo. Adicionalmente la tendencia a un aumento en las Tmn también

contribuiría al aumento de los rendimientos pues cuando la T_{mn} superó 15,5°C, se obtuvieron los máximos rendimientos. Los principales efectos característicos de este agroecosistema son:

1. La variación de propiedades del suelo bajo uso agrícola continuo se produce en un rango que no provoca caída de rendimientos en los cultivos con excepción de aquellas que influyen sobre la disponibilidad de N.
2. Los rendimientos de los cultivos de verano se ven más afectados por el año (i.e. variación meteorológica interanual) que los cultivos de invierno.
3. La mayor parte de la variabilidad de los rendimientos del cultivo de soja esta dado por el ambiente, ya que dicho cultivo no se ve afectado significativamente por las prácticas de manejo analizadas (rotaciones y labranzas).
4. De las variables ambientales ocurridas durante el período crítico de los cultivos analizados, la precipitación es la que mayor impacto produce sobre el rendimiento de los mismos.

Bordenave, Argentina⁶

Aunque se observan algunas tendencias de largo plazo, como el incremento de las precipitaciones y una sorprendente disminución de la temperatura máxima media anual, los mayores porcentajes de la variabilidad total fueron explicados por las variaciones de mediano y corto plazo. Esto implica que el área estudiada se caracteriza por la variación cíclica, no periódica de las principales variables bio-meteorológicas, hecho que dificulta la planificación y configura un importante riesgo para la producción agropecuaria. El efecto aleatorio entre años fue estimado en 800 kg de trigo ha⁻¹. (Tabla 5).

⁶ ANEXO 2. VI

Tabla 5. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Bordenave entre 1960 y 2011

Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Octubre	21	↑	0.4	7.6	↑	0.2	78		-9.3
Noviembre	24.8		-0.6	10.5		-0.6	79.1		-20.9
Verano	29		-0.6	14.1		-0.10	250.4	↑	73.9
Otoño	20.9		-0.67	8.37		-0.67	185.7		-16.2
Invierno	13.5		-0.7	2.3	⬆️↑	0.5	72.3		-6.8
Primavera	21.2		-0.4	7.6		-0.1	207.8		-14.3
Anual	21.1		-0.6	8.1		-0.2	717.8	↑	37.7

Considerando en conjunto el total de datos de los tratamientos, los rendimientos del trigo de la serie estudiada mostraron tendencia decreciente en el tiempo, con una pérdida anual cercana a los 50 kg (ha año)⁻¹ (Tabla 6). Esta tendencia se explica fundamentalmente por una combinación entre la degradación del suelo, producto de las distintas secuencias estudiadas, y la marcha de las variables meteorológicas asociadas al rendimiento. Entre estas últimas se destacan: la precipitación durante el ciclo del cultivo de trigo (sumatoria de la precipitación acumulada durante los meses de agosto a noviembre), la temperatura máxima media, la radiación solar acumulada, y la temperatura mínima media, todas ellas durante el período crítico del trigo (20 de octubre al 20 de noviembre). La variable meteorológica de mayor contribución al rendimiento fue la precipitación durante el ciclo del cultivo.

Tanto el efecto de la fertilización, como el de la secuencia de cultivos y la interacción Secuencia*Fertilización fueron significativos. Los mayores efectos de la fertilización se detectaron en el monocultivo. El monocultivo de trigo mostró los menores rendimientos, especialmente sin fertilización. A mismo tiempo mostró la menor variabilidad. Las secuencias con verdeos de invierno y pasturas consociados con leguminosas, y trigo mostraron los mayores rendimientos y variabilidad, con baja a nula respuesta a la fertilización nitrogenada como consecuencia lógica de la residualidad de nitrógeno por las leguminosas forrajeras. Las probabilidades de no superar los rendimientos de indiferencia fueron siempre mayores para el monocultivo de trigo respecto de las secuencias con verdeos y pasturas. Además, la fertilización incrementó la probabilidad de no alcanzar el rendimiento de indiferencia en todos los tratamientos.

Si bien el monocultivo responde a la fertilización y la fertilización en dosis relativamente elevadas disminuyen la probabilidad de alcanzar los rendimientos de indiferencia. Esto ocurre por la baja respuesta a la fertilización y los mayores costos de la práctica que en este caso están contemplados al poner diferente rendimiento de indiferencia en caso de fertilizar o no fertilizar... En estas condiciones, una estrategia alternativa se orienta hacia sistemas de bajos insumos basados sobre secuencias de cultivos con leguminosas. Estos, a través de la fijación biológica de nitrógeno y de otros efectos de rotación, potencian los rendimientos en campañas favorables y disminuyen las pérdidas económicas en las desfavorables.

Tabla 6, Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en Bordenave, Argentina.

Cultivo	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol de Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	Fert. (Ny P)	Sistema	Desviación Estándar Relativa	Riesgo de Umbral (%) (*)
TRIGO	-2.4	1. Precip en ciclo <	40	Si	Trigo	52.5	54.7
					Vicia/Trigo	41.8	27.5
					Past/Trigo	57.9	32.7
		2. RS en PC >		No	Trigo	36.6	24.8
					Vicia/Trigo	44.9	10.8
					Past/Trigo	57.5	19.1
3. T min en P2 <							

(*): Umbral diferencial para cultivos fertilizados y no fertilizados = 900kg/ha para no fertilizados y 1500 para cultivos fertilizados

Las Breñas, Argentina⁷

Las precipitaciones son críticas en este ambiente chaqueño y en los últimos 40 años muestran una tendencia a disminuir en forma anual. Aunque si consideramos el análisis de Largo Plazo, el mismo explica solamente el 0,6% de la variación total (efecto Cambio Climático). En tanto, en el corto plazo se explica el 75,7% de la variación anual. La variación decadal explica el 23,7% de la variación, Con esta información la tendencia de largo plazo no agrega información decisoria en la estrategia a seguir en los próximos años (Tabla 7).

