

# **La Sostenibilidad Productiva de la Expansión Agrícola ante el Cambio Climático en el Cono Sur de AL.<sup>1</sup>**

Estudio de registros históricos de variables productivas y ambientales en Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay en las últimas cuatro décadas

2014

---

<sup>1</sup> Reporte en base a los resultados del Proyecto FONTAGRO RG-T1654 “*Variabilidad y Cambio Climático en la Expansión de la Frontera Agrícola en el Cono Sur: Estrategias Tecnológicas para Reducir Vulnerabilidades*”

<b>I. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.</b>	<b>3</b>
<b>Consideraciones Relevantes</b>	<b>6</b>
<b>II. LA VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA .</b>	<b>6</b>
<b>Características del Clima</b>	<b>6</b>
<b>Análisis de la variabilidad climática</b>	<b>7</b>
<b>Componentes de la variabilidad climática</b>	<b>7</b>
<b>Análisis de las tendencias relacionadas al cambio climático</b>	<b>8</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>9</b>
<b>III. PRODUCTIVIDAD Y CLIMA EN EXPERIMENTOS DE LARGA DURACIÓN (ELD)</b>	
<b>Balcarce, Argentina</b>	<b>10</b>
<b>Bordenave, Argentina</b>	<b>13</b>
<b>Las Breñas, Argentina</b>	<b>15</b>
<b>Pergamino, Argentina</b>	<b>17</b>
<b>La Estanzuela, Uruguay</b>	<b>18</b>
<b>Chillan, Chile</b>	<b>21</b>
<b>Síntesis: Principales efectos del clima y prácticas de manejo para adaptación.</b>	<b>23</b>
<b>IV. DINAMICA DEL CARBONO ORGANICO DEL SUELO</b>	<b>23</b>
<b>Ensayos de Larga Duración</b>	<b>24</b>
<b>Descripción y Comportamiento del Modelo AMG</b>	<b>25</b>
<b>Principales Tendencias Encontradas</b>	<b>25</b>
<b>Escenarios Futuros</b>	<b>29</b>
<b>Conclusiones y Consideraciones</b>	<b>30</b>
<b>V. ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b>	<b>30</b>
<b>Resultados en Argentina</b>	<b>31</b>
<b>Trigo</b>	<b><u>31</u></b>
<b>Maíz</b>	<b><u>32</u></b>
<b>Soja</b>	<b>33</b>
<b>Resultados en Uruguay</b>	<b>34</b>
<b>Soja</b>	<b>34</b>
<b>Consideraciones Finales sobre Escenarios</b>	<b>35</b>

## I. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.

El proceso de expansión agrícola en el Cono Sur de AL es muy consistente y significativo desde hace 50 años (Figura 1).

Sin embargo los registros globales de producción evidencia que se hacen cada vez más acelerados por lo que es imperioso caracterizar la naturaleza del 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. Este estudio incluye cinco países; Argentina, Bolivia, Chile Paraguay y Uruguay.

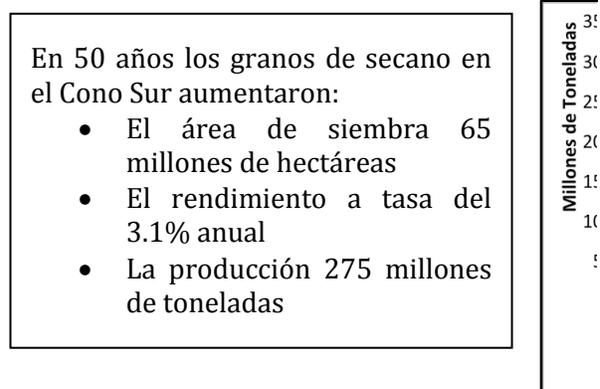


Figura 1 . Crecimiento de la Producción de Granos en el cono sur de AL en las ultimas cinco décadas.

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 países<sup>2</sup>.
2. Compilación de la información de áreas y producción agrícola que reportan las oficinas especializadas de los países a FAO<sup>3</sup>.

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 2) y luego se estiman las superficies totales mediante la lectura de los pixeles 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%).
4. El uso de suelo únicamente con cultivos de verano actualmente alcanza al 78%. Solamente no se ha incrementado, 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 reemplaza pasturas naturales y cultivadas.

---

<sup>2</sup> Volante, J. ANEXO 1. I

<sup>3</sup> Volante, J. Diaz, R. ANEXO 1. II

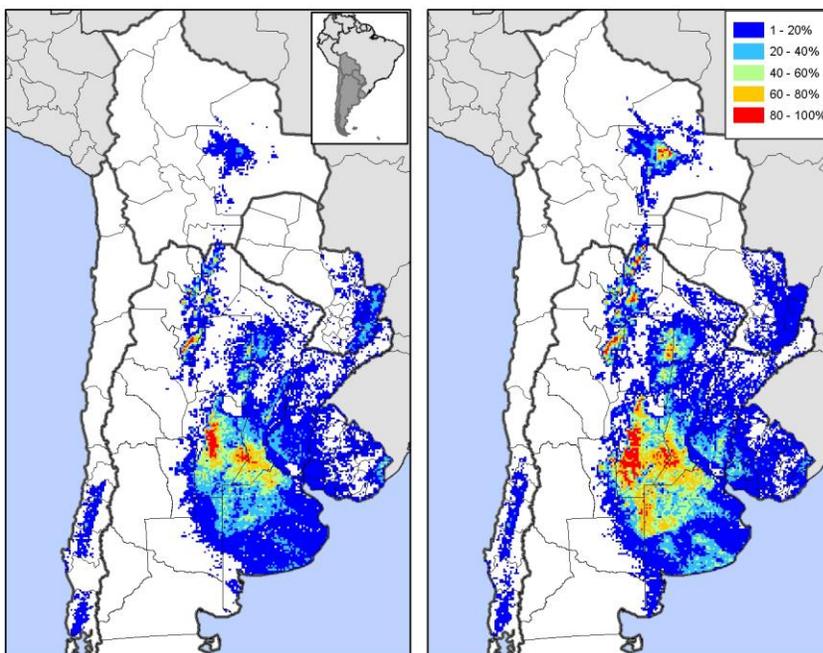


Figura 1. Mapas de **densidad de cultivos de verano** en dos momentos. El color de cada píxel de 10 x 10 km (10.000 ha) representa el porcentaje de la presencia de cultivos de verano detectada en esa unidad cartográfica.

El análisis de imágenes permite identificar donde está ocurriendo el crecimiento y vincularlo a los sistemas de producción y la aptitud de los recursos naturales del lugar en base a las siguientes consideraciones.

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 las 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 <sup>4</sup>
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

---

<sup>4</sup> (Karl, 2006).

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,<sup>5</sup>. En este caso las diferencias con lo promedios de la región 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.

#### 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.

<sup>5</sup> (Paruelo et al, 2004; Paruelo et al, 2006; Guerschman, 2004)

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.

## **II. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DEL CONO SUR<sup>6</sup> .**

### **Características del 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 climática.

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.

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 y también se resalta, que en varias regiones del planeta, el clima presenta ciclos 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.

Para comprender la importancia relativa del cambio climático y su impacto se recurrió a registros de producción seriados provenientes de los Experimentos de Larga Duración (ELD) y experimentos de evaluación de cultivares.

El área de estudio abarca la región Pampeana y norte de Argentina, Uruguay y Paraguay; 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 (de 30 a 40 años de registros) provenientes de Argentina (Balcarce, Bordenave, Las Breñas, Marcos Juárez, Pergamino, y Roque Sáenz Peña), Bolivia (Camurí, 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**

---

<sup>6</sup> Magrin, G., Rodriguez, G., Travaso, M. ANEXOS 2. I, 2. II, 2. III y 2. IV.

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 originado en el cambio climático y la “variabilidad entre décadas” y “variabilidad interanual” que correspondería a la variabilidad natural del clima. La metodología se basa en el análisis estadístico de series temporales y remoción de tendencias <sup>7</sup>.

