

ZONAS AGRÍCOLAS EN EXPANSIÓN: DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

**Proyecto FPTA- 283. Zonas agrícolas en expansión:
desarrollo de herramientas para un manejo sustentable
de los sistemas de producción
Calibración, validación y aplicación de un modelo
modelos de simulación de rendimientos de cultivos**

Responsable del Proyecto: Oswaldo Ernst*

Equipo de trabajo: Sebastián Mazzilli.
Ing.Agr., Dpto. Producción Vegetal, Facultad de Agronomía. Universidad de la
República

Armen Kemanian
Texas AgriLife Blackland Research and Extension Center in Temple

*Ing. Agr., Dpto. Producción Vegetal, Facultad de Agronomía. Universidad de la República

Título: ZONAS AGRÍCOLAS EN EXPANSIÓN: DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Responsable del Proyecto: Oswaldo Ernst

Equipo de trabajo: Sebastián Mazzilli,
Armen Kemanian

Serie: FPTA N° 50

© 2013, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA

Andes 1365, Piso 12. Montevideo - Uruguay
<http://www.inia.org.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Impreso en Editorial Hemisferio Sur S.R.L.
Buenos Aires 335
Montevideo - Uruguay

Depósito Legal 362-986/13

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

Ing. Agr., MSc., PhD. Álvaro Roel - Presidente
D.M.T. V., PhD. José Luis Repetto - Vicepresidente



D.M.V. Álvaro Bentancur
D.M.V., MSc. Pablo Zerbino



Ing. Agr. Joaquín Mangado
Ing. Agr. Pablo Gorriti





FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18º de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 40/00 del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.

b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.

c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos. De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

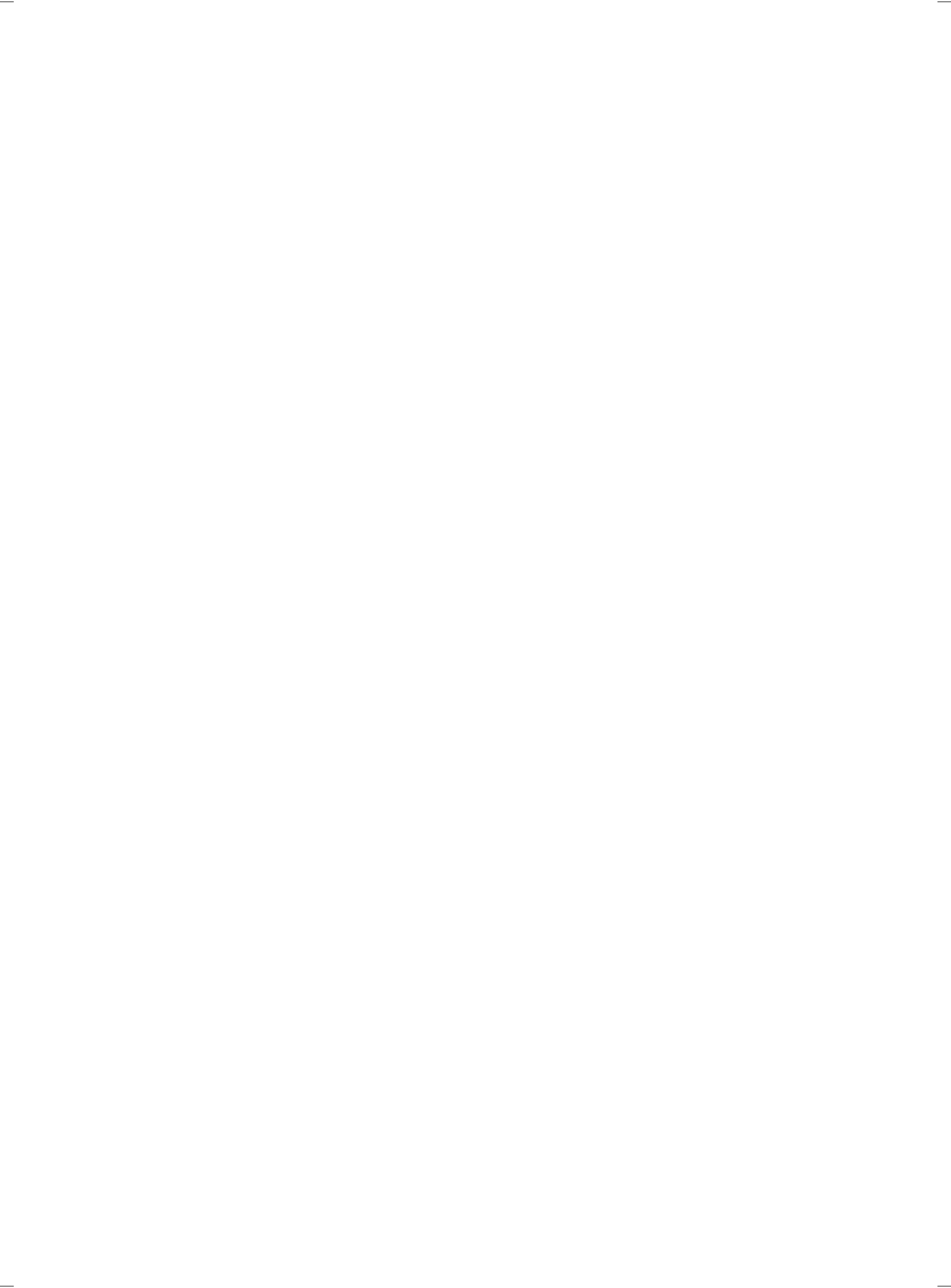
A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.



CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION...	9
2. ANTECEDENTES	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Características generales de los ensayos.....	10
3.2. Diseño experimental y manejo de los experimentos.....	11
3.3. Determinaciones	11
3.3.1 En el suelo	11
3.3.2 Durante el ciclo del cultivo	11
3.4. Condiciones climáticas	12
3.6. Modelo utilizado y metodología de trabajo	12
4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL MODELO	13
4.1. Información utilizada en las simulaciones	13
4.1.2 Cultivos y manejo	13
4.1.1 Bases climáticas.....	13
4.1.3 Separación de tipos de años de acuerdo al régimen hídrico	14
4.2. Efecto ENSO	14
4.2.1 Resultados para trigo.....	14
4.2.2 Resultados para maíz	16
4.2.3 Resultados para soja	19
5. RENDIMIENTO ALCANZABLE SEGÚN ZONA DE PRODUCCIÓN	22
6. CONSIDERACIONES FINALES	25
7. APÉNDICE	27
8. BIBLIOGRAFÍA	32



Sebastian Mazzilli*
Gonzalo Ferreira*
Oswaldo Ernst*

*Departamento de Producción Vegetal,
Facultad de Agronomía. Universidad
de la República

Zonas agrícolas en expansión: desarrollo de herramientas para un manejo sustentable de los sistemas de producción

Proyecto FPTA 283

Período de Ejecución: Feb. 2009-Ene.2012

1. INTRODUCCIÓN

La superficie afectada a la producción de cultivos anuales en Uruguay crece continuamente desde el año 2002, lo que resulta de dos procesos: intensificación en el área agrícola tradicional (litoral oeste), y expansión hacia nuevas zonas. El nuevo escenario agrícola se desarrolla, en zonas con condiciones agroecológicas diferentes a las tradicionales, en fertilidad natural de los suelos, topografía y drenaje. Estas diferencias hacen presumir que las secuencias de cultivos a integrar en cada zona y tecnologías asociadas a su producción, deberían ser generadas para cada una de ellas. Esto plantea el desafío de generar información en cantidad y velocidad no compatibles con el enfoque tradicional de la investigación agrícola, y herramientas para evaluar a priori la factibilidad de producción de los cultivos, los rendimientos probables, su variabilidad con las condiciones de clima y suelo, y el impacto sobre la calidad del suelo en el mediano plazo.

Los modelos de simulación de cultivos son una síntesis del conocimiento actual, transformada en expresiones matemáticas. Son utilizados para describir y predecir a nivel de predio, el comportamiento suelos-cultivo en una amplia gama de ambientes y condiciones de manejo. El resultado de un cultivo, no solo varía con su manejo, sino que es modificado por las condiciones de suelo y clima. Por otro lado, los cambios en la fertilidad del suelo están ligados a la producción de biomasa (aérea y subte-

rránea) del sistema y ésta está definida por tipo de cultivo, su rendimiento y tecnologías de producción asociadas. Los modelos de simulación de cultivos permiten analizar en forma conjunta estos efectos e incorporar la variabilidad climática y de suelo en el estudio del comportamiento de las secuencias de cultivos, mejorando así la toma de decisiones.

La evaluación experimental de sistemas de producción sostenibles implica el diseño y mantenimiento de experimentos de largo plazo, de alto costo, y que requieren de tiempo para generar información válida y aplicable a condiciones de ambiente variable. La agricultura en nuevas zonas de producción en Uruguay, enfrenta el desafío de desarrollarse sin la existencia de información local que permita diseñar secuencias de cultivos, su manejo y que consideren el efecto sobre la calidad del suelo. Los modelos de simulación de cultivos pueden aplicarse para realizar predicciones acerca de las consecuencias agronómicas, ambientales y económicas de complejas interacciones entre manejo de cultivo, suelo y atmósfera (Bellochi *et al.*, 2002; Sadras, 2002; Monzon *et al.*, 2006). Calibrados y validados localmente, son herramientas útiles para levantar las restricciones planteadas, ya que el proceso es relativamente más corto y permiten incorporar la valoración del riesgo asociado a la variabilidad de ambientes, clima y precios.

En este trabajo se presentan resultados de la calibración y validación del

modelo de simulación de cultivos CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) realizado durante los años 2009-2012 y ejemplos de aplicación para distintas condiciones de clima y suelo de Uruguay.

2. ANTECEDENTES

La generación de modelos de simulación de cultivos se justifica por tres razones primarias: i) síntesis del conocimiento actual; ii) ayuda a la toma de decisiones de manejo de cultivos; iii) análisis de políticas (Boote *et al.*, 1996). A esto se agrega la posibilidad de utilizarlos para la prueba de hipótesis de investigación o para detectar limitantes de información que aún no está generada. Calibrados y validados para una región resultan en una poderosa herramienta de apoyo a la investigación, a la enseñanza y a la toma de decisiones tácticas y estratégicas en producción de cultivos (Sinclair and Seligman, 1996).