⁷ ANEXO 2. VII

Tabla 7. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Las Breñas entre 1967 y 2011

Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Enero	33.7	↑	0.2	21.1	↑	1	152.3	↑	16.6
Noviembre	31	↑	0.4	17.8	↑	0.9	121.1	↑	0
Diciembre	33	↑	0.1	20.1	↑	0.6	121.9	↑	35.8
Verano	33.0	↑	0.1	20.5	↑	0.9	407	↑	36.2
Otoño	27.3	↑	0.1	15.8	↑	0.2	287.9		-75.5
Invierno	22.7	↑	1.9	9.8		-0.2	59.7	↑	-49.9
Primavera	29.2	↑	1.2	15.4	↑	0.8	236.6	↑	24.6
Anual	28.05	↑	0.82	15.40	↑	0.41	991.20		-5.38

La información decadal es importante por la consistencia de los ciclos y la percepción que podría estar finalizando un ciclo de déficits. Por lo menos no debería actuarse con la memoria reciente e imaginar que va a necesariamente continuar de la misma manera. Por último, observando el incremento de las precipitaciones en primavera, momento utilizado en la región para recarga de agua en el perfil mediante barbecho, parece recomendable tomar la decisión de adelantar la siembra o esperar a recargar el perfil del suelo valorizando este periodo crítico.

El análisis de las Series Climáticas asociado a los Rendimientos de algodón observados, indican que el cultivo del algodón podría tener condiciones más favorables considerando la tendencia de aumento de las temperaturas máximas. El mejor ambiente se alcanzaría hasta un umbral de Tmx (>31.674) y cuando las precipitaciones en el ciclo se encuentren entre 364 mm y 447 mm, puesto que en algodón los excesos de humedad en esta etapa deprimen el rendimiento (Tabla 8).

Tabla 8. Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en Las Breñas, Argentina

CULTIVO	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol de Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	NO	SI	Desviación Estándar Relativa	Riesgo de Umbral (%)
ALGODÓN	6.6	1. PP < 2. PP ciclo <	66			47	37

El contraste de tratamientos de manejo del suelo al igual que en la mayoría de los EDLS sugieren un rendimiento ligeramente inferior para el monocultivo respecto a las rotaciones con anuales y al sorgo granífero como mejor cultivo antecesor para algodón. Todas las rotaciones evaluadas fueron bajo agricultura continua sin incorporación de pasturas, lo que seguramente conlleva degradación productiva por pérdida de materia orgánica. Esa potencial pérdida de rendimientos es parcialmente contrarrestada por los avances tecnológicos de manejo y es difícilmente percibida. Sin embargo, cabe destacar el avance en incorporación de la tecnología de siembra directa en la producción que alcanza actualmente al 90% del área y reduce el ritmo de degradación en comparación con los resultados experimentales en labranza convencional.

La variabilidad interanual expresada como Desviación Estándar (DE)) de los rendimientos fue alta, con un promedio de 798,97 kg/ha/año. La probabilidad de obtener rendimientos menores al rendimiento de indiferencia (1365 kg/ha) que representa el promedio provincial es 0.37, es decir, existe un 37% de probabilidad que los rendimientos del ensayo sean los mismos o menores a los de la provincia de Chaco, para los últimos 15 años.

La relación de los rendimientos con las variables meteorológicas no es lineal, depende que se alcancen o no determinados umbrales, en primer lugar PP en el ciclo y Tmx. En términos de relación lineal, la única variable de las estudiadas con relación lineal estadísticamente significativa, fue la Radiación Lineal en el Período Crítico Rs (R=0.16, p<0.05) ya que los años con mayor rendimientos fueron los años con mayor Rs. Los años con PPc menores a 364 mm tuvieron rendimientos relativamente bajos (870 kg/ha) al igual que años con PPc mayores a 723 mm (1626 kg/ha).

El análisis de las Series Climáticas asociado a los Rendimientos de algodón observados, indican que el cultivo del algodón tendrá condiciones favorables para su mejor crecimiento y desarrollo a futuro, en la región, considerando el aumento de las temperaturas máximas hasta un umbral de Tmx (>31.674) y cuando las precipitaciones en el ciclo se encuentren entre 364 mm y 447 mm, visto que los excesos de humedad en esta etapa deprimen el rendimiento.

La ausencia de tratamientos con pasturas para recuperación de la materia orgánica activa en los suelos debería ser considerada en las condiciones de degradación generalizada de los sistemas agrícolas continuos. Asimismo esta región muestra una proporción importante de la variabilidad climática expresada por los ciclos decádicos. Al igual que el resto de la región

viene de casi 10 años con tendencia de déficit hídrico y aumenta la probabilidad que se comience a ingresar a un período menos crítico.

El efecto del progreso tecnológico anual es bajo presumiblemente porque todos los tratamientos son de agricultura anual continua con baja capacidad de aporte de carbono orgánico lo que determinaría un estado creciente de degradación que contrapesa las mejoras por nuevas tecnologías. También se evidencia en la tabla la gran importancia del efecto aleatoria (66%) originado principalmente por la variabilidad climática.