### Componentes de la variabilidad climática

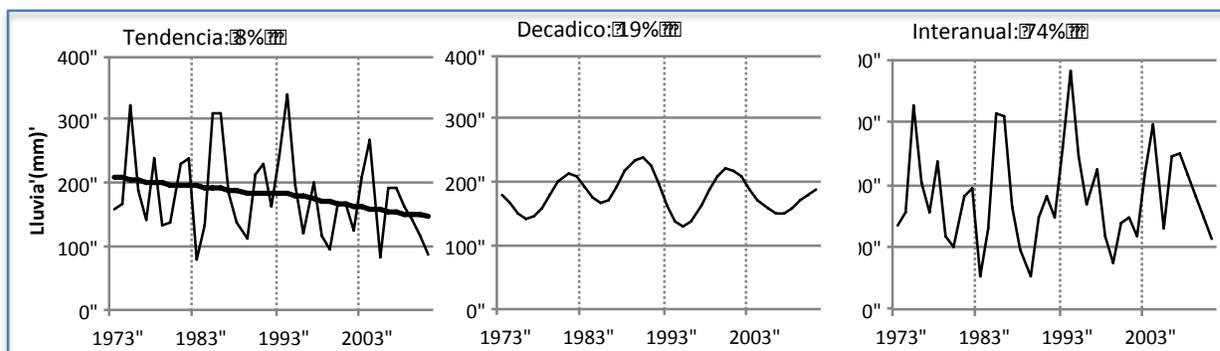


Figura 2: Análisis de las lluvias con indicaciones de tendencias, variabilidad decádica y variabilidad interanual para: Lluvias del mismo trimestre para la estación de Batán (Méjico).

El ejemplo, de la Figura 2, muestra como 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 último, 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.

La variabilidad interanual 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.

### Análisis de las tendencias relacionadas al cambio climático

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 Sudeste de Sudamérica (SESA), 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

<sup>7</sup> Greene, et. al (2011).

Bolivia; 24mm/década en Méjico; 22mm/década en tres estaciones de Argentina; y 15mm/década en Chile (Figura 3).

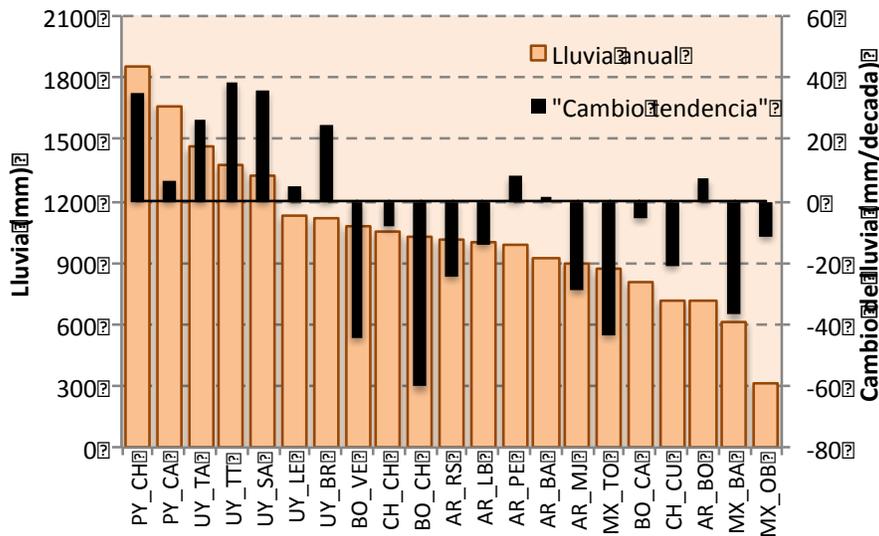
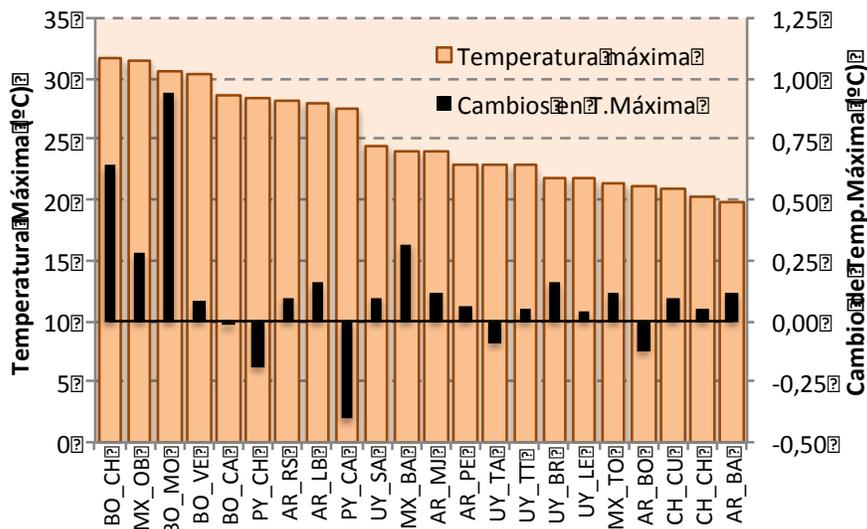


Figura 3: Precipitación anual (barras naranjas) en los sitios analizados y cambio de la lluvia (valor final menos valor inicial de la tendencia) expresado en mm/década.

La temperatura máxima media anual incrementó en la mayor parte de los sitios (Figura 4). El aumento medio fue de 0.2°C/década, con un máximo de 0.94°C/década. 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 (17), (Figura 4). El aumento promedio fue de 0.2°C/década, con un aumento máximo de 1.06°C/década y un mínimo de 0.02°C/década. 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).



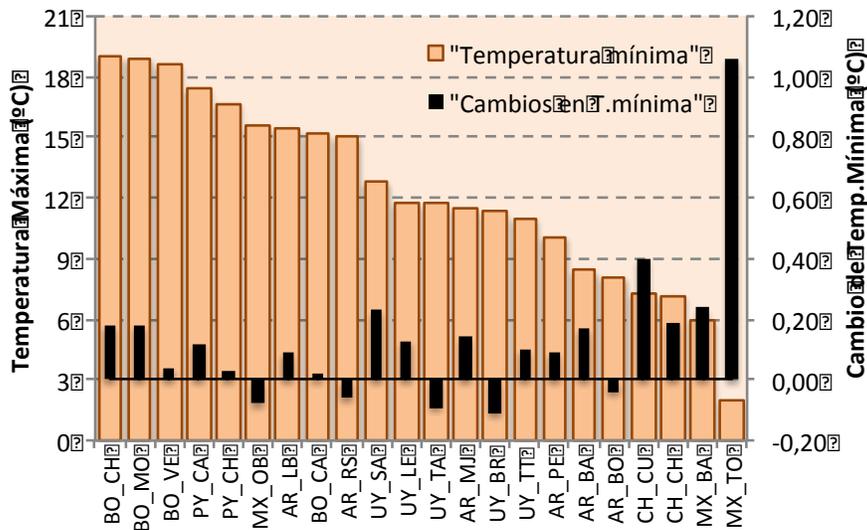


Figura 4: Temperatura máxima/mínima media anual (barras naranjas) en los sitios analizados y cambio de la temperatura máxima/mínima (valor final menos valor inicial de la tendencia) expresado en °C/década.

### 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 algunas 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.

### III. PRODUCTIVIDAD Y CLIMA EN EXPERIMENTOS DE LARGA DURACIÓN (ELD)

Los experimentos de larga duración (ELD) evalúan prácticas de manejo de suelos y cultivos y su performance productiva frente al cambio climático permite evaluar su contribución a reducir el impacto de este factor de riesgo.

Para evaluar el impacto de las variables climáticas sobre la productividad se seleccionaron, para todos los cultivos, los registros climáticos del periodo crítico de floración (15 días antes y 15 días después). Para establecer umbrales de riesgo económico por productividad, se definió como umbral de indiferencia al rendimiento promedio de los productores en su correspondiente agroecosistema. La cantidad de años en que con un sistema de producción no alcanza el umbral define el riesgo del mismo.