Los primeros modelos de simulación de crecimiento de cultivos están disponibles desde 1970' (de Wit *et al.*, 1970; Arkin *et al.*, 1976). Aplicaciones orientadas a la toma de decisiones de manejo (riego, fecha de siembra, control de plagas) se hicieron disponibles a partir de 1980' (Swaney *et al.*, 1983; Wilkerson *et al.*, 1983). Por su parte modelos como los de la familia CERES (Ritchie *et al.*, 1998) y CROPGRO (Boote *et al.*, 1998) tuvieron un significativo impacto en la simulación de cultivos (Stöckle *et al.*, 2003).

En la actualidad se dispone de muchos modelos de simulación de sistemas de producción de cultivos (CERES y CROPGRO, APSIM y CropSyst), que tienen como objetivo evaluar alternativas de manejos y secuencias de cultivos. CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) y APSIM (McCown *et al.*, 1996) fueron diseñados para estudiar efectos del ambiente, rotación y manejo sobre la productividad de los cultivos de la rotación. Ambos persiguen un balance entre la ciencia y el adecuado diseño del software.

En Uruguay se han realizado esfuerzos aislados para el ajuste y validación de modelos de simulación (Tavella, 1994; Romero, 1996; Sawchik, 1996) todos utilizando la carcasa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Trans-

fer) y en ninguno de ellos se contemplaron rotaciones de cultivos, solo se han analizado cultivos aislados.

CropSyst (Cropping system simulation model) es un modelo de simulación de cultivos de paso diario y permite el uso con rotaciones de cultivos. Tiene una carcasa de uso que es amigable y es de libre distribución. Este modelo fue diseñado para servir como herramienta analítica para estudiar el efecto del ambiente, del sistema de rotación y el manejo sobre la productividad de los cultivos que integran la rotación (Stöckle *et al.*, 1994). El desarrollo de CropSyst comenzó en los 1990' y la motivación estuvo basada en la detección de un nicho en la demanda de modelos de simulación, particularmente en aquellos que consideraran la rotación de cultivos (Stöckle *et al.*, 2003).

La evaluación de los modelos convencionalmente se realiza comparando la salida generada, con datos reales que representan el sistema simulado. Para ello debe seleccionarse un indicador cuantitativo para medir la performance del modelo, tomando pares de valores simulado-observado. Los estadísticos más utilizados son el Cuadrado Medio del Error (su sigla en inglés, RMSE), el cociente entre los el RMSE y la media observada así como el ajuste de los pares de datos entorno a la línea 1:1.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características generales de los ensayos

Para la calibración y validación del modelo se sembraron ensayos parcelarios de cebada, trigo, maíz, soja y sorgo en la Estación Experimental Mario. A. Cassinoni (EEMAC) durante dos zafas consecutivas (2010-2011). Cada ensayo incluyó dos cultivares por cultivo en tres fechas de siembra. Para el proceso de validación además de los datos parcelarios de uno de los años, se utilizaron datos relevados en chacras comerciales de producción distribuidas en distintas zonas del país y resultados de experimentos sembrados con otros fines, pero en los cuales se recabó información suficiente como para participar del proceso de validación.

3.2. Diseño experimental y manejo de los experimentos

El tamaño de parcelas fue 6 x 30 m, ubicadas a favor de la pendiente, de forma de que el mismo cultivo estuviera en distintas posiciones topográficas en cada fecha de siembra. Los ensayos realizados para la calibración del modelo estuvieron ubicados en la EEMAC (32° 22.89'S 58° 3.26''), mientras que los utilizados para la validación, en chacras comerciales del Departamento de Durazno y en las cercanías de Tacuarembó, sobre Ruta N° 26.

Se calibraron y validaron dos cultivares por especie (Cuadro 1), los que fueron seleccionados por su ciclo a madurez fisiológica diferente y, dentro de estos, por su comportamiento agronómico en los ensayos de evaluación del cultivares. Los cultivos se mantuvieron libres de plagas, malezas y enfermedades, fertilizados como para que no tuvieran restricciones nutricionales de N y P, de manera de que los rendimientos sólo se modificaran en respuesta a modificaciones en la disponibilidad hídrica, radiación y temperatura.

3.3. Determinaciones

3.3.1 En el suelo

Al inicio de cada periodo experimental en cada sitio de muestreo se tomaron muestras de suelo del todo el perfil (0-5,

5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 y 70+) para estimar textura (Bouyoucos, 1936), materia orgánica (Walkley y Black, 1934) y densidad aparente para cada parcela, información que es requerida para utilizar el modelo.

Con la información de textura y materia orgánica por horizonte, se estimó el agua disponible a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PPM) utilizando las ecuaciones propuestas por (Saxton y Rawls, 2006). En el Apéndice 1 se presentan las características de los suelos utilizados para la calibración, validación y aplicación del modelo.

3.3.2 Durante el ciclo del cultivo

Semanalmente se registró la fenología de los cultivos utilizando las escalas más adecuadas según la especie. En cuatro momentos del ciclo de los cultivos se hicieron evaluaciones a nivel de suelo como agua y nitrógeno disponible en todo el perfil (siembra, V6, R1 y cosecha para cultivos de verano y siembra, Z 22, Z 30 y cosecha para cultivos de invierno). En los mismos momentos (excluyendo la siembra) se realizaron estimaciones de biomasa, índice de área foliar (IAF) y nitrógeno acumulado y a cosecha además de la biomasa total, se estimó el rendimiento en grano y el nitrógeno total acumulado. En este trabajo sólo se presentan los resultados obtenidos para rendimiento en grano.

Cuadro 1. Cultivares seleccionados por cultivo y nutrientes agregados en cada zafra

Cultivo	Cultivar	N (kg ha ⁻¹)	Dosis P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)
Trigo	INIA Don Alberto Nogal	119	69
Cebada	INIA Arrayan Carumbé	110	69
Soja	A 6411 DM 5.5i	15	75
Maíz	MASS 494 MG DK 670 MG	107	75
Sorgo	MS 102 MS 109	107	75

3.4. Condiciones climáticas

Los datos climáticos para los ensayos de la EEMAC y sitios cercanos fueron obtenidos de la estación automática instalada en dicha estación, para los sitios cercanos a Durazno se utilizó información de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) específicamente de la estación ubicada en el aeropuerto de Santa Bernardina y para los sitios cercanos a Tacuarembó se utilizó la información de la estación de INIA Tacuarembó. La información necesaria para correr el modelo es temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa máxima y mínima (%), radiación solar ($Mj\ m^{-2}\ día^{-1}$), precipitación diaria (mm) y velocidad del viento (m/s).

3.6. Modelo utilizado y metodología de trabajo

La versión de CropSyst utilizada fue la 4.15.17, de libre acceso, disponible en la página: <http://www.bsyse.wsu.edu/crop-syst>. Para el proceso de calibración del modelo se utilizaron los datos del año del

primer año de trabajo. La etapa de validación consistió en la comparación de los valores simulados por el modelo con los parámetros calibrados con resultados de observaciones de campo no utilizadas en el proceso de calibración, es decir con un conjunto de datos independiente.

La estimación del ajuste se realizó a partir tres herramientas, el gráfico de línea 1:1, el cálculo de la relación de la raíz del cuadrado medio del error, RCME (%) y el Índice de Ajuste (IoA) propuesto por Wilmot, (1982) (citado por Singh et al 2008) El primero consiste en un método de apreciación visual; el segundo evalúa la relación entre la raíz del cuadrado medio del error con la media observada para cada variable; el tercero relativiza el valor medio de la diferencia y varía entre 0 (no acuerdo) y 1 (acuerdo total). En el apéndice 3 se presentan las distintas ecuaciones utilizadas.

Calibración y validación por cultivos

En el Apéndice 3 se presentan los coeficientes resultantes de la calibración del modelo para cada cultivo y en el Cuadro 2, el ajuste entre rendimiento

Cuadro 2. Rendimiento medio obtenido por cultivo en los experimentos utilizados para la calibración, la validación y para el conjunto de datos e indicadores del ajuste entre rendimiento predicho con el modelo calibrado y el observado

Cultivo	Actividad	Rendimiento medio ($kg\ ha^{-1}$)		Ajuste*	
		Observado	Simulado	ReRCME (%)	IoA (%)
Trigo	Calibración	4364	4740	19	0,97
	Validación	4740	4582	21	0,98
	Combinado	4552	4560	20	0,97
Cebada	Calibración	4815	4544	25	0,97
	Validación	4249	4556	12	0,99
	Combinado	4680	4403	20	0,98
Maíz	Calibración	7208	7095	16	0,99
	Validación	5671	5555	28	0,89
	Combinado	6440	6325	22	0,94
Soja	Calibración	2336	2531	22	0,99
	Validación	3950	3843	11	0,97
	Combinado	3070	3127	17	0,98
Sorgo	Calibración	5915	6145	19	0,99
	Validación	6330	5600	19	0,97
	Combinado	6007	6038	19	0,98

*Ver Apéndice A3.

simulado y observado para los datos de la calibración y validación. Se presentan por cultivo y no por cultivar ya que no existieron diferencias entre estos.

Con la excepción del resultado obtenido para la validación en maíz, el RCME estuvo entrono al 20%, lo cual se considera como aceptable para el uso del modelo. En tanto, el IoA fue superior a 0,9%, por lo que se tiene una buena capacidad predictiva del valor absoluto medio del rendimiento de los cinco cultivos. Por tanto, es posible utilizar ésta herramienta para el objetivo planteado en el proyecto, que no es predecir el rendimiento para un sitio dado, sino planificar la asignación de cultivos y su tecnología de producción en función de las condiciones de ambiente esperado u ofrecido. Además, al valorar la variabilidad de los resultados posibles se incorpora la cuantificación del riesgo asociado a las mismas.

4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL MODELO

La variabilidad de rendimientos entre años es consecuencia de la variabilidad climática, principalmente en la cantidad y distribución de las lluvias, asociada a variaciones en temperatura y radiación solar. A esto se suma efectos indirectos asociados a las condiciones de humedad y temperatura como los son las enfermedades y plagas.