Pergamino, Argentina ⁸

Al igual que Balcarce esta localidad de suelos pampeanos con alta productividad también evidencia condiciones de suelos de alta resiliencia ante la agricultura continua anual. Las grandes tendencias climáticas coinciden plenamente con los cambios reportados para el sudeste de Sudamérica con aumentos de temperaturas y precipitaciones que aumentan en primavera verano otoño y disminuyen en el periodo invernal (Tabla 8).

Tabla 8. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Pergamino entre 1931 y 2011									
Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Enero	30.4		-0.2	16.2	↑	1.7	114.4	↑	31.3
Febrero	29.2		-2.2	15.6	↑	1	105.6	↑	44
Septiembre	20	↑	1.3	6.6	↑	0.7	55.8		-16.3
Diciembre	29.1	↑	0.6	14.9	↑	1.5	103.8		16.8
Verano	29.6		-0.6	15.6	↑	1.4	323.8	↑	92.1
Otoño	23.1	↑	0.3	10.4	↑	0.6	280.3	↑	26.1
Invierno	16.4	↑	0.5	4.6		-0.4	114.3		-88.6
Primavera	23.0	↑	1.5	9.6	↑	1.4	265.5	↑	34.8
Anual	23	↑	0.5	10.1	↑	0.7	986.2	↑	60.8

⁸ ANEXO 2. VIII

A continuación se puntualizan los posibles efectos, tendencias climáticas y prácticas de adaptación sobre los cultivos de maíz trigo y soja.

El maíz bajo la secuencia dominante de M-T/S, tiene en la PP la única variable de efecto muy significativo. Considerando que la fecha de floración de maíz ocurre entre diciembre y enero y siendo la variabilidad entre años muy alta (80 a 90%) toman relevancia las prácticas que favorezcan la conservación del agua en el suelo (por ejemplo, rotación y SD). Si las tendencias de las precipitaciones de diciembre y enero se confirman (16 y 27% respectivamente) se abre un escenario de mejora en el potencial de rendimiento (Tabla 9).

En soja, al tratarse de un cultivo de segunda siembra su período crítico (R3-R5) se ubica en el mes de febrero. La principal variable que afectó a los rendimientos fue la temperatura máxima seguida de la precipitación durante el PC. Para el período de tiempo analizado se observa un aumento en las precipitaciones del mes de febrero de 44 mm, asociado a un descenso en las temperaturas máximas (-2.2°C). Este escenario favorecería al doble cultivo T/S.

Por último, para el cultivo trigo se observó que durante el PC, temperaturas mínimas menores a 9°C favorecen el rendimiento y temperaturas máximas superiores a 27°C limitan el rendimiento. Las tendencias para la temperatura mínima y máxima durante el PC (principalmente setiembre) muestran aumentos de 0.7 y 1.3°C para el período 1931-2011, respectivamente. Una posible adaptación a este aumento de la temperatura sería adelantar la fecha de siembra a la primera quincena de junio con el fin de ubicar el PC en un ambiente más favorable de temperaturas más frías.

Tabla 9, Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en Pergamino, Argentina

CULTIVO	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol de Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	Sistema	Fertilización	Desviación Estándar Relativa	Riesgo de Umbral (%) <6000
MAIZ	1.5	1. PP <	20.5	Monocultivo	Si	38,12	51.83
					No	28,79	87.58
				Rotación	Si	30,23	34.89
					No	22,22	58.32
SOJA	NS	1. Tmx >	29.58	M-T/S	LV	39,3	67.32
		2.PP <			SD	31,8	58.57
		3. Tmd >		T/S	LV	37,5	70.07
					SD	38,4	66.75
TRIGO	NS	1.Tmn>	21.5	M-T/S	Si	52	56.72
		2. Tmx >			T/S	No	43
				Si		51	59.4
		No		61	62.84		

La capacidad de almacenamiento de agua de estos suelos parece ser el factor más relevante a la hora de explicar el bajo efecto aleatorio cuando se lo compara con las otras regiones estudiadas.

Claramente las tecnologías de diversificación productiva y fertilización contribuyen marcadamente a reducir el riesgo productivo ante el incremento de variabilidad climática.

La Estanzuela, Uruguay⁹

Se discuten a continuación los resultados del experimento de larga duración de La Estanzuela en base a los resultados de las 5 estaciones meteorológicas más cercanas del territorio de Uruguay. Las tendencias de cambio promedio explican menos del 10% de la variabilidad total,

⁹ ANEXO 2. IX

la variación interanual es la más importante (80%) y el remanente corresponde a cierta tendencia cíclica de escasa relevancia (10%).

El resultado más consistente entre estaciones es el cambio de aumento de las precipitaciones totales y el de las temperatura máximas. Si bien en promedio las temperaturas mínimas aumentan el comportamiento entre estaciones meteorológicas es muy variable.

Para visualizar el potencial impacto de las tendencias de cambio en los periodos críticos estudiados se muestran en la tabla 10 las variaciones identificadas para los meses en que es más frecuente que se presente el PC en cereales de invierno (octubre) y en cultivos de verano (Diciembre, Enero, Febrero).