Se analizaron experimentos de 9 agroecosistemas en: Balcarce, Bordenave, Las Breñas y Pergamino en Argentina; La Estanzuela en Uruguay; Chillan en Chile. Los experimentos incluyeron numerosos cultivos pero no todos fueron de interés para el presente trabajo donde se analizaron los datos de rendimiento anuales 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 (si: 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.

### **Balcarce, Argentina <sup>8</sup>**

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 2).

Tabla 2. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Balcarce entre 1960 y 2011.			
Periodo	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación

<sup>8</sup> Studdert, G., Dominguez, G. ANEXO 2. V

	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
<b>Anual</b>	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 precipitaciones (PP) mayores que 133.5 mm provocaron reducción de los rendimientos, presumiblemente 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 restricciones sanitarias si se producen junto con un aumento en las temperaturas máximas (Tabla 3).

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, si bien 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 T<sub>mn</sub> 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 agricultura continua (RA) tuvo rendimientos con mayor variabilidad que los rendimientos en rotación con pasturas (RP) 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 3, 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 Tmn 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.

5. La fertilización nitrogenada consistentemente redujo el riesgo de no alcanzar un umbral de indiferencia en la productividad.

### Bordenave, Argentina<sup>9</sup>

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<sup>-1</sup>. (Tabla 4). El comportamiento de tendencias presenta un alto contraste con la localidad de Balcarce a pesar que en escala regional no es lejano. Es la única localidad analizada que no manifiesta aumentos consistentes de temperatura.

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
<b>Anual</b>	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)<sup>-1</sup> (Tabla 5). 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 disminuciones durante el período crítico de: 1) la precipitación durante el ciclo del cultivo de trigo, 2) la temperatura máxima media, 3) la radiación solar acumulada, y 4) la temperatura mínima media.

Los efectos de la fertilización, 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. Las secuencias con verdes 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.

<sup>9</sup> Kruger, H. Zilio, J. ANEXO 2. VI

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 5 , 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.

Los principales efectos verificados en este agroecosistema son:

1. La variable meteorológica de mayor contribución al rendimiento fue la precipitación durante el ciclo del cultivo.
2. Las probabilidades de no superar los rendimientos de indiferencia fueron siempre marcadamente para el monocultivo de trigo respecto de las secuencias con verdes y pasturas.
3. La fijación biológica de N por leguminosas forrajeras resulta destacada frente a la falta de respuesta económica de la fertilización nitrogenada por las frecuentes restricciones hídricas de este ambiente.

### Las Breñas, Argentina<sup>10</sup>

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. 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 6).

Tabla 6. Tendencias de Variables Climáticas en meses críticos, estaciones y anual para Las

<sup>10</sup> Cáceres, R. ANEXO 2. VII

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
<b>Anual</b>	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 mayor a 31.7°C 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 7).

Tabla 7. 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 ELD 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 799 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 solar en el Período Crítico Rs ( $R=0.16$ ,  $p<0.05$ ) ya que los años con mayor rendimiento fueron los años con mayor Rs. Los años con PP menores a 364 mm tuvieron rendimientos relativamente bajos (870 kg/ha) al igual que años con PP. mayores a 723 mm (1626 kg/ha).

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 aleatorio (66%) originado principalmente por la variabilidad climática.

Los principales efectos característicos de este agroecosistema son:

1. La variable meteorológica de mayor contribución al rendimiento fueron las precipitaciones. Fueron primero más determinantes las del periodo crítico y luego las del ciclo vegetativo.
2. El mejor ambiente se alcanzaría hasta un umbral de Tmx mayor a 31.7°C y cuando las precipitaciones en el ciclo se encuentren entre 364 mm y 447 mm,
3. El destacado comportamiento cíclico de las precipitaciones se encuentra al final de un periodo de 10 años por debajo de la media y plantea con incertidumbre su continuidad o reversión futura.

### **Pergamino, Argentina<sup>11</sup>**

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 período invernal (Tabla 8).

---

<sup>11</sup> Andriulo, A., Milesi, L. ANEXO 2. VIII

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.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ 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
<b>Anual</b>	23	↑	0.5	10.1	↑	0.7	986.2	↑	60.8

El maíz bajo la secuencia dominante de maíz-trigo-soja, 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 (aumento del 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
					No	43	75.49
		2. Tmx >		T/S	Si	51	59.4
					No	61	62.84

La gran 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.

Los principales efectos característicos de este agroecosistema son:

1. Las tendencias de aumento de las precipitaciones en enero y febrero sugieren un posible escenario de mejoras en la productividad a pesar de posibles incrementos en la variabilidad dada la gran capacidad de almacenaje de agua de estos suelos.
2. La rotación dominante trigo-soja se vería favorecida ante la tendencia de aumento de las precipitaciones y disminución de la temperatura en febrero donde ocurre la floración.
3. Quizás deban adelantarse a la primer quincena de junio las siembras de trigo, como medida de adaptación ante la tendencia de aumento de las temperaturas primaverales.
4. La fertilización nitrogenada y la diversificación frente a la monocultura consistentemente redujeron el riesgo productivo evaluado con los indicadores de indiferencia.
5. La siembra directa presentó algo menos de riesgo productivo comparada con la labranza vertical

### **La Estanzuela, Uruguay<sup>12</sup>**

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, 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 meteorológicas es el cambio de aumento de las precipitaciones totales y el de las temperatura máximas. Si bien las temperaturas mínimas aumenta, el comportamiento entre estaciones meteorológicas es muy variable.

<sup>12</sup> Diaz R. , Rubio V. , Sawchik J. ANEXO 2. IX

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		
	Obs.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ 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
<b>Anual</b>	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 aun 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.

Los principales efectos característicos de este agroecosistema son:

1. El aumento de las precipitaciones en el mes de octubre podría aumentar el riesgo sanitario en los cereales de invierno y en particular el Fusarium de la espiga.
2. El análisis lineal no fue adecuado para evaluar efecto de precipitaciones pues este factor tiene efecto de segundo grado, con efecto negativo en los déficits extremos y en los excesos. Los potenciales de rendimiento se ven muy comprometidos cuando se superan los 120 mm en el período crítico.
3. Una de las tendencias más consistentes es la disminución de las lluvias del periodo invernal, lo que puede reducir el desarrollo temprano de enfermedades foliares en cereales de invierno.
4. Las siembras tempranas de maíz pueden ver disminuido su potencial de producción ante la tendencia de disminución de las precipitaciones en el mes de enero. Llevar la floración de los cultivos de verano al mes de febrero se ajustaría mejor a la tendencia de cambio en las precipitaciones.
5. El factor de mayor impacto de adaptación a la variabilidad climática fue la diversificación productiva y en particular la introducción de pasturas en la rotación.

## Chillan, Chile<sup>13</sup>

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. Las temperatura máximas y mínimas tienden a aumentar mientras que la precipitación en el periodo crítico decrece escasamente y no es directamente critica 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).

Periodo	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ °C	Obs.		$\Delta$ 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
<b>Anual</b>	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 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, que comprendió desde 10 días antes de antesis hasta 20 días después de antesis. Al respecto, cuando las temperaturas máximas aumentan sobre 23 °C en el PC, la probabilidad de rendimiento máximo se estima en 9941 kg/ha. Por el contrario, descensos en la temperatura máxima en el PC, 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

<sup>13</sup> Hirzel J. Undurraga P. ANEXO 2. X

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 leguminosos 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.

Los principales efectos característicos de este agroecosistema son:

1. Este sistema de muy alta productividad bajo riego, muestra que la tendencia de incremento de las temperaturas máximas se reflejaría en potenciales aumentos de producción de trigo, asociados a mayores radiaciones solares durante el período crítico.
2. El factor de manejo más destacado para reducir la variabilidad interanual de rendimientos resultó ser la rotación con pasturas. Aunque también la presencia de remolacha en la rotación, por su alta residualidad de nutrientes, contribuyó también a reducir el riesgo productivo.