Con el modelo de simulación de cultivos Cropsyst calibrado para las condiciones de Uruguay es posible cuantificar el impacto de variaciones en las condiciones ambientales sobre el rendimiento alcanzable de los cultivos cuando no es afectado factores limitantes como la disponibilidad de nutrientes y por factores reductores como enfermedades, plagas y malezas. Como ejemplo de aplicaciones del modelo se discutirán dos situaciones.

1) El efecto esperado de una previsión de año «Niño», «Neutro» o «Niña» sobre el rendimiento alcanzable de trigo, maíz y soja

2) El efecto esperado sobre el rendimiento alcanzable de los mismos cultivos de la combinación clima - tipo de suelo definida por la zona de producción.

4.1. Información utilizada en las simulaciones

4.1.1 Bases climáticas

Se utilizaron bases de clima disponibles para las estaciones climáticas de INIA La Estanzuela, INIA Treinta y Tres, INIA Tacuarembó, INIA Salto y Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía en Paysandú. Se seleccionaron suelos con capacidad agrícola para cada una de las zonas de producción evaluadas tomando como referencia los Grupos de suelos CONEAT y la descripción de perfiles de suelo de la Carta de suelos (1:1.000.000). Las características de los suelos utilizados se detallan en el Apéndice 1 y la ubicación de los suelos en el país se detalla en el Apéndice 2.

4.1.2 Cultivos y manejo

Se utilizaron los coeficientes genéticos calibrados y validados para las condiciones locales que figuran en el Apéndice 3. Los resultados reportados corresponden al rendimiento alcanzable para las condiciones de clima y suelo de cada lugar cuando no existen limitaciones nutricionales ni factores reductores del rendimiento.

Se evaluaron 3 fechas de siembra por cultivo (Cuadro 3), ya que es una variable que a priori tiene capacidad de interactuar con las condiciones esperadas para el año porque cambia la ubicación temporal de los períodos críticos de definición del rendimiento. En el caso del trigo se cambió el cultivar al modificar la fecha de siembra, seleccionando uno de aquellos cultivares con mejor comportamiento para cada una de ellas. En tanto, para soja se consideró un cultivar del grupo de

Cuadro 3. Fechas de siembra simuladas por cultivo

Cultivo	Fechas de siembra		
	1	2	3
Maíz (DK 670)	10-sep	30-oct	15-dic
Soja G V (DM 5.1i)	20-oct	15-nov	15-dic
Soja G VI (A 6411)			
Trigo	5-may (Nogal)	10-jun (Don Alberto)	10-jul (Don Alberto)

madurez (GM) VI y uno del GM V, y en maíz se trabajó con el mismo cultivar para las 3 fechas de siembra.

4.1.3 Separación de tipos de años de acuerdo al régimen hídrico

Para separar distintos tipos de años se utilizó la clasificación ENSO (El Niño/Southern Oscillation). Este método fue redescubierto a fines de los 70s e inicio de los 80s y provee un indicador de anomalías probables para estos factores. De acuerdo a este fenómeno se separaron los años en tres situaciones esperadas:

Año «Niño»: Precipitaciones por encima de lo normal.

Año «Niña»: Precipitaciones por debajo de lo normal.

Año «Neutro»: Sin tendencia clara de precipitaciones.

La clasificación de los años se realizó en base a lo reportado por la Agencia Meteorológica Japonesa (JMO). El índice es calculado a partir de medias de anomalías de temperatura en el pacífico sur (4 °S-4 °N, 150 °W-90 °W). Si el valor del índice es 0,5 °C o mayor por 6 meses consecutivos (incluyendo el trimestre octubre, noviembre y diciembre), el año es considerado desde octubre hasta el próximo setiembre como «Niño», como la «Niña» cuando el valor del índice es

igual o menor que -0,5 °C, o «Neutro» para todas las otras alternativas. Por tanto, la calificación del año es en base a lo ocurrido en las temperaturas en el océano y no de acuerdo a lo que ocurrieron con las precipitaciones reales.

4.2. Efecto ENSO

En la Figura 1 se presenta la proporción de años cuyas características esperadas correspondieron a las de un año «Niña», «Neutro» y «Niño» para la serie histórica 1950 a 2011.

En la serie 1950-2011 un 24 % de los años son considerados con señal «Niño», el 24% como «Niña» y el restante 52% con señal «Neutro». Esto implica que en un 48% de las zafas se dispone de una previsión sobre anomalías en las precipitaciones esperadas para el período octubre-setiembre siguiente y que, por tanto, podría ajustarse el manejo de los cultivos en base a ellas.

4.2.1 Resultados para trigo

La combinación fecha de siembra-cultivar simulada ubica el período crítico de determinación del rendimiento del trigo (± 15 días en torno a la floración) entre el 10 de setiembre y el 10 de octubre (Figura 2).

El rendimiento medio alcanzable simulado de trigo para todas las fechas de siembra y localidades fue de 5050, 5477 y 6100 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación del 36, 24 y 21% para años «Neutro», «Niña» y «Niño» respectivamente. En la Figura 3 se presenta la distribución del rendimiento para el litoral oeste de Uruguay comprendido entre Colonia y Paysandú, considerando la combinación de fecha de siembra-cultivar explicitada en el Cuadro 2.

El efecto medio esperable por la previsión de un año «Niño» es de un incremento de aproximadamente 500 kg ha⁻¹ con relación a la de un año «Neutro» y la diferencia con relación a la de un año «Niña» es de aproximadamente 750 kg ha⁻¹. Las diferencias son más importantes en el rango de rendimientos menores, ya que un rendimiento menor a 4000 kg ha⁻¹ fue simulado para el 30% de los años «Neutro», el 17% de los «Niña» y sólo 4% de los «Niño».

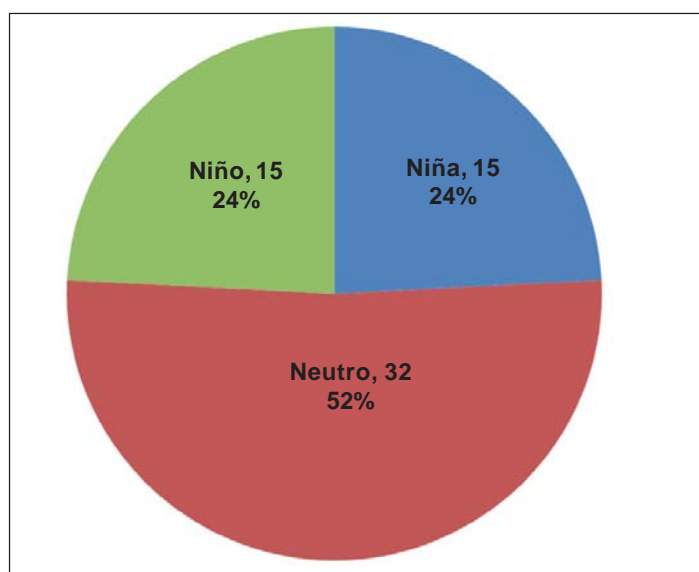


Figura 1. Años según ENSO (%) para América del Sur Serie 1950-2011. (Fuente: <http://coaps.fsu.edu/jma.shtml>)

Si bien el modelo no considera pérdidas de rendimiento determinadas por problemas sanitarios asociados a las precipitaciones, como la fusariosis de la espiga en trigo, para la combinación de fecha de siembra-cultivar simuladas, no se registró una asociación entre la predicción de año «Niño» y la ocurrencia de ésta enfermedad. El modelo propuesto por Moschini *et al.* (2001), validado para las condiciones locales por Mazzill *et al.*, (2011), considera que el riesgo de una epifitía de la enfermedad aumenta cuando ocurren más de 3 periodos con condiciones predisponentes (precipitaciones mayores a 0,2 mm, humedad relativa superior al 80% en un rango de temperaturas de 10 a 26 °C). Analizando la proporción de años con más de tres eventos de condiciones predisponentes, no se encontró asociación entre el riesgo de fusariosis de la espiga en trigo y la predicción de año «Niño» si la floración del cultivo ocurre desde fines de setiembre hasta fin de octubre, lo que sí ocurre para la floración de noviembre (Cuadro 4).

De acuerdo con estos resultados, la probabilidad de ocurrencia de pérdidas de rendimiento provocadas por fusariosis de la espiga en trigo en años con predicción de «Niño» se reduce si la floración ocurre durante el mes de octubre, principalmente, durante la primera quincena. El riesgo aumenta de 25 a 60% de los años si la floración ocurre durante noviembre en un año con características de «Niño». Por el contrario la probabilidad de fusariosis de espiga disminuye en la medida que la floración es más tardía para años «Niña» y «Neutro».

Si bien la fecha de siembra condicionó los rendimientos, el comportamiento fue independiente de la predicción del año en todas las zonas evaluadas. En la Figura 4 se presentan como ejemplos los resultados medios para Colonia y Tacua-rembó.

Con la consideración que la simulación corresponde a una combinación de fecha de siembra-ciclo-cultivar, el mayor rendimiento alcanzable correspondió a la siembra de mayo independientemente de la clasificación del año (según ENSO). Si bien los resultados también dan una idea de la interacción entre fecha de siembra-cultivar y año, esta no se explica por la

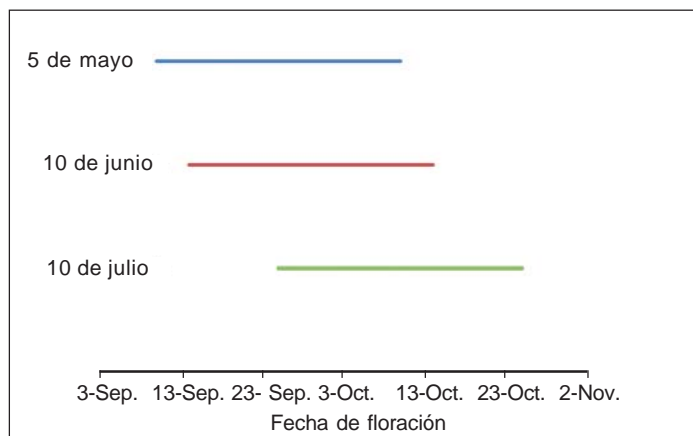


Figura 2. Ubicación del período crítico para la definición del rendimiento de trigo según fechas de siembra simuladas para la localidad de Paysandú.