Tabla 10. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Uruguay entre 1965 y 2011									
Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
Periodo	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Enero	28.9	↑	0.7	17.1	↑	0.73	108.2		-7.05
Febrero	27.7	↑	0.38	15.7	↑	0.78	126.6	↑	19.87
Octubre	21.3	↑	0.25	13.4	↑	0.78	122.3	↑	26.65
Diciembre	27.5		-0.3	17.6	↑	0.43	102.1	↑	5.72
Verano	28.8	↑	0.3	16.8	↑	0.7	344.3	↑	18.0
Otoño	23.1	↑	0.1	9.3	↑	0.0	358.1	↑	25.9
Invierno	16.7	↑	0.3	7.3		-0.1	255.0		-21.4
Primavera	22.4	↑	0.4	13.4	↑	0.4	327.3	↑	4.1
Anual	22.7	↑	0.3	11.7	↑	0.2	1284.4	↑	20.7

De acuerdo a los resultados de los sistemas evaluados en el ELD de La Estanzuela los aumentos de precipitación en Octubre podrían aumentar la expresión de problemas sanitarios principalmente en trigo que se traducirían en mermas de rendimiento y calidad de grano. Si la sanidad fuera controlada por defensivos o resistencia genética las temperaturas máximas favorecen la expresión de rendimientos y están asociadas a mayores radiaciones que también tienen efecto positivo en los rendimientos. El aumento de las temperaturas mínimas también

puede estar asociado a reducciones en el número de heladas tardías que se ha verificado en otros estudios. Ello impactaría positivamente reduciendo el riesgo de daños ocasionales en la floración del trigo y la cebada (Tabla 11).

La precipitación de enero es principalmente crítica para la siembra temprana de maíz y precisamente este mes es el que presenta la mayor reducción de precipitaciones y un significativo aumento de las temperaturas máximas. Estos resultados alentarían como medida de adaptación el desplazamiento de la floración a fechas más tardías, o más tempranas, tanto por manejo de las fechas de siembra como por el ciclo de los cultivares. El mismo escenario climático puede indicarse para el cultivo de soja. Aquí lo más razonable parece llevar las fechas de floración a febrero pues ya naturalmente es sembrado en una proporción muy alta como cultivo de segunda y tiende a florecer en febrero.

Lo más consistente en todas las estaciones y por supuesto en todo el territorio es la disminución de las precipitaciones en el periodo invernal lo que constituye una oportunidad de mejores rendimientos por la reducción de los potenciales periodos de anegamiento que afectan en etapas tempranas a los cereales de invierno. Asimismo la reducción de precipitaciones otorgaría mejores oportunidades de siembra en suelos que por su naturaleza arcillosa tienen pocos días aptos de siembra.

Tabla 11. Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en La Estanzuela Colonia Uruguay

CULTIVO	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol De Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	Manejo	Sistema	Desviación Estándar Relativa	Riesgo De Umbral (%)
TRIGO	1.7	1°.Tmn >	49	Fert. N	AC_NF	56	99
		2°.Tmx <			AC_F	27	42
		3°. Rad >			RP_F	35	34
CEBADA	1.5	1°.PPEf. >	47	Sorgo Previo	AC_NF	60	98
		2°. Tmd <			AC_F	29	37
					RP_F	19	20
GIRASOL	NS	1°. Tmx >	47	Bray Fert. N	AC_NF	35	98
		2°. Rad. >			AC_F	4	65
					RP_F	26	56
SORGO	1.6	1°.Rad. >	55	Doble Cultivo	AC_NF	46	60
		2°. Tmd <			AC_F	35	33
					RP_F	42	29

Los sistemas de rotación con pasturas mostraron consistentemente menor riesgo que los rendimientos queden por debajo del umbral de indiferencia económica, mientras que las rotaciones agrícolas continuas, que emplearon fertilizantes, presentaron también mucho menor riesgo que la agricultura continua sin fertilizantes. En la explicación de estos comportamientos se suman los efectos directos de los tratamientos en el año y los efectos acumulados sobre la condición del suelo y la sanidad de cada sistema de rotación.

Chillan, Chile¹⁰

¹⁰ ANEXO 2. X

El clima de esta región de Chile tiene un marcado déficit primavero-estival que obliga a realizar el cultivo de trigo con riego dado que el periodo crítico y el llenado de grano se hacen en meses de muy baja precipitación. La temperatura máxima y mínimas tienden a aumentar mientras que la precipitación en el periodo crítico decrece escasamente y no es directamente crítica por el manejo con riego. Las temperaturas mínimas son críticas por estar asociadas a heladas que pueden ocurrir en floración y la tendencia a aumentar puede estar asociada a una disminución del riesgo de daño por heladas (Tabla 12).

Tabla 12. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Chillan entre 1969 y 2011									
Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ °C	Obs.		Δ mm
Octubre	19.7	↑	0.5	6.6	↑	1.1	64.2		-12.9
Noviembre	23.1	↑	0.4	8.4	↑	1	32		-7.3
Verano	27.8	↑	0.9	10.7	↑	1.1	55.1	↑	5.8
Otoño	20.4		-0.1	7.1	↑	0.5	288.3		-28.5
Invierno	12.9		-0.2	4.3	↑	0.6	527.0	↑	21.9
Primavera	19.9	↑	0.4	6.7	↑	0.9	180.0		-11.5
Anual	20.3	↑	0.2	7.2	↑	0.8	1050.4		-36.7

El experimento comparativo de rendimientos de cultivares es el más apropiado para caracterizar el efecto de las variables climáticas dado que posee un número muy alto de años climáticos. Por el contrario el de rotaciones es insuficiente debido a que el trigo aparece aperiódicamente en la rotación y solamente se dispone de 5 años climáticos.

Para el estudio de series de tiempo realizado en Chillan, el cultivo de trigo muestra una marcada tendencia de rendimientos crecientes atribuibles al manejo agronómico y mejoramiento tecnológico (tabla 13). A su vez, dentro del periodo de estudio se detectó el efecto de algunas variables climáticas sobre el rendimiento del trigo, por lo cual el seguimiento de estas variables permite predecir probabilidades de escenarios productivos hacia el futuro.