### **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 y cultivos 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 escasos efectos de corto plazo sobre la variabilidad de los rendimientos, presumiblemente debida a 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 más 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 cobra importancia.

#### **IV. DINAMICA DEL CARBONO ORGANICO DEL SUELO <sup>14</sup>**

El carbono orgánico del suelo (COS) es el indicador más empleado en funciones ecosistémicas. El COS almacenado en un momento dado, refleja los efectos acumulados de las prácticas de manejo de los últimos años, décadas y centurias. Quizás el mayor desafío agronómico actual sea encontrar sistemas de cultivos que mantengan o aumenten las reservas de COS en los agroecosistemas y contribuyan simultáneamente a revertir la degradación por la intensificación agrícola y a mitigar el efecto invernadero.

Para estimar el potencial de captura de C en los suelos bajo distintos escenarios de uso y manejo de las tierras, es necesario distinguir cuál era la reserva de COS al momento de producirse el cambio (línea de base) y su evolución en las décadas posteriores. Generalmente,

---

<sup>14</sup> Andriulo A. ANEXO 2. XI

esta información está poco documentada y presenta gran dispersión en las tasas de acumulación/pérdida de las reservas de COS, debido a que fue obtenida en diferentes tipos de suelos, condiciones climáticas, profundidades de muestreo y formas de expresión de los resultados.

Con el fin de evaluar el impacto de los cambios de uso y manejo de la tierra ocurridos en las dos o tres últimas décadas sobre las reservas de carbono del suelo (COS), este proyecto recurrió a: 1) ensayos de largo duración (ELD) de secuencias de cultivos y/o sistemas de labranzas (Tabla 14) ubicados en situaciones edafoclimáticas representativas de los sitios en donde ocurrieron cambios significativos en el uso y manejo de la tierra; 2) un modelo de simulación para describir la tendencia media de dichos cambios. El estudio pretende reducir la incertidumbre asociada con esta información y anticiparse a los cambios futuros en las reservas de COS de la región,

Tabla 14. Ubicación geográfica y caracterización edafoclimática de los ensayos de larga duración (ELD) analizados.

ELD (País)	Numero De Ensayos	Local	Año de inicio	Tratamiento	Suelo	Temp. Cº	PP mm
Bordenave Argentina	1	63º 01' O 37º 51' S	1975	Secuencias	Haplustol éntico	15,0	668
Balcarce Argentina	2	57º 17' O 37º 45' S	1976	Secuencias y Labranzas	Argiudol típico Paleudol petrocálcico	14,0	950
Quilamapu Chile	1	71º 54' O 36º 31' S	1992	Secuencias	Haploxerand húmico	13,8	790*
Pergamino Argentina	5	60º 33' O 33º 56' S	1979	Secuencias y labranzas	Argiudol típico	16,4	989
La Estanzuela Uruguay	2	57º 41' O 34º 20' S	1963	Secuencias agrícola ganaderas	Argiudol típico	15,3	1100
M.Cassinoni Uruguay	1	58º 02' O 32º 21' S	1993	Secuencias y labranzas	Argiudol típico	17,0	1060
Las Breñas Argentina	1	61º 06' O 27º 05' S	1967	Manejo de Rastrojos y Abonos verdes	Argiacuol vértico	20,8	972
El Batán Méjico	1	87º 30' O 19º 18' S	1991	Secuencias, residuos y labranzas	Cumulic phaeozem	14,0	600

Temp.: temperatura media anual. Pp: precipitación media anual. (\*) Con riego complementario.

### Ensayos de Larga Duración

El análisis de la evolución de las reservas de COS estuvo centrado en la elección de tratamientos que representaran opciones tecnológicas contrastantes. Los ELD analizados consistieron en sistemas de producción en agricultura continua (AC) y mixtos (AG). La fase de agricultura contempló diferentes sistemas de labranza (siembra directa, SD, labranza vertical, LV y labranza convencional, LC), excepto en los ELD Quilamapu (Chile) y Las Breñas (Argentina) que se encuentran bajo LC. En algunos casos, se compararon tratamientos

fertilizados (F) y no fertilizados (NF). Los sistemas AG incluyeron pasturas temporarias (PT) dentro de la secuencia de cultivos y, en algunos casos, el uso de abonos verdes. Los ensayos de El Batán (Méjico), Pergamino y Las Breñas (Argentina) fueron analizados exclusivamente bajo AC mientras que los correspondientes a La Estanzuela y Paysandú (Uruguay), Quilamapu (Chile) y Balcarce y Bordenave (Argentina) incluyeron tratamientos tanto de AC como de AG. Los ELD elegidos poseen registros de rendimientos de cultivo, variables climáticas y edáficas (textura, COS y DAP) para el período de tiempo considerado. ANEXO XX

### Descripción y Comportamiento del Modelo AMG

El modelo AMG forma parte del modelo de simulación suelo-planta STICS. Su funcionamiento es de paso anual y asume que la materia orgánica fresca es en parte humificada en el suelo o descompuesta. Se consideran 3 compartimentos: residuos de cultivos y fracción de COS estable y activo. El mismo permite obtener una muy buena predicción de la evolución de COS viejo (reserva de COS al momento de inicio del cambio de uso o manejo del suelo) y de COS joven o activo (reserva de COS derivada del nuevo uso o manejo del suelo) con una estimación simultánea precisa de sólo tres parámetros (coeficiente de humificación,  $k1$ , coeficiente de mineralización de la fracción activa,  $k$ , y carbono estable,  $C_e$ ).

Para simular la evolución del COS en los ELD considerados, se utilizó el modelo AMG descriptivo de la evolución de COS (Figura 5).

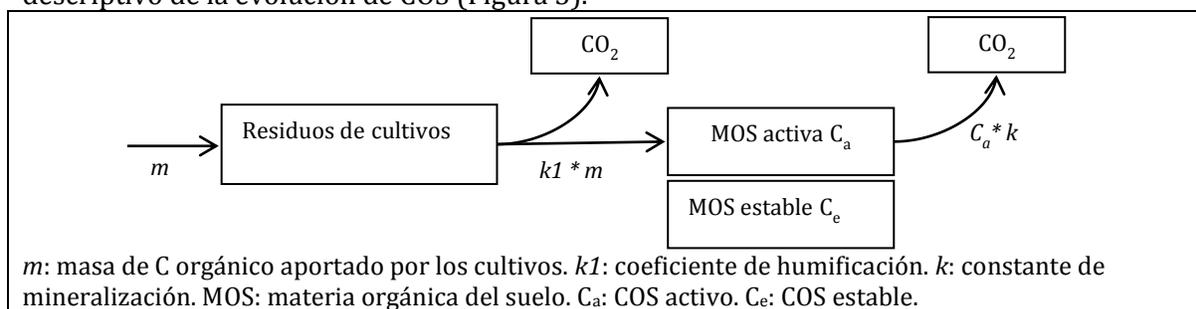


Figura 5. Diagrama del modelo AMG.

Para evaluar la calidad de ajuste del modelo sólo se utilizó en este informe el indicador RMSE. Los valores medios de RMSE variaron entre 0,9 y 6,5 Mg C ha<sup>-1</sup>. Los RMSE cercanos a 6 Mg C ha<sup>-1</sup> se correspondieron con las reservas de COS más elevadas (Balcarce y Quilamapu) mientras los que variaron entre 2 y 4 Mg C ha<sup>-1</sup> lo hicieron con las reservas inferiores (Paysandú y El Batán). El funcionamiento del modelo fue superior en los ELD en donde las fuentes de variación dentro de los tratamientos están mejor controladas (posición en el paisaje, estimación de la erosión, variación textural, continuidad de muestreo).