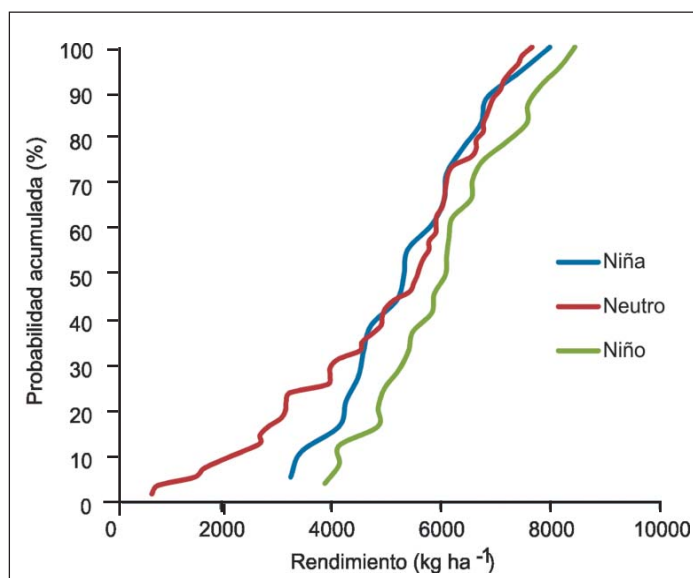


Figura 3. Distribución de rendimiento alcanzable de trigo según ENSO para el litoral oeste de Uruguay comprendido entre Colonia y Paysandú (1990-2011).

Cuadro 4. Porcentaje de años con más de 3 periodos predisponentes para fusariosis de la espiga en trigo según fecha de floración y ENSO (1990-2011 Colonia).

	% Años Con condiciones predisponentes	
ENSO	Octubre	Noviembre
Niña	50%	25%
Neutro	38%	23%
Niño	40%	60%

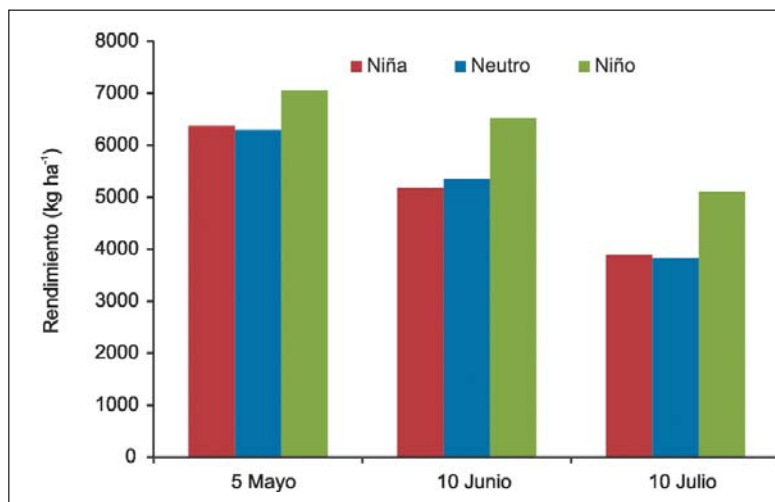


Figura 4. Rendimiento de trigo según la fecha de siembra y ENSO (Colonia 1990-20011).

condición predicha para el año evaluado. Por tanto, si al retrasar la fecha de siembra desde principios de mayo a mediados de julio se cambia el ciclo del cultivar, el efecto de esta variable de manejo sobre el rendimiento alcanzable esperado de trigo no se modifica en función de la previsión de la condición ENSO predicha para el año. Esto no implica que el efecto finalmente no sea importante para las condiciones que realmente ocurran, aunque sí fue muy importantes para el riesgo de fusariosis de la espiga.

4.2.2 Resultados para maíz

Las simulaciones evaluadas para maíz corresponden a 3 alternativas, dos de las cuales evalúan cambiar la fecha de siem-

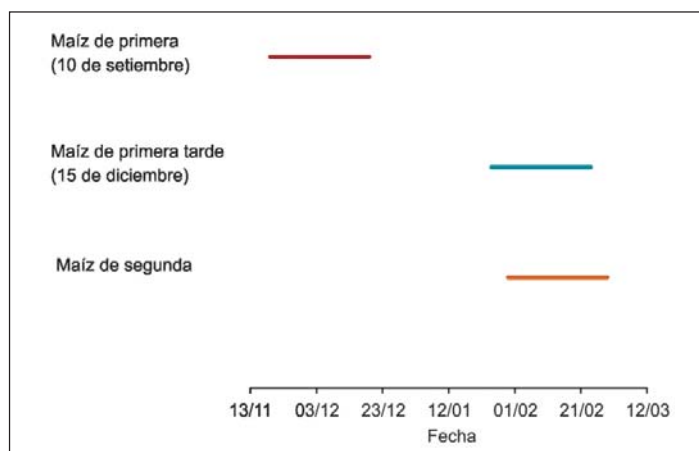


Figura 5. Ubicación de los períodos críticos para la definición del rendimiento de maíz para tres fechas de siembra de un mismo cultivar.

bra sobre barbecho invernal (maíz de primera) y una para la siembra de maíz inmediata a la cosecha de trigo (maíz de segunda). Estas fechas ubican el período crítico de definición del rendimiento (± 10 días en torno a la floración) en diciembre y febrero para siembra de setiembre y diciembre respectivamente (Figura 5).

Los rendimientos alcanzables para la serie 1990-2011 para el litoral oeste de Uruguay en todas las fechas de siembra evaluadas (Cuadro 3) se presentan en la Figura 6.

En los años calificados como «Niño» los rendimientos fueron mayores a los calificados como «Niña» y los «Neutro» tuvieron una ubicación intermedia. El rendimiento medio alcanzable para todas las fechas de siembra y localidades evaluadas fue de 5912, 3878 y 8211 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación de 39, 67 y 34% para años «Neutro», «Niña» y «Niño» respectivamente. Mientras que en el 65% de los años «Niño» el rendimiento alcanzable superó los 8000 kg ha⁻¹, sólo lo hizo en el 13% de los años «Neutro» y sería el techo de producción de un año con predicción de «Niña».

A diferencia de lo discutido para trigo, la fecha de siembra para maíz sobre barbecho de invierno tuvo un comportamiento esperado diferente según la predicción del año. Mientras que para los años «Niño» y «Neutro» los mayores rendimientos estuvieron determinados por

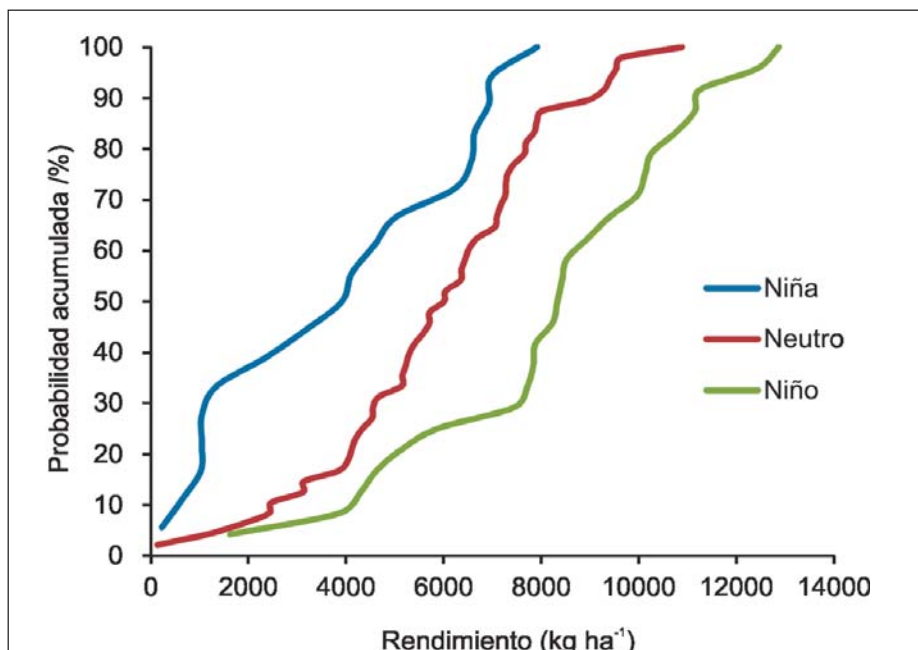


Figura 6. Distribución de rendimiento de maíz según ENSO para el litoral oeste de Uruguay comprendido entre Colonia y Paysandú (Serie 1990-2011).

las siembra temprana (15/9), para los años «Niña» fueron en fecha tardía (15/12) (Figura 7). En años «Neutro» el rendimiento máximo alcanzable fue menor al de los años «Niño» independientemente de la zona para la cual se simularon los rendimientos.

La fecha de siembra de diciembre redujo el efecto negativo de la condición «Niña» prevista para el año, establecien-

do un rendimiento alcanzable esperado en torno a 6000 kg ha⁻¹, y la de setiembre, redujo los rendimientos mínimos esperables para años considerados «Neutro», estableciendo un mínimo esperable (Cuartil 5%) de 4200 contra 2500 kg ha⁻¹ de la siembra de diciembre. Por tanto, frente al pronóstico de año «Niña» sería conveniente retrasar la fecha de siembra aun para situaciones de «maíz de prime-

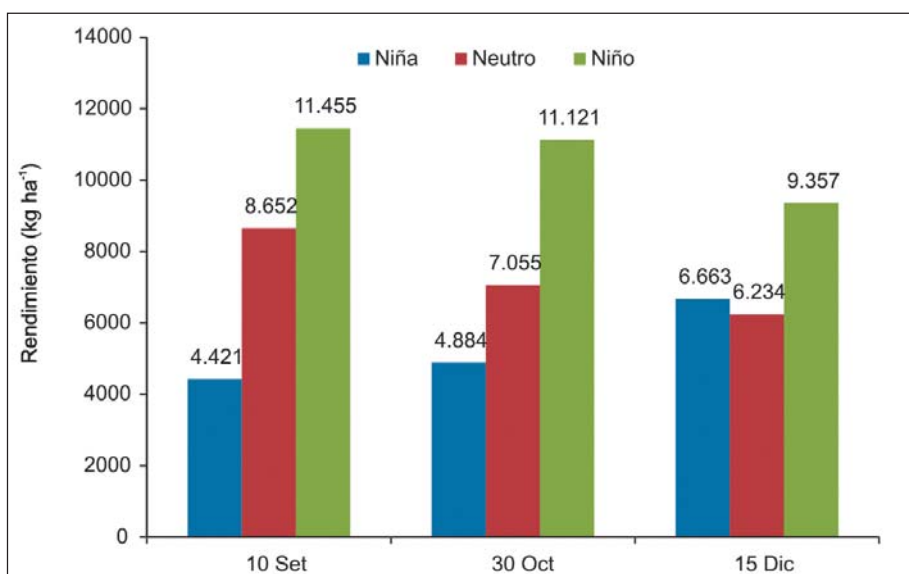


Figura 7. Rendimiento medio de maíz de primera según condición ENSO predicha para el año en función de la fecha de siembra (Tacuarembó 1990-2011).