En el caso concreto de este estudio para el cultivo de trigo bajo riego en Chile, se encontró directa asociación entre las probabilidades de escenarios de rendimiento y la temperatura máxima en el periodo crítico 2 (PC2), que comprende desde 10 días antes de antesis hasta 20 días después de antesis. Al respecto, cuando las temperaturas máximas aumentan sobre 23 °C en el PC2, la probabilidad de rendimiento máximo se estima en 9941 kg/ha. Por el contrario, descensos en la temperatura máxima en el PC2, provocan disminución en los rendimientos.

Las temperaturas máximas se encuentran fuertemente asociadas a radiación y a la disminución del riesgo de heladas. Ambos factores, bajo condiciones de riego, permiten suponer que los mayores rendimientos que se reportan por el árbol de regresión cuando se supera el umbral de 23 grados C tienen ese efecto. El escenario futuro de aumentos de temperatura plantearía condiciones que hacen suponer un crecimiento de los potenciales de producción si el agua de riego no fuera limitante.

Tabla 13. Indicadores de Productividad y Variabilidad en Función de Variables Climáticas en Chillan, Chile

Cultivo	Ensayo	Progreso Tecno. Anual (%)	Árbol de Clasificación	Efecto Aleatorio (%)	Rotación	Desviación Estándar Relativa	Riesgo de Umbral (%) <5500
TRIGO	Comparativo de Rendimiento	1.9	1. T max en PC < 2. Precip <	17.9		21	13.3
TRIGO	Trigo en Rotación	1.4	1. T max >	9.2	R-T-TR2 R-T-F-C MS-T-TR2 MG-T-F-C	9.6 15.2 12.7 13.1	0.24 13.61 14.21 23.33

Sec: Secuencia de cultivos, R-T-TR2: Remolacha-Trigo-Trébol Rosado dos años, R-T-F-C: Remolacha-Trigo-Frejol-Cebada, MS-T-TR2: Maíz para silo-Trigo-Trébol Rosado dos años, MG-T-F-C: Maíz para grano-Trigo-Frejol-Cebada, DE: Desvío estándar interanual, DER: Desvío relativo a la variabilidad interanual. P (Rinde): Probabilidad de obtener rendimientos por debajo del umbral económico o punto de equilibrio medido en Kg/ha

En relación a los efectos de las variables de manejo del suelo por los sistemas de rotación no se verificó efecto de la fertilización nitrogenada ya que los tratamientos tenían escasa diferencia de dosis (70 y 100kg/ha). Sin embargo los sistemas con pasturas de leguminosas mostraron la mayor estabilidad productiva al igual que cuando se empleó remolacha en la rotación ya que es un cultivo con alta residualidad de su fertilización nitrogenada hacia el cultivo de trigo.

Conclusiones Generales: Principales efectos del clima y prácticas de manejo para adaptación.

1. Se identificaron variables climáticas críticas para los diferentes agroecosistemas y cultivos. Naturalmente, esas variables difieren entre sitios debido a sus asociaciones con otras variables climáticas y a las condiciones propias de lugar o a factores de manejo, tales como el riego.

2. Las tendencias climáticas de esas variables críticas, cuando son significativas, alertan sobre potenciales medidas de adaptación que deberían anticiparse para los sistemas productivos de cada sitio.
3. En todos los casos la variabilidad interanual de rendimientos no explicada por factores de manejo controlados se acercó al 50% y una muy alta proporción de la misma es consecuencia de la variabilidad climática.
4. Se verificó gran variación en la capacidad de los suelos en mantener su productividad en sistemas agrícolas continuos derivado de sus condiciones de resiliencia al deterioro de las propiedades físicas como consecuencia de la degradación por pérdida de carbono orgánico. No obstante, en todos esos sistemas la contribución de nitrógeno, ya sea biológico o por fertilización, incrementó notablemente la productividad.
5. El contraste de sistema de laboreo convencional en relación a la siembra directa solamente en un caso evidenció en caso efectos significativos de corto plazo sobre la variabilidad de los rendimientos debida a potenciales beneficios en la disponibilidad hídrica.
6. Los sistemas productivos más diversificados y en particular aquellos con pasturas de leguminosas forrajeras redujeron notablemente la variabilidad de rendimientos y sumado a su mejor performance productiva, fueron siempre los de menor riesgo de estar por debajo umbral de rendimientos de indiferencia, cuantificado por el rendimiento medio de los agricultores de la región.
7. Solamente en un ELD se pudo contrastar un sistema de manejo de mantenimiento del Carbono Orgánico respecto a otro muy degradante. En esa situación se verificaron efectos muy grandes de esta variable y productividad aunque se corrigiera la disponibilidad de nitrógeno y fósforo. Asimismo las diferencias en riesgo productivo en esta situación fueron extremas.
8. En materia de control sanitario se advierte como medida de adaptación mas relevante la necesidad de incrementar el control de las enfermedades foliares y de espiga de los cereales de invierno como respuesta al aumento de las temperaturas y lluvias de primavera.
9. En el caso de los cultivos de verano las tendencias climáticas de aumento de lluvias estivales en el sureste de SA alientan mejoras en los rendimientos pero dado el aumento de variabilidad e intensidad de las mismas la adaptación mediante diversificación de las fechas de siembra crece en importancia.

COMPONENTE 3: ESCENARIOS CLIMÁTICOS

El clima consiste en uno de los principales factores de riesgo involucrados en la producción agrícola. En las últimas décadas se han desarrollado herramientas informáticas capaces de evaluar la respuesta del desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos a factores climáticos o de manejo mediante técnicas de simulación. En este informe se presentan los resultados de las simulaciones realizadas (DSSAT) para evaluar el impacto de la variabilidad del clima sobre el rendimiento de los cultivos de trigo, maíz y soja en la Región Pampeana Argentina y Uruguay para escenarios climáticos con precipitaciones por encima y por debajo de lo normal¹¹.