### Principales Tendencias Encontradas

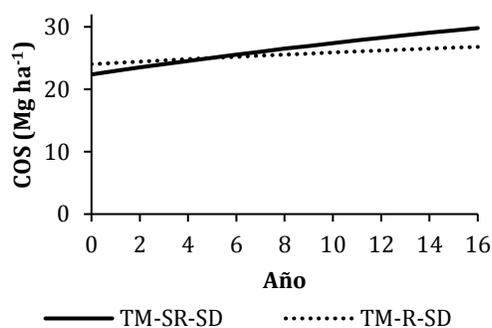
La mayoría de los ELD se iniciaron con reservas grandes de COS en el horizonte superficial (A), en relación a las zonas ecológicas en las que se implementaron. La mayoría de las alternativas de manejo de suelos aplicadas tendieron disminuir el COS con el paso del tiempo (~20-40 años).

Los resultados fueron diferentes cuando las tendencias se analizaron en el tiempo de calibración/validación (este período fue, en general, de una duración inferior a la duración total de los ELD): No queda claro si los resultados son del modelo o de datos reales

1. Bajo situaciones de AC, las reservas disminuyeron (Quilamapu, Balcarce, Paysandú, Pergamino y Las Breñas), se mantuvieron constantes (Bordenave, La Estanzuela) o aumentaron (El Batán).

2. En los ELD que incluyen tratamientos AG hubo tendencias dispares en el COS: disminución en suelos ricos, Quilamapu y Balcarce, ya sea sin o con exportación de forraje, respectivamente y mantenimiento o aumento de las reservas en La Estanzuela 1 y 2.
3. En relación al tipo de laboreo, en Pergamino hubo una menor disminución de las reservas de COS bajo SD solamente cuando no hubo monocultivo, mientras en El Batán el aumento de las reservas fue similar en ambos sistemas de labranza.
4. En Balcarce la fertilización nitrogenada no produjo aumento de las reservas de COS tanto en AC como en AG y fue independiente del sistema de labranza, mientras que en Quilamapu no se observaron diferencias entre las diferentes tasas de fertilización consideradas.

Durante el período de calibración/validación, las tendencias encontradas en los ELD respondieron a las mismas razones: en El Batán, pudo demostrarse que la intensificación agrícola es una tecnología con capacidad para revertir un elevado nivel de degradación ( $24,8 \pm 2,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) para los primeros 20 cm de profundidad de suelo. Esta elevada tasa de captura de COS está asociado a dos causas complementarias: por un lado, una reserva de COS activo muy baja ( $1\text{-}2 \text{ Mg COS ha}^{-1}$ ) y por otro, una baja tasa de mineralización de la fracción activa, determinada por el elevado contenido de arcilla expandible ( $350 \text{ g kg}^{-1}$  de suelo) y la temperatura media anual propia de un clima templado ( $14 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



TM-SR-SD: trigo-maíz sin remoción de los residuos de cosecha bajo siembra directa. TM-R-SD: trigo-maíz sin remoción de los residuos de cosecha bajo siembra directa. Figura 6. Evolución de las reservas de COS para la secuencia trigo-maíz bajo siembra directa con y sin remoción de los residuos de cosecha en el El Batán (Méjico).

Los ELD que mantuvieron sus reservas fueron aquellos en donde los aportes de C provenientes de las secuencias de cultivo compensaron las pérdidas por oxidación biológica del COS lábil presente en el inicio del análisis de las secuencias. Dichos aportes medios fueron de  $2,4$  y  $3,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para Bordenave y La Estanzuela, respectivamente. Además, los suelos se encuentran en la situación de equilibrio. Fue imposible mantener las reservas orgánicas de suelos muy ricos a ricos en COS lábil. Así, en Quilamapu (Figura 7a), aún el aporte medio más elevado ( $4,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), obtenido con la máxima tasa de fertilización, no resultó suficiente para mantener  $156 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , pero llegó a un valor de equilibrio de  $128 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Esto puede resultar paradójico, pensando en un contenido de arcillas de  $105 \pm 7 \text{ g kg}^{-1}$  de suelo. En estos suelos existe una pérdida significativa de COS bajo cualquier planteo agropecuario. De hecho, se necesitaría un aporte medio de  $20 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para mantener la reserva de COS inicial.

En Balcarce, los aportes, tanto en AC como en tampoco pudieron mantener las reservas iniciales de COS. Tras un período de 12 años, la AC provocó una caída promedio en las reservas de 12,5% mientras que en AG esta pérdida fue de 20,8% luego de 30 años (Figura 7b). A pesar que las condiciones edafoclimáticas ( $\sim 13,8^{\circ}\text{C}$  y  $231 \text{ g Kg}^{-1}$  de arcilla en el horizonte A) junto con planteos de SD reducen la tasa de mineralización ( $k = 0,06 \text{ año}^{-1}$ ), continúa la misma tendencia debido a que la elevada reserva de C lábil no puede ser compensada con los aportes provenientes del manejo.

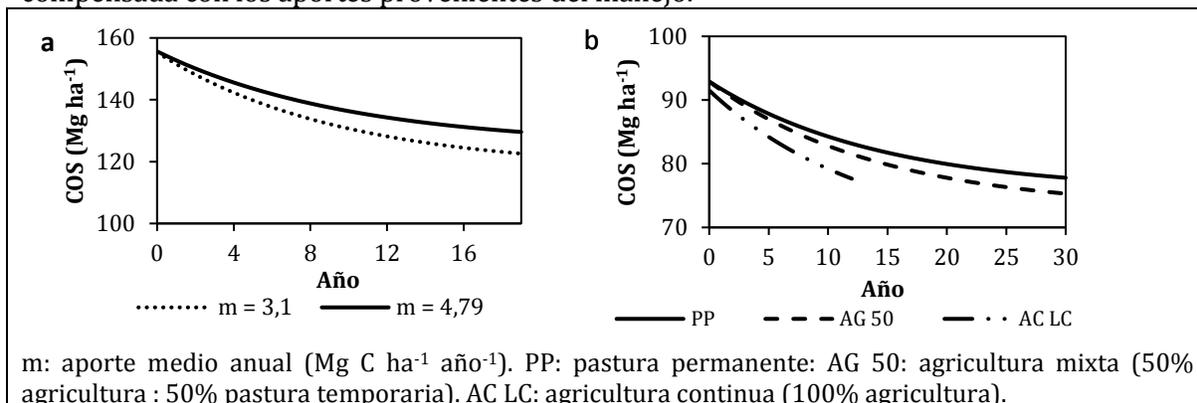


Figura 7. Evolución del carbono orgánico del suelo (COS) para dos aportes contrastantes en el ELD Quilamapu (a) y para cuatro frecuencias de ciclos de cultivos-pasturas en el ELD Balcarce (b).

En los suelos ricos a muy ricos del ELD de Paysandú ( $54 \text{ Mg COS ha}^{-1}$  en el espesor de 0-20 cm) se registró una disminución para las ca. dos décadas analizadas (Figura 8).

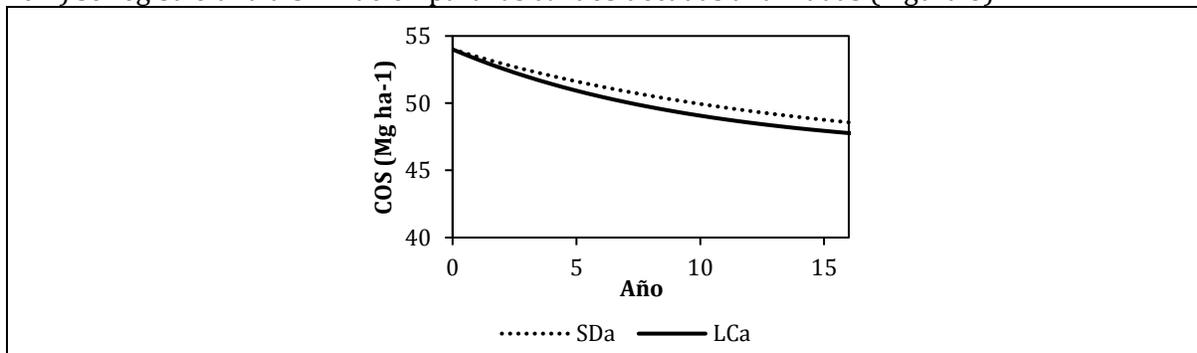


Figura 8. Evolución del carbono orgánico del suelo (COS) para una rotación de cultivo bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en el ELD de Paysandú.