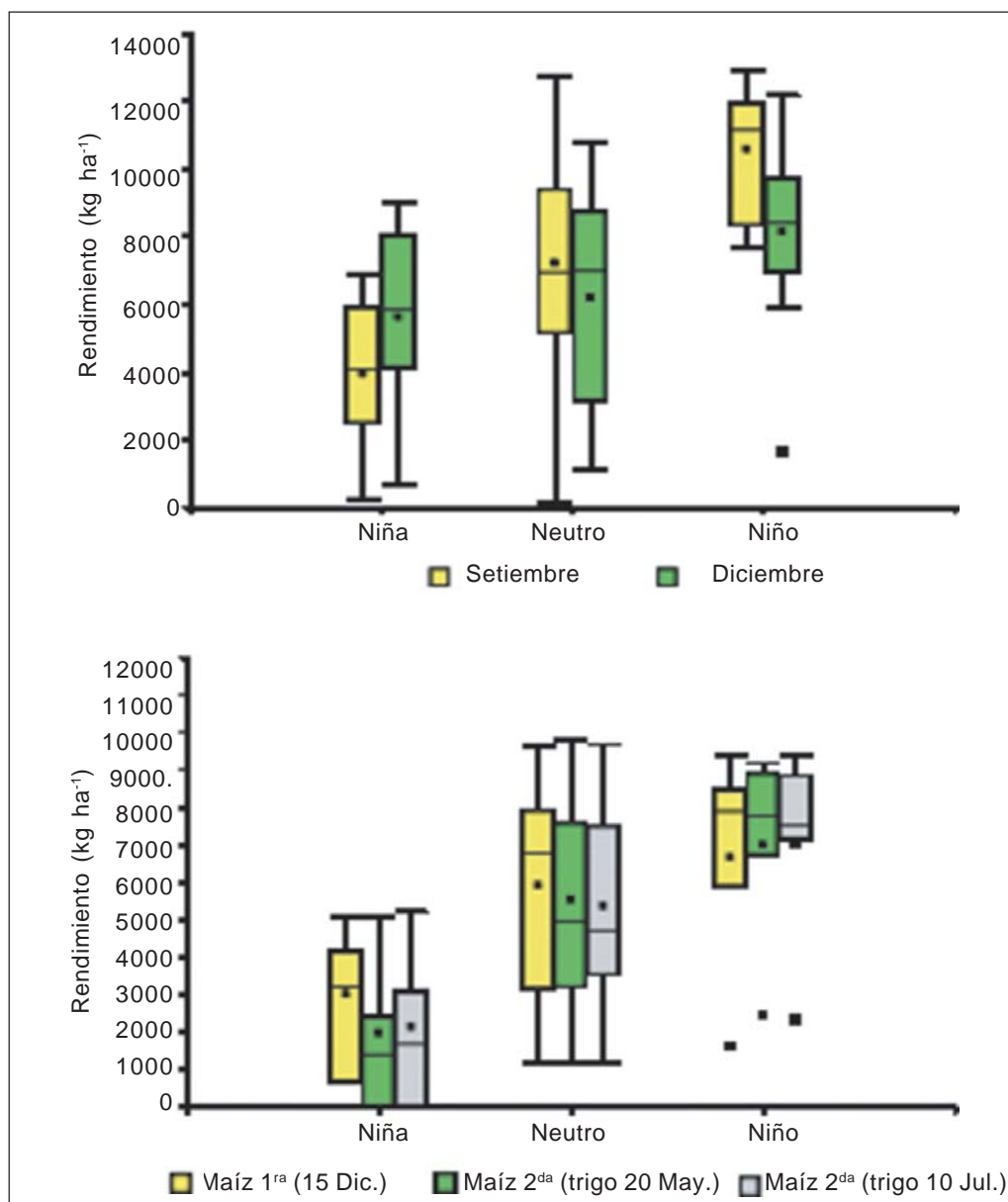


Figura 8. Variabilidad de rendimientos de maíz sembrado sobre barbecho (a) y contraste entre rendimientos esperados para siembra sobre barbecho contra dos alternativas de doble cultivo trigo-maíz (b) según ENSO y fecha de siembra (Colonia 1990-2011).

ra» (Figura 8a). Como el efecto resulta de cambiar la ubicación del período crítico de definición del rendimiento de diciembre a febrero más que por el posible efecto de tener agua reservada en el suelo, esta estrategia supone contemplar el manejo del extremadamente largo período de barbecho que se genera, aspecto que no es objetivo discutir en este trabajo.

Evaluar el efecto de la fecha de siembra para maíz sobre barbecho contra el

doble cultivo anual trigo-maíz, supone que la siembra del cultivo de verano se realiza con el residuo de agua disponible simulado en el suelo a la cosecha de trigo (Figura 8b). En los años «Niño» existe la misma distribución de rendimiento alcanzable para maíz de setiembre que para el doble cultivo, lo que resulta de la buena oferta hídrica de éstos años. En tanto, para años «Niña», si bien hay una leve ventaja para la siembra de setiembre, ninguna de las alterna-

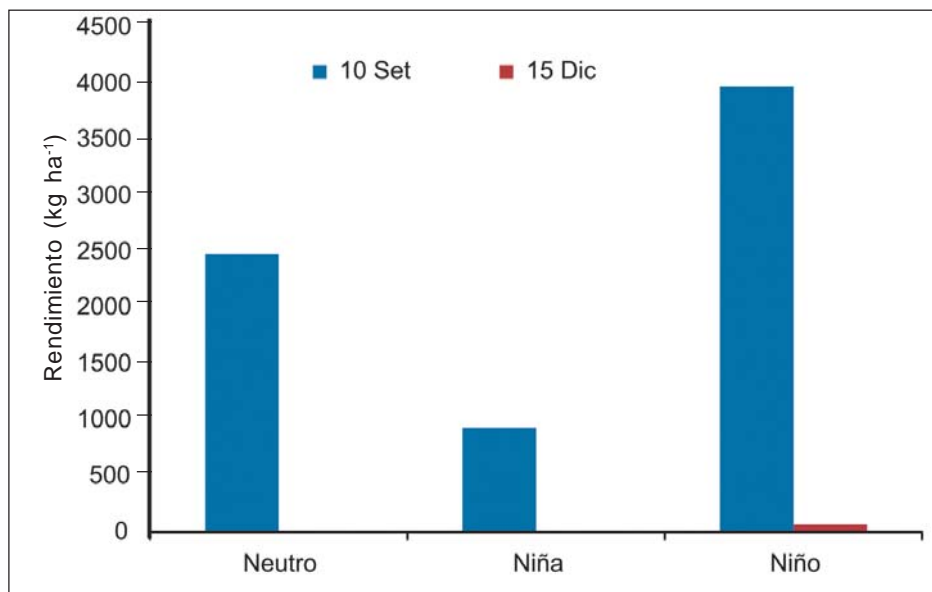


Figura 9. Diferencia de rendimiento con N limitado en relación a sin limitantes de N para Colonia (1990-2011).

tivas superó los 4000 kg ha⁻¹. La siembra de maíz de segunda en mediados de diciembre no aparece como una opción agrónomicamente válida en años de bajas precipitaciones esperada.

Para evaluar la posible limitación del rendimiento por la nutrición nitrogenada en función de las características previstas para el año, se evaluó la diferencia esperada en rendimiento entre una fertilización de 70 kg ha⁻¹ de nitrógeno como un ejemplo de cantidad utilizada comercialmente, contra el rendimiento alcanzable sin limitación por nitrógeno (Figura 9).

En años «Niño» y «Neutro» la diferencia entre el rendimiento alcanzable sin limitantes de nitrógeno y la fertilización comercial evaluada fue de 2500 y 4000 kg ha⁻¹ respectivamente para siembra temprana. Esto es un indicador de que en años «Niño» y en los «Neutros» que tuvieron precipitaciones superiores a la media existe una limitante del rendimiento por aporte del nutriente. En siembras de diciembre no hubo diferencias en el rendimiento simulado esperado, por lo que sólo en siembras tempranas debería aplicarse dosis diferentes de acuerdo a régimen hídrico esperado para el año.

4.2.3 Resultados para soja

Para el caso de soja se simuló el rendimiento alcanzable para dos grupos

de madurez. En la Figura 10 se presenta el resultado medio de todas las combinaciones evaluadas según la predicción ENSO para la serie 1990-2011 para Colonia, Paysandú y Tacuarembó.

No hubo un comportamiento esperado diferencial según el GM utilizado, por lo que no se detectó una interacción a priori para esta variable en relación a la predicción ENSO para el año. No obstante, la diferencia esperada para el rendimiento alcanzable según la predicción ENSO para el año para todas las situaciones simuladas fue de 2472, 1935 y 3524 kg ha⁻¹ para años «Neutro», «Niña» y «Niño» con un coeficiente de variación de 39, 60 y 29% respectivamente. En el 70% de los años con predicción «Niño» el rendimiento alcanzable se ubicó por encima de las 3000 kg ha⁻¹, y sólo en el 11% estuvo por debajo de 2000 kg ha⁻¹. Las diferencias entre los años «Niña» y «Neutro», si bien aparecen claras, se diferencian principalmente por la proporción de años con rendimientos menores a 2000 kg ha⁻¹ (50 y 28% de los años respectivamente), pero se reducen cuando los «Neutros» tienen una cantidad y distribución de lluvias como para generar rendimientos mayores a 3000 kg ha⁻¹.