¹¹ Ver ANEXOS 3., 3. I, 3. II, 3. III y 3. IV.

Se seleccionaron 6 sitios piloto con características diferenciales en cuanto a clima, sistemas y capacidad productiva. Los sitios se corresponden con las estaciones experimentales de Balcarce, Bordenave, Pergamino y Las Breñas de INTA en Argentina y las de La Estanzuela y Salto de INIA en Uruguay. La información climática utilizada para la simulación provino de los escenarios climáticos desarrollados por el proyecto mediante el generador estocástico LARS-WG para los ciclos con precipitaciones por encima de lo normal (Húmedos) y debajo de lo normal (Secos). Para cada tipo de ciclo se cuenta con 100 series sintéticas de 100 años cada una consistente en datos diarios de temperatura máxima, mínima, precipitación y radiación solar.

Los suelos representativos de cada estación meteorológica fueron obtenidos de las Cartas de suelos 1:50000 elaboradas por el INTA y del INIA de Uruguay. El manejo para cada cultivo en cada zona de producción, corresponden al manejo típico que realizan los productores (ORA - Oficina de Riesgo Agropecuario, SAGPyA - e informantes calificados del INTA). Estos incluyen las fechas más probables de siembra, genotipos utilizados, fertilizantes aplicados, cultivos antecesores y las condiciones hídricas y nutricionales iniciales. En todos los casos se consideraron condiciones de secano y la ausencia de plagas y enfermedades; además, para el cultivo de soja, se asumieron condiciones nutricionales no limitantes.

Resultados en Argentina

Trigo:

La figura 5 muestra la distribución de los rendimientos simulados para el cultivo de trigo en Argentina. En los escenarios con precipitaciones por encima de lo normal el rendimiento es un 12.6% superior a los escenarios con precipitaciones por debajo de lo normal. La variabilidad del rendimiento en los dos escenarios difiere en todos los sitios. La menor diferencia entre sitios se observa en Pergamino con aumentos de variabilidad del orden del 10% en los ciclos secos mientras que en Balcarce, esta diferencia llega a representar aproximadamente el 25%.

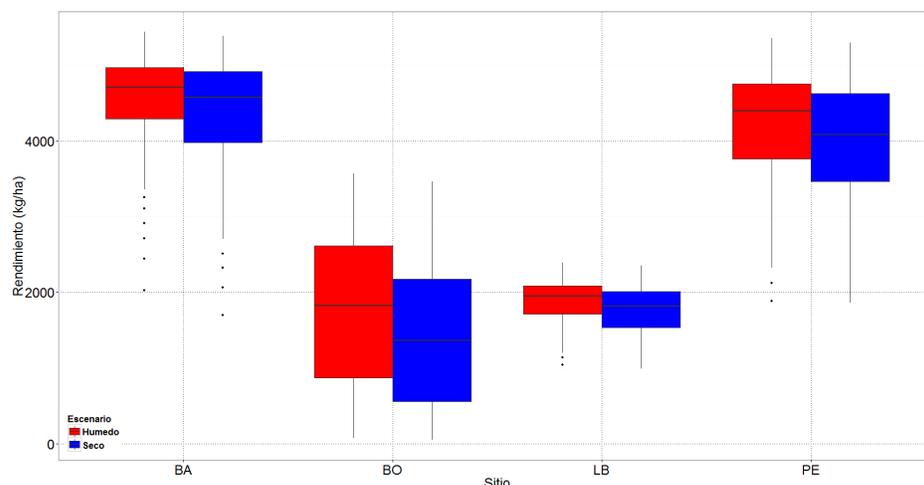


Figura 5: rendimientos simulados para el cultivo de trigo en las localidades de Balcarce (BA), Bordenave (BO), Las Breñas (LB) y Pergamino (PE) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (rojo) y secos (azul).

El requerimiento de riego suplementario para los ciclos con precipitaciones por debajo de lo normal (Seco) es en promedio un 12% mayor que el requerido en los ciclos con lluvias

superiores a lo normal (Húmedo) presentando una diferencia máxima en la localidad de Balcarce (Figura 6).

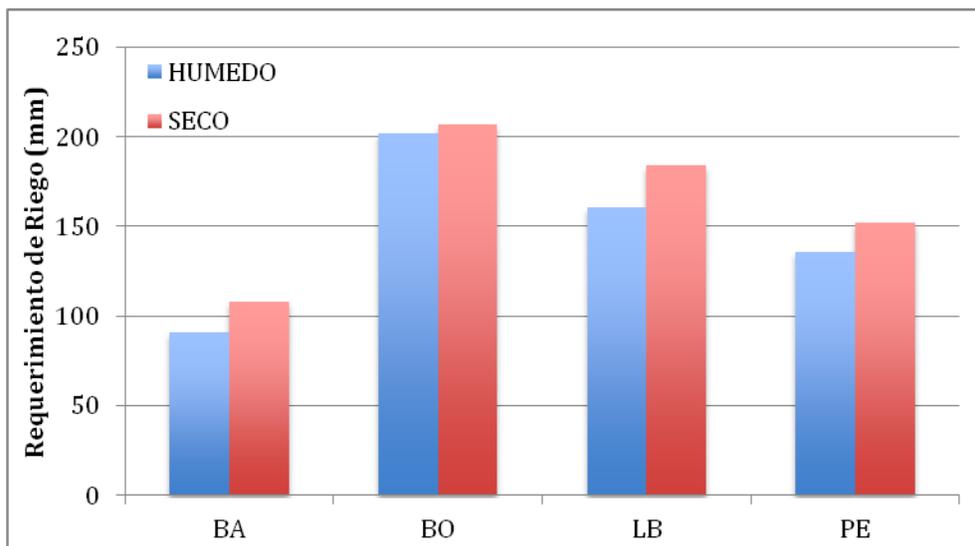


Figura 6: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Trigo.