En los suelos ricos de Pergamino, secuencias con intensidades de 1,5 y 2 cultivos por año y con aportes medios de  $5,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , fueron insuficientes para mantener reservas de 45 a  $50 \text{ Mg COS ha}^{-1}$ . Actualmente, se dispone de tecnología (SD más secuencias de cultivo intensificadas: T/S o M-T/S) que con aportes de  $6,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en suelos relativamente ricos en COS pueden mantener reservas de  $44 \text{ Mg COS ha}^{-1}$ ; también la misma tecnología con aportes medios de  $4,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  pueden mantener reservas de  $40 \text{ Mg COS ha}^{-1}$  (Figura 9).

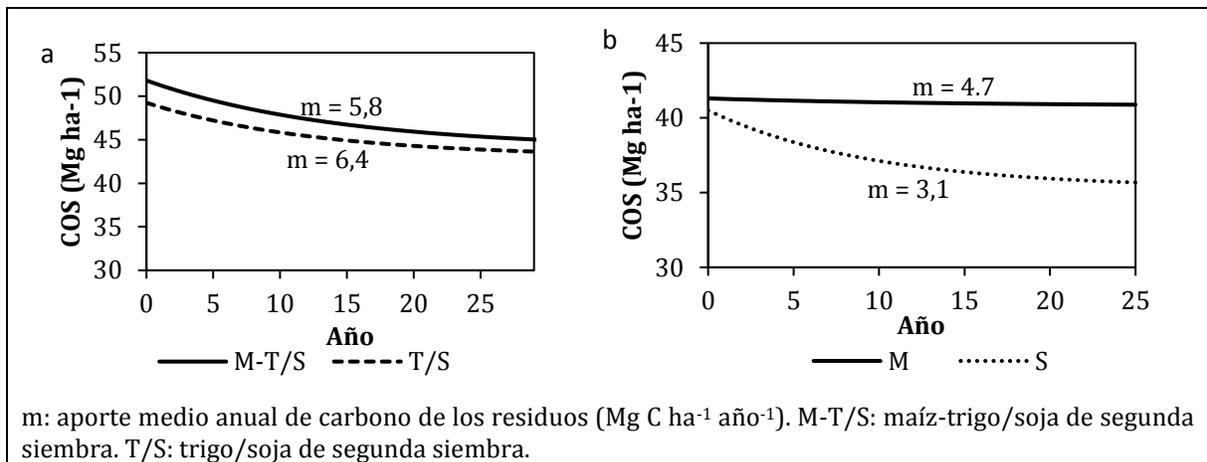


Figura 9. Evolución de las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) para cuatro secuencias de cultivo bajo siembra directa (SD) en los ELD de Pergamino.

En La Estanzuela, tanto en AC como en AG, con y sin presencia de erosión (LE1), aportes medios desde  $3,3 \pm 0,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  mantuvieron las reservas de COS de suelos medianamente ricos en fracción lábil bajo LC. En AC se mantuvo la reserva de COS entre sistemas de labranza, dado que bajo SD un menor aporte medio de C está compensado por una menor pérdida por oxidación de la COS lábil en relación a LC. En AG bajo SD, el ciclo de agricultura posterior al de pastura se caracterizó por una menor oxidación de la fracción lábil con respecto a LC. Este efecto se repitió a lo largo de los ciclos, provocando el aumento de la reserva de COS (Figura 10). En presencia de erosión (LE2), aún bajo LC, la inclusión de pasturas en la rotación condujo a un aumento de la reserva de COS, el cual puede ser explicado por una mejora en la productividad de los cultivos, atribuida a mejoras en las propiedades edáficas relacionadas con la fertilidad y la reserva de agua.

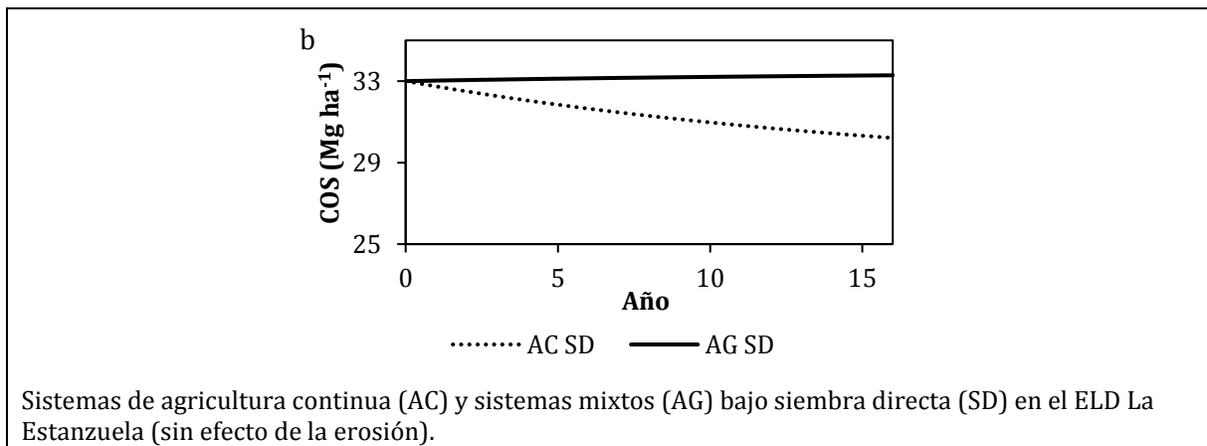
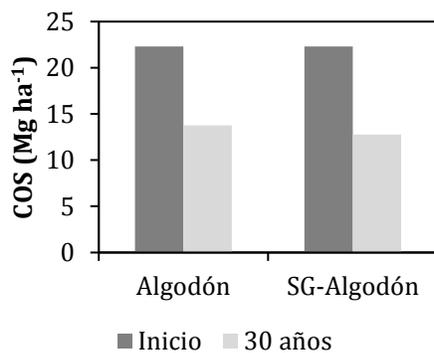


Figura 10. Evolución del carbono orgánico del suelo (COS) en diversos sistemas.

Por último, en Las Breñas no se pudo aplicar el modelo, debido a la falta de datos para realizar la calibración/validación. Sin embargo, el hecho de contar con los valores de reserva de COS de 1979 y de 2008 para dos secuencias de AC, permitió calcular su variación (Figura 11). En este ELD, se registró la mayor pérdida de COS (38% en 30 años, pero probablemente 30% en los primeros 10 años) de todos los ELD considerados. Las Breñas representa una situación paradigmática debido al cambio del régimen térmico del suelo (temperatura media anual  $21^\circ\text{C}$ ) desde térmico a hipertérmico (la isoterma anual de  $20^\circ\text{C}$  marca dicho cambio), el cual

causa un aceleramiento del tiempo de reciclado de la fracción activa del COS y deja al descubierto la fragilidad (vulnerabilidad) de este agrosistema. Además, en esta zona se está produciendo un cambio muy acelerado en el uso de la tierra, pasando de pastizales y bosques nativos a AC bajo el sistema de monocultivo de soja, por lo cual, determinar el tamaño de la fracción estable, responsable de la retención de agua y nutrientes, resulta de vital importancia en la comprensión de su rol en el funcionamiento de este nuevo agrosistema.



SG: secuencia sorgo granífero - algodón.

Figura 11. Variación del carbono orgánico del suelo en para dos secuencias de cultivo del ELD Las Breñas.

### Escenarios Futuros

Con el objeto de anticipar las tendencias medias de las reservas de COS en las diferentes zonas ecológicas se proyectaron escenarios agronómicos, teniendo en cuenta los usos y manejos actuales y sus posibles cambios. Se eligió un período de 30 años para analizar la magnitud de los efectos de dichos cambios. Como situación de partida se tomaron en cuenta los tratamientos de los ELD con reservas de COS actuales contrastantes.