Respecto a la relación entre la fecha de siembra y rendimiento alcanzable dependiente de la predicción ENSO para el año, los clasificados como «Niño»

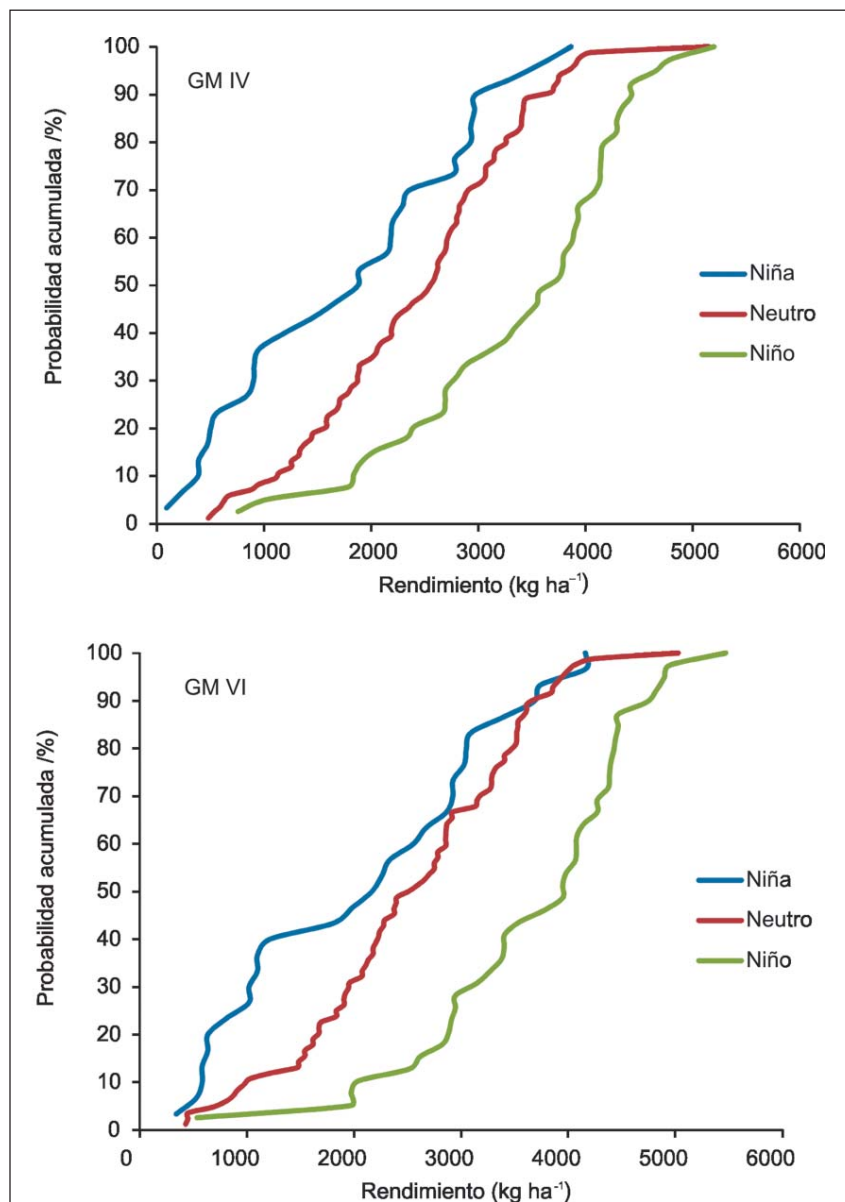


Figura 10. Distribución de rendimiento alcanzable de soja según ENSO para el litoral oeste de Uruguay comprendido entre Colonia y Paysandú más Tacuarembó para dos grupos de madurez (GM) (Serie 1990-2011).

tuvieron los mayores rendimientos en fechas de siembra tempranas con GM V, o medias y tardía para GM VI. En cambio en los años «Niña» los mayores rendimientos se simularon con en fechas de noviembre y diciembre para ambos grupos de madurez. Para años «Neutros» independientemente del GM, la mejor alternativa fue la siembra de octubre.

Cuando se analizan los rendimientos para el doble cultivo anual trigo-soja, las diferencias en el rendimiento medio y el

nivel en el cual varían son muy notorias (Figura 12).

Mientras que en los años con predicción «Niño» el rendimiento simulado varió entre 2200 y 2800 kg ha⁻¹, en el 50% de los años con predicción «Neutro» el rendimiento alcanzable fue inferior a 2200 kg ha⁻¹. El rendimiento de los años con predicción «Niña» fue menor a 1000 kg ha⁻¹ independientemente de la fecha en la que se siembre y del GM utilizado. Para estas situaciones no se justificaría la

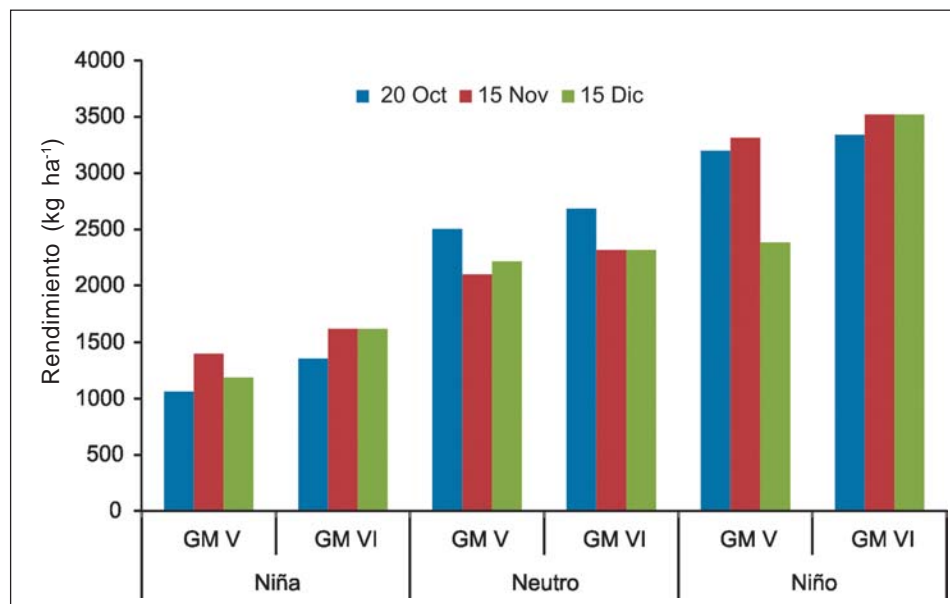


Figura 11. Rendimiento esperado de soja según fecha de siembra y predicción ENSO del año (Colonia 1990-2011).

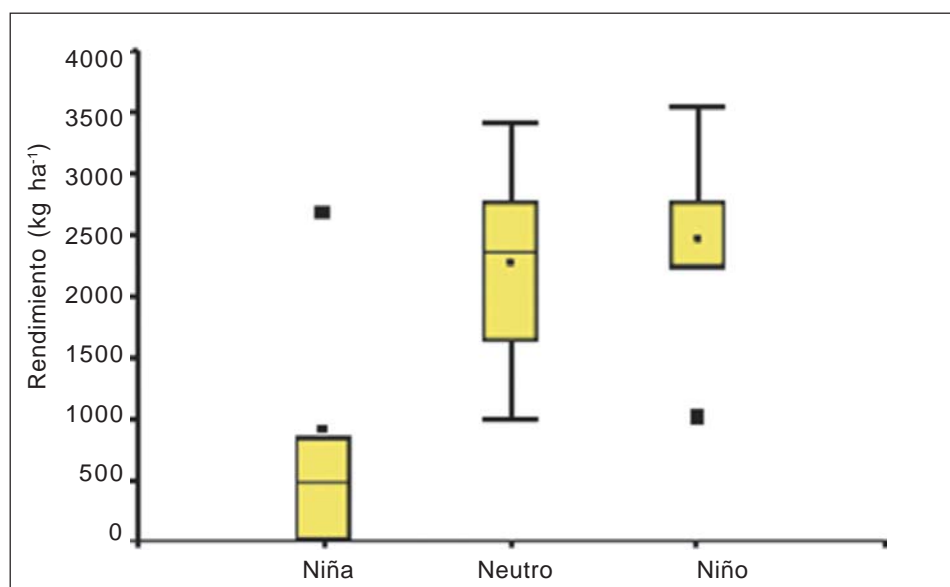


Figura 12. Rendimiento de soja de segunda según predicción ENSO para el año (Tacuaembó 1990-2011).

siembra dentro del rango de fechas siembras evaluadas, ya que sólo un año logró rendimiento comparable a la de las otras condiciones.

En resumen para soja de primera en años con predicción «Niño» y «Neutro», la mejor alternativa evaluadas fueron las siembras de GM VI entorno al 20 de octubre, mientras que en años «Niña» la opción más favorable fue la siembra de GM VI entorno al 15 de noviembre. Esto

estaría indicando que los GM V no son los más adaptados a las condiciones simuladas y posiblemente el análisis más completo deba incorporar otros GM no calibrados en este proyecto y otras fechas de siembra no evaluadas. En siembras «de segunda», la condición «Niño» generó rendimientos superiores a 2200 kg ha⁻¹, la de año «Neutro» tiene una media similar pero mayor variabilidad y la de año «Niña» no logró rendimientos que la justifiquen agrónomicamente.