Maíz:

Para el cultivo de Maíz, los rendimientos simulados en los ciclos húmedos son en promedio un 18.7% más altos que en los ciclos secos, oscilando entre el 8.2% y el 25.8% (Figura 3). La dispersión de los rendimientos es aproximadamente un 15% más elevada en los escenarios que presentan menores precipitaciones.

La necesidad de riego suplementario (Figura 7) oscila entre los 111 mm y 267 mm. En promedio en los escenarios secos se precisa un 20.5% más de agua que en los escenarios húmedos para suplir los requerimientos hídricos del cultivo.

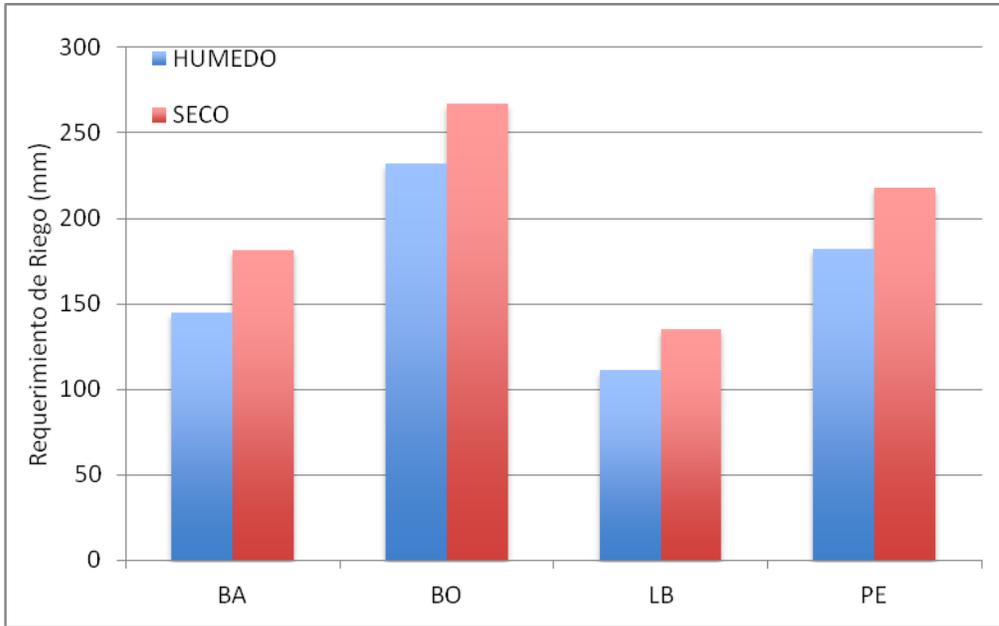


Figura 7: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Maíz.

Soja:

La diferencia de la mediana de rendimientos entre escenarios para el cultivo de soja es, en promedio, un 35% mayor en los escenarios húmedos, alcanzando un máximo de 56% (Figura 8). La variabilidad de los rendimientos es mas alta en los escenarios secos, esta diferencia puede alcanzar al 27% en el caso de Balcarce.

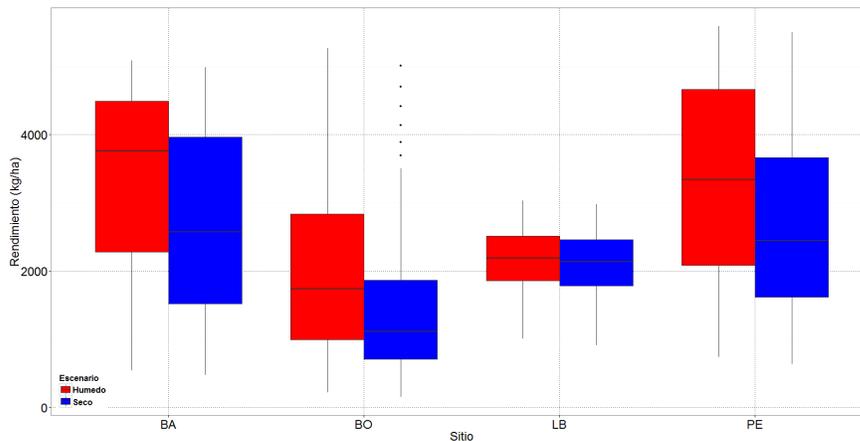


Figura 8: rendimientos simulados para el cultivo de Soja en las localidades de Balcarce (BA), Bordenave (BO), Las Breñas (LB) y Pergamino (PE) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (rojo) y secos (azul).

El requerimiento de agua suplementaria en el cultivo de soja oscila entre los 108 mm y 278 (figura 9). La mayor diferencia entre escenarios se observa en la localidad de Bordenave con requerimientos superiores en un 19.6% para los ciclos con precipitaciones por debajo de lo normal.