Se presentan a modo de ejemplo los escenarios y tendencias obtenidas en el Batán. La continuidad de la rotación de cultivos trigo - maíz bajo SD sin remoción de residuos, en un suelo muy degradado, seguirá provocando aumentos decrecientes en las reservas de COS y, este aumento, será minimizado en caso de retirarse los residuos de los cultivos o de practicarse LC. Se espera un aumento de la calidad del suelo, particularmente cuando la práctica de la SD se realice sin remoción de residuos (Figura 12).

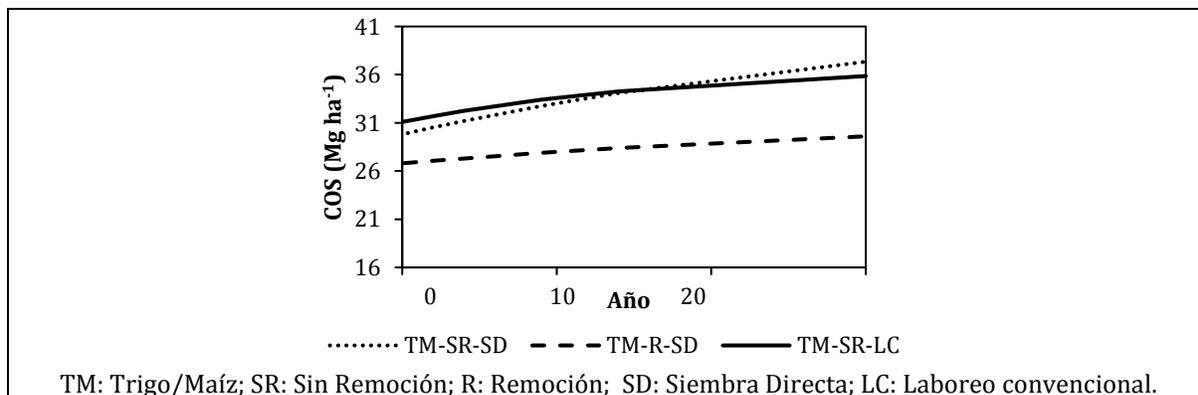


Figura 12. Evolución de las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) para la secuencia trigo-maíz bajo siembra directa con y sin remoción de los residuos de cosecha en el ELD El Batán (Méjico).

#### **CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES:**

- La herramienta de modelización utilizada para simular la tendencia media de las reservas de COS pudo adaptarse a la gran diversidad edafoclimática presente en las diferentes zonas ecológicas.
- En general, la agricultura pasada condujo a importantes disminuciones de las reservas de COS con significación variable según la zona ecológica.
- Existe tecnología con capacidad para disminuir la pérdida de COS en suelos ricos y muy ricos y para mantenerla o aumentarlas en suelos medianamente ricos y pobres.
- Si bien el proceso de degradación de COS puede revertirse, el de agradación es asimétrico respecto al primero y dicha asimetría es menor cuanto menor es el grado de degradación.
- Entre las tecnologías disponibles para revertir el proceso de degradación se encuentran la intensificación de las secuencias de cultivo, la inclusión de pasturas temporarias y verdes, el laboreo conservacionista (particularmente la SD) y la fertilización. El resultado de la interacción entre éstas depende de la zona ecológica.
- Es necesario profundizar estudios para mejorar el funcionamiento del modelo sobre: a) la caracterización de la fracción estable, dada la existencia de elevada variabilidad en la composición mineralógica de la fracción arcilla; b) la inclusión del proceso de erosión hídrica y eólica; y c) el ajuste de los coeficientes de humificación y mineralización para los períodos de pastura y su manejo (pastoreo, corte, clausura).

#### **V. ESCENARIOS CLIMÁTICOS <sup>15</sup>**

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 trabajo 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 normal.

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). En el ambiente climático “mas húmedo” o en el “mas seco” no solamente cambian las precipitaciones, sino que en forma asociada cambian las temperaturas y la radiación solar. Para generar esos dos tipos de ambiente se trabajó con 100 series sintéticas de 100 años cada una consistente en datos diarios de temperatura máxima, mínima, precipitación y radiación solar.

---

<sup>15</sup> Rodriguez G. ANEXOS 3., 3. I, 3. II, 3. III y 3. IV

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 13 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%.

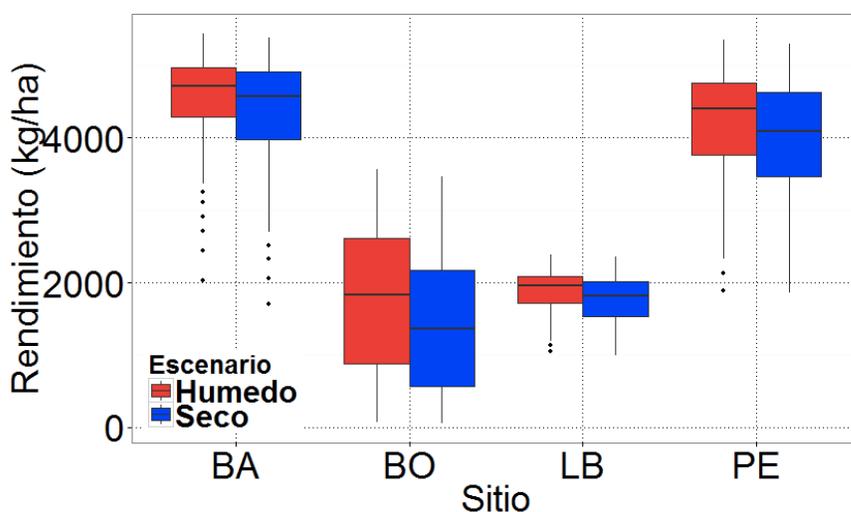


Figura 13: rendimientos simulados para el cultivo de trigo en las localidades de Balcarce (BA), Bordenave (BO), Las Breñas (LB) y Pergamino (PE) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (rojo) y secos (azul).

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 14).

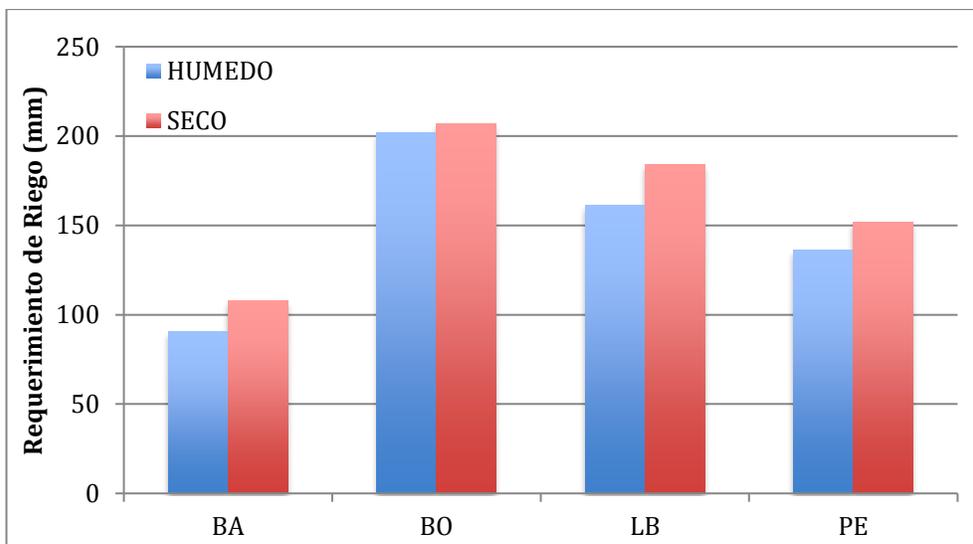


Figura 14: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Trigo.