Cuadro 5. Rendimiento alcanzable en los percentiles 10 (P10), percentil 50 (P50) y percentil 90 (P90) de trigo, maíz y soja simulados para combinaciones de clima-suelo de 3 zonas de Uruguay

Cultivo	Zona	Unidad de Suelo	Perfil (*)	P(10)	P(50)	P(90)
Maíz	Centro	San Jorge	J18-01	2848	6142	9395
		Paso Cohelo	G14-18	3468	8107	11558
		Itapebi-Tres Árboles	M13-04	2862	7113	10307
	Litoral sur y oeste	Isla Mala	M25-05	4041	9270	12212
		San Gabriel-Guaycurú (**)	L27-10	3107	6897	10186
		Libertad	O17-06	2327	5822	8896
	Este-Noreste	Young	E16-21	4419	7087	11894
		Fraile Muerto	F29-20	3057	4727	10954
		Alferez	F23-01	3073	4799	11036
	Soja GM VI	Centro	San Jorge	J18-01	1360	2836
Paso Cohelo			G14-18	2655	3710	5007
Itapebi			M13-04	1493	2722	3652
Litoral oeste		Isla Mala	M25-05	2861	5074	5818
		San Gabriel-Guaycurú (**)	L27-10	2575	4567	5236
		Libertad	O17-06	1546	3099	4385
Este-Noreste		Young	E16-21	1826	4282	5473
		Fraile Muerto	F29-20	623	3319	5183
		Alferez	F23-01	710	3371	5202
Trigo		Centro	San Jorge	J18-01	2610	4921
	Paso Cohelo		G14-18	4733	5476	6366
	Itapebi		M13-04	1023	3622	5632
	Litoral oeste	Isla Mala	M25-05	3836	5753	6741
		San Gabriel-Guaycurú (**)	L27-10	3433	5667	6726
		Libertad	O17-06	1623	5008	6000
	Este-Noreste	Young	E16-21	5074	5763	6347
		Fraile Muerto	F29-20	4738	5713	6347
		Alferez	F23-01	4638	5693	6347

(*) Ver perfiles en Apéndice 2.

(**) El perfil de suelo M25-05 aparece como «Asociado» en la Unidad San Gabriel-Guaycurú.

5. RENDIMIENTO ALCANZABLE SEGÚN ZONA DE PRODUCCIÓN

En el Cuadro 5 se resumen los rendimientos alcanzables de trigo, maíz y soja para distintas combinaciones de suelo-clima descriptas en los Apéndices 1 y 2. Las fechas de siembra y cultivares utilizados se detallan en el apéndice

Tomado el P10 como un indicador de riesgo para la producción, las situaciones de mayores riesgos para trigo, serían sobre suelos dominantes de las Unidades Young (Yg) e Itapebí-Tres Árboles (I-TA), seguido por los de la Unidad San Jorge (SJ). Al considerar el P50 el peor comportamiento fue para el suelo dominante I-TA. Para las demás situaciones el rendimiento alcanzable se ubicó entre 4900 y 5700 kg ha⁻¹. Con relación

a los máximos alcanzables (P90), ITA y SJ mostraron los rendimientos menores.

En soja, las situaciones de mayor riesgo estarían para los suelos dominantes de las Unidades Alférez (Af) y J.P. Varela (VA), y las de menor riesgo los de Paso Cohelo (PC), Libertad (Li) Isla Mala (IM), y el suelo que aparece como asociado en la Unidad San Gabriel-Guaycurú (SG-G). Un comportamiento similar siguió el P50. Los rendimientos máximos alcanzables (P90) superaron los 5000 kg ha⁻¹, con la excepción de los suelos dominantes de la Unidad I-TA, Yg y SJ.

En maíz se destaca el relativamente alto rendimiento del P10 en los suelos dominantes de la Unidad Fraile Muerto (FM) e IM y asociado en SG-G; el bajo rendimiento del P50 en los suelos dominantes de Af y VA; y el relativamente bajo P90 en los dominantes de la Unidad Yg.

Como los rendimientos fueron simulados sin restricciones nutricionales, las diferencias entre las zonas-suelo y cultivos responden a diferencias definidas por el clima de cada zona, la capacidad de almacenar agua de los suelos considerados y su interacciones con la demanda de agua por los cultivos, la ubicación temporal de los períodos críticos de definición de rendimientos y la respuesta del cultivo a los déficit hídricos en distintos momentos.

En la Figura 13 se presenta la relación entre el rendimiento alcanzable de trigo, maíz y soja en función de la profundidad del perfil de suelo considerado.

El rendimiento alcanzable en el P90 no tuvo relación con la profundidad del perfil del suelo en ninguno de los cultivos dentro del rango de 60 a 140 cm. Esto es esperable porque los mismos se logran cuando, además de la nutrición no limitante, la cantidad y distribución de lluvias aportan una alta proporción de la demanda potencial de agua por los cultivos. El comportamiento entre cultivos resultó diferente para el P50 y el P10. En maíz el P50 se incrementó 50 kg ha⁻¹ y el P10 en 19 kg ha⁻¹ por cm de profundidad del perfil. Esto implica que la profundidad del suelo resulta en una variable de manejo más relevante para el promedio de los años que para las condiciones hídricas de los años determinantes del P10. En

tanto en soja, sólo se asoció con el P10, definiendo un mínimo rendimiento creciente con la profundidad del suelo de 23 kg ha⁻¹ por cm de incremento en profundidad. El P50 seguramente se relacione más con la distribución de la lluvia que con la profundidad del suelo.

5.1. Efecto de la fertilización en trigo

En esta sección se pretende evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de trigo para los mismos perfiles de suelo en los que se estudió el rendimiento de los cultivos según zona. En las secciones anteriores se evaluó el rendimiento en condiciones de crecimiento potencial, sin limitaciones de ningún nutriente, mientras que en este capítulo se presentan resultados para una fertilización nitrogenada de 90 UN ha⁻¹ agregadas en dos momentos (45 UN ha⁻¹ entorno de Z 22 y 45 UN ha⁻¹ entorno de Z30). En la Figura 14 se presenta el rendimiento relativo en relación al rendimiento alcanzado sin deficiencia de N durante todo el ciclo.

Los cambios en el porcentaje del rendimiento alcanzado en términos medios no dependen de la zona ya que perfiles de la misma zona, como por ejemplo F29-20 y F23-01, tuvieron un comportamiento muy diferentes (46 y 86% del rendimiento máximo respectivamente).

La principal variable que logró explicar las diferencias entre el rendimiento sin limitantes nutricionales y el alcanzado con una fertilización de 90 UN ha⁻¹ fue el contenido de materia orgánica original del suelo (Figura 15).

Es importante considerar que los perfiles utilizados corresponden a los descriptos para Carta de Reconocimientos de Suelos del Uruguay (Escala 1:1000000) y por tanto, no tienen a priori pérdidas de materia orgánica por uso agrícola. La situación actual es muy diferente a esta, pero los resultados indicarían que en algunas de las zonas a las cuales se ha expandido la agricultura, en las que los suelos tienen relativamente bajos contenidos de materia orgánica, los rendimientos de trigo posiblemente estén limitados, entre otras posibles causas como limitantes por drenaje, por la cantidad y estrategia de

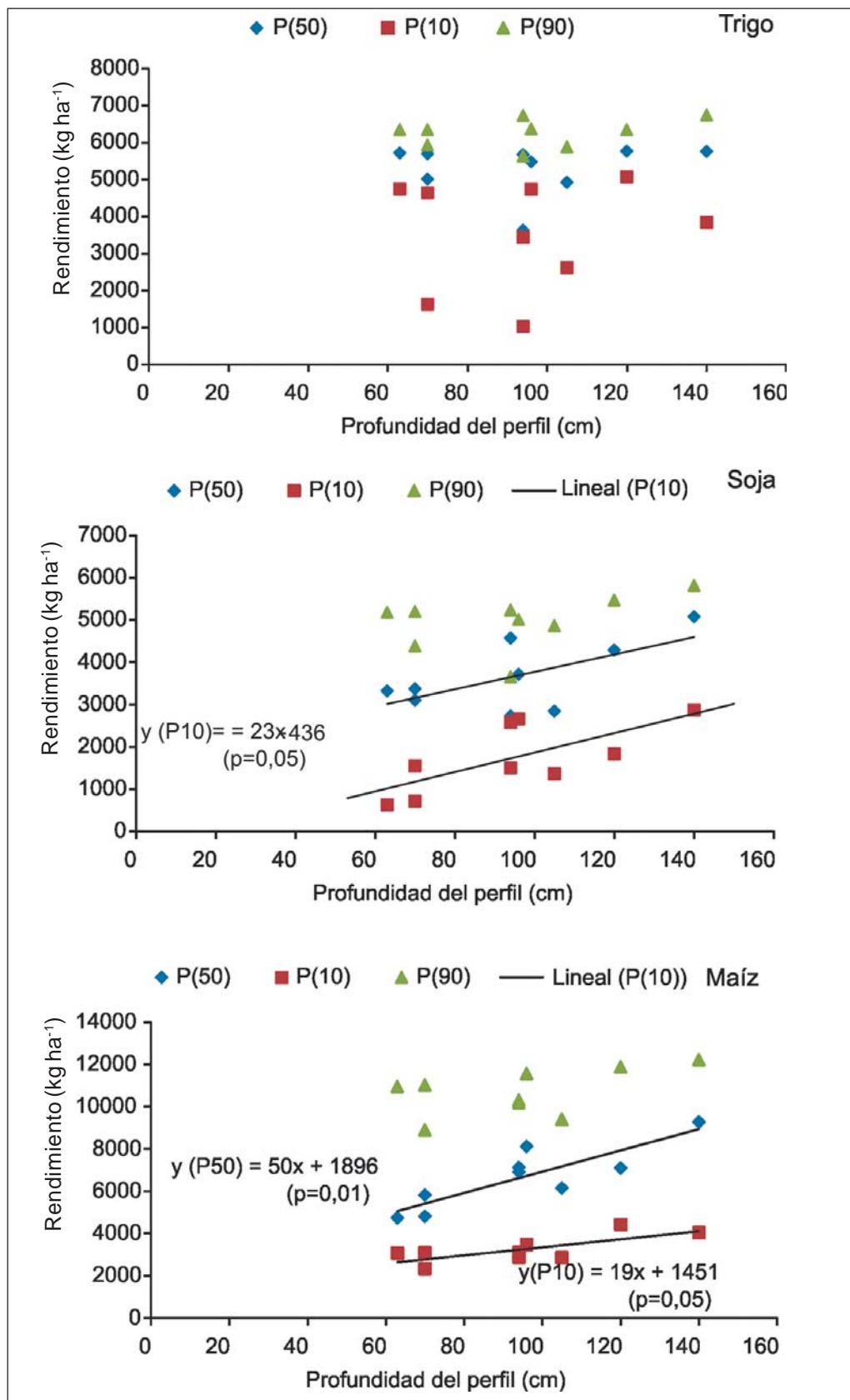


Figura 13. Rendimiento alcanzable de trigo, soja y maíz en función de la profundidad del perfil (cm) del suelo para las combinaciones clima-suelo simuladas.