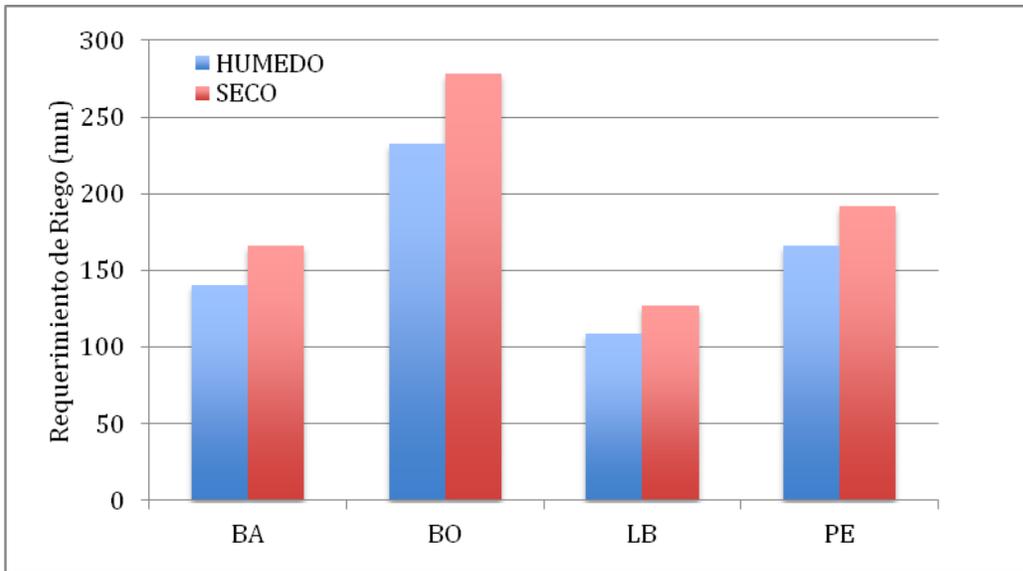


Figura 9: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Soja.

Resultados en Uruguay

Soja

En el caso de soja el modelo se corrió para las localidades de; La Estanzuela (LE), y Salto (SA), Se evaluó el efecto de dos fechas de siembra 15 de octubre (1), 15 de noviembre (2). Se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre los escenarios climáticos, las fechas de siembra y las localidades analizadas (figura 10). Para ambos escenarios climáticos las fechas de noviembre mostraron un mejor comportamiento.

En los escenarios húmedos el rendimiento es un 34% superior a los escenarios secos. La variabilidad del rendimiento es alta para todos los tratamientos y escenarios (69% en promedio) en los escenarios secos esta variabilidad es mayor llegando las diferencias a un 17% respecto al escenario húmedo.

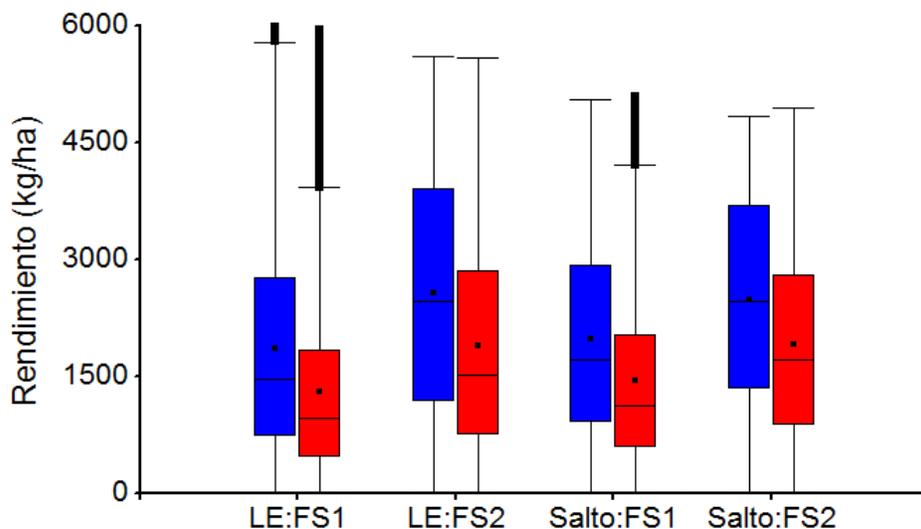


Figura 10: Rendimientos simulados para el cultivo de Soja, en las localidades La Estanzuela (LE) y salto, dos fechas de siembra (FS1 y FS2) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (azul) y secos (rojo).

IMPACTO SOBRE LAS CAPACIDADES DEL SISTEMA DE INVESTIGACIÓN REGIONAL

a. Bases de datos.

Este proyecto trabajó exclusivamente con información pre-existente y con una fuerte orientación metodológica basada en la aplicación de modelos para generar indicadores de productividad y sostenibilidad. Ese enfoque permitió ordenar la información en nuevas bases de datos que integraron información climática y productiva de largas series históricas que podrán ser empleadas para futuros estudios productivos y ambientales. En ningún caso la información se encontraba depurada por calidad, digitalizada e integrada lo que constituye un nuevo patrimonio para el futuro de esos experimentos y sus instituciones.

b. Capacitación en la aplicación de modelos:

1. La modelación estadística de los experimentos de largo plazo basada en modelos mixtos, arboles de regresión, componentes principales con gráficos biplot, etc. con 9 talleres regionales y la participación de aproximadamente 20 investigadores.
2. La capacitación en análisis de imágenes remotas para estimación de uso del suelo en 3 talleres con participación de 15 técnicos.
3. La modelación del carbono del suelo con el modelo AMG a 12 investigadores regionales en base a dos talleres de capacitación.
4. El entrenamiento de un experto en la Universidad de Columbia (IRI) en la aplicación de metodologías estadísticas para la proyección de escenarios climáticos para la región.