### 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 15) 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

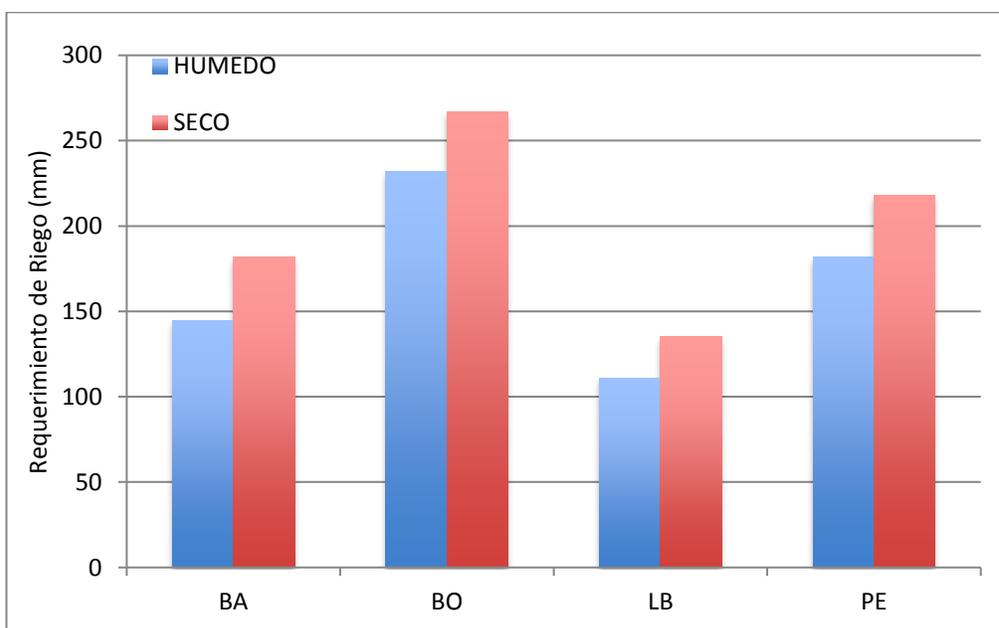


Figura 15: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Maíz.

### 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 16). La variabilidad de los rendimientos es más alta en los escenarios secos, esta diferencia puede alcanzar al 27% en el caso de Balcarce .

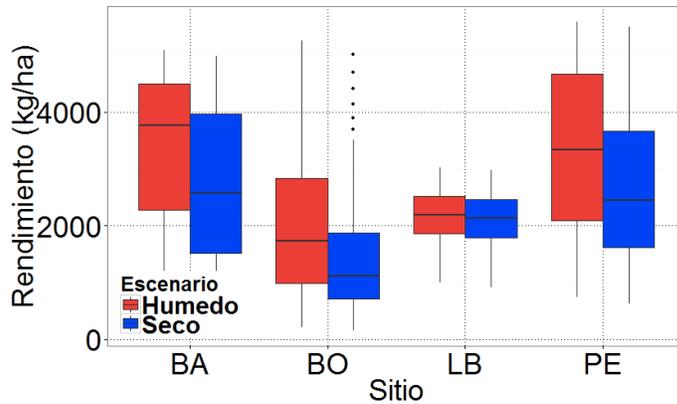


Figura 16: rendimientos simulados para el cultivo de Soja en las localidades de Balcarce (BA), Bordenave (BO), Las Breñas (LB) y Pergamino (PE) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (rojo) y secos (azul).

El requerimiento de agua suplementaria en el cultivo de soja oscila entre los 108 mm y 278 (figura 17). 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.

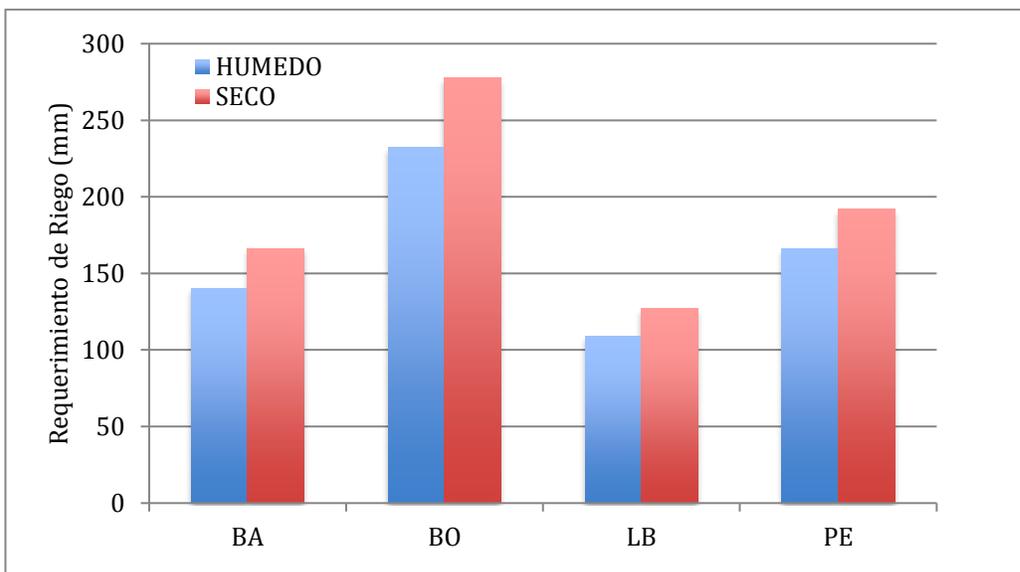


Figura 17: Requerimiento de agua para los escenarios Húmedos y Secos en las 4 estaciones de Argentina para el cultivo de Soja.

## 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 18). 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 .

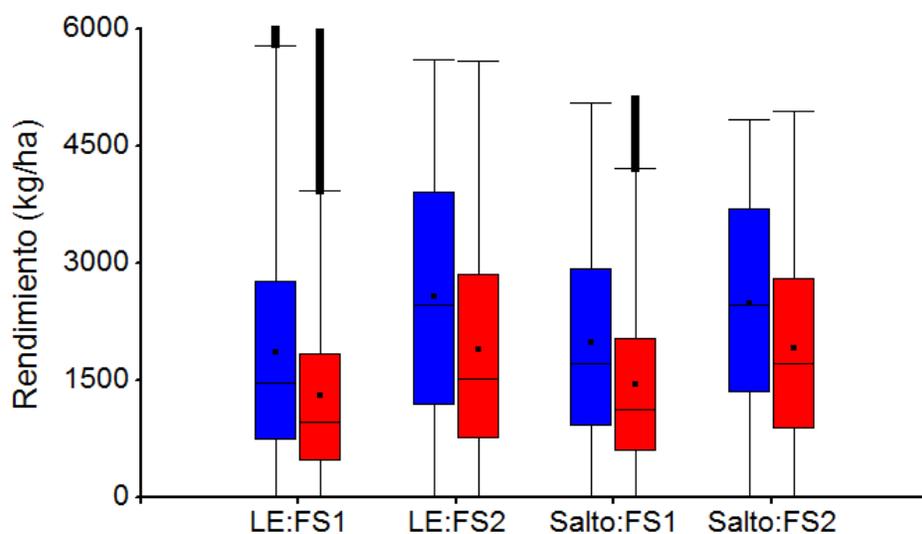


Figura 18: Rendimientos simulados para el cultivo de Soja, en las localidades La Estanzuela (LE) y Salto, dos fechas de siembra (FS1 y FS2) para los escenarios correspondientes a ciclos húmedos (azul) y secos (rojo).

## Consideraciones Finales sobre Escenarios

Este estudio exploratorio acerca del comportamiento productivo en escenarios climáticos de más o menos precipitación de lo normal tiene el propósito de orientar una cuantificación primaria de la posible respuesta a la disponibilidad hídrica, considerando la gran importancia de esta variable en la productividad. Operan en estos modelos múltiples variables y sus interacciones sin tener en cuenta otras restricciones bióticas (malezas plagas y enfermedades) que complejizarían aun más los resultados esperados.

Sin embargo, la simulación empleada muestra las grandes diferencias de potenciales productivos de los ambientes, coincidente con los registros reportados en los capítulos precedentes. Contribuye asimismo a generar valiosos indicadores del riesgo productivo en función de la variabilidad de los ambientes climáticos registrados en las últimas décadas.