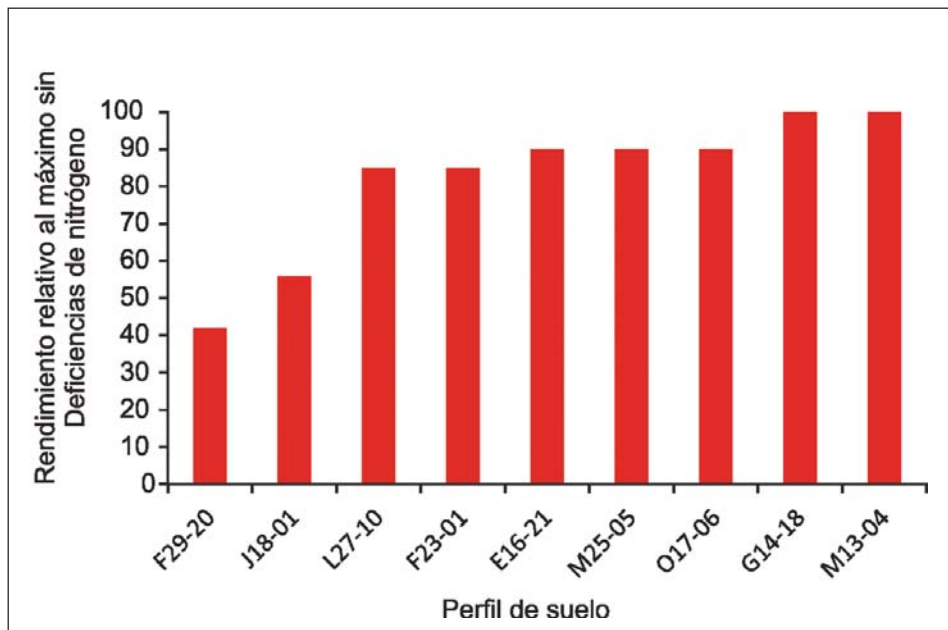


Figura 14. Rendimiento de trigo con una fertilización de 90 kg ha⁻¹ de nitrógeno relativo al máximo alcanzado sin limitaciones de nutrientes según perfil de suelo.

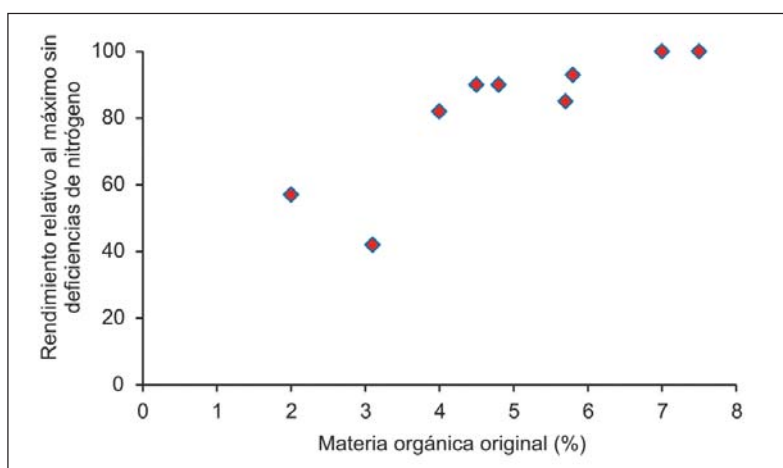


Figura 15. Rendimiento relativo al máximo del año cuando la simulación se realizó con una fertilización de 90 UN en relación al % MO del horizonte A del suelo en su condición original.

fertilización nitrogenada utilizada. Esto ameritaría la realización de experimentos específicos, ya que 90 UN ha⁻¹ es prácticamente la dosis máxima que surge como recomendación utilizando la disponibilidad de N-NO₃⁻ en el suelo a la siembra y Z22, estado nutricional del cultivo y rendimiento estimado en Z30, modelo propuesto para la zona agrícola tradicional (Hoffman *et al.*, 2010).

6. CONSIDERACIONES FINALES

- Uno de los objetivos planteados para el proyecto financiado por el FPTA 283 fue calibrar y validar el modelo de simulación CropSyst para las condiciones locales de producción, lo que se logró a través de ensayos parcelarios específicos, utilizando información generada en experimentos diseñados para otros fines pero con información suficiente, y el registros de chacras comerciales.

- Con el modelo validado fue posible evaluar alternativas de manejo, en especial fecha de siembra y fertilización para escenarios climáticos en base al pronóstico ENSO.
- Por otra parte fue posible evaluar la distribución de rendimientos y por tanto el riesgo asociado para la producción de trigo, soja y maíz para combinaciones de clima y perfiles de suelo ubicados de las zonas agrícolas en expansión y referirlas a los resultados obtenidos para la zona agrícola tradicional del litoral oeste del país.
- El análisis de resultados permite estimar el riesgo de producción asociado a cada zona así como establecer hipótesis de para trabajos experimentales específicos en las distintas zonas.
- Para uso de esta herramienta es necesario continuar con el proceso de capacitación de técnicos e investigadores, de manera de generar una masa crítica de gente trabajando con el modelo a nivel local que permita potenciar los resultados de este proyecto.

7. Apéndice 1. Caracterización de los suelos utilizados para la calibración, validación y aplicación del modelo

Lugar/Usó	Horizonte	Prof. (m)	Arcilla (%)	Arena (%)	M.O (%)	DAP (g cm-3)
EEMAC	1	0,05	22,3	18,9	4,0	1,1
	2	0,05	19,8	18,2	3,6	1,3
	3	0,1	21,2	17,8	3,2	1,2
	4	0,1	26,5	17,0	2,9	1,3
Calibración	5	0,2	41,5	11,2	1,8	1,1
	6	0,2	43,5	11,1	1,4	1,2
	7	0,3	30,2	15,0	0,7	1,3
Ruta 26	1	0,1	13,0	77,0	1,1	1,5
	2	0,1	14,0	74,0	0,8	1,5
	3	0,1	10,0	77,0	0,8	1,6
Calibración	4	0,2	32,0	58,0	0,9	1,4
	5	0,3	39,0	54,0	0,6	1,4
EEMAC	1	0,05	37,0	11,0	2,5	1,1
	2	0,05	32,8	24,0	2,2	1,1
	3	0,1	32,0	25,0	1,9	1,1
Calibración	4	0,1	42,0	19,0	1,5	1,1
	5	0,2	52,0	16,0	1,1	1,1
	6	0,4	41,0	16,4	0,7	1,2
EEMAC	1	0,05	20,4	26,4	4,3	1,1
	2	0,05	16,8	27,0	3,4	1,2
	3	0,1	23,2	25,8	2,9	1,3
	4	0,1	26,2	23,4	2,8	1,3
Validación	5	0,2	27,2	23,2	1,7	1,2
	6	0,2	34,9	15,4	1,2	1,2
	7	0,34	25,5	17,7	0,6	1,2
Durazno	1	0,1	41,0	33,0	4,4	1,1
	2	0,1	41,0	35,0	3,4	1,2
	3	0,1	42,0	38,0	2,8	1,3
Validación	4	0,2	47,0	35,0	1,9	1,3
	5	0,2	51,0	31,7	1,0	1,2
Durazno	1	0,1	47,0	11,0	-	-
	2	0,1	50,0	10,0	-	-
	3	0,1	50,0	9,0	-	-
Validación	4	0,2	49,0	11,0	-	-
	5	0,2	53,0	11,0	-	-
Durazno	1	0,05	16,3	76,0	2,5	1,4
	2	0,05	11,6	78,5	1,3	1,4
	3	0,1	7,3	81,0	0,6	1,5
Validación	4	0,1	10,6	77,4	0,6	1,5
	5	0,2	28,0	54,9	1,1	1,7
	6	0,2	35,5	48,9	0,8	1,7

Apéndice 1 . Caracterización de los suelos utilizados para la calibración, validación y aplicación del modelo

Lugar/ Perfil/Usó	Horizonte	Prof. (m)	Arcilla (%)	Arena (%)	M.O (%)	DAP (g cm-3)
Validación	4	0,1	10,6	77,4	0,6	1,5
	5	0,2	28,0	54,9	1,1	1,7
	6	0,2	35,5	48,9	0,8	1,7
Salto	1	0,19	40,6	13,1	6,9	-
M13-04	2	0,32	65,2	7,4	3,1	-
Aplicación	3	0,27	64,5	7,1	1,7	-
	4	0,14	61,1	1,8	1	-
Tacuarembó	1	0,2	14	80,4	1,93	-
J18-01	2	0,15	16,2	76,6	1,55	-
	3	0,25	40,5	52,4	1,77	-
Aplicación	4	0,32	38,7	54,6	0,3	-
	5	0,15	33,6	53,9	0,1	-
Tacuarembó	1	0,3	41,4	12,7	7,5	-
G14-18	2	0,55	52,1	13,7	2,69	-
Aplicación	3	0,15	37,4	11,5	0,64	-
Treinta y Tres	1	0,2	40,3	11,4	4,81	-
	2	0,14	41,4	11,4	2,59	-
E16-21	3	0,38	59,5	7,9	2,41	-
	4	0,17	68	4,1	1,55	-
Aplicación	5	0,11	50,9	6	0,91	-
	6	0,15	28,8	14,7	0,15	-
Treinta y Tres	1	0,2	23,4	19,9	2,98	-
F29-20	2	0,2	44,9	12,6	2,14	-
Aplicación	3	0,18	45,5	11,7	1,19	-
	4	0,15	34,6	8,8	0,31	-
Treinta y Tres	1	0,21	25	31	5,5	-
F23-01	2	0,11	32	26	3,5	-
	3	0,27	52	17,6	3	-
Aplicación	4	0,11	50	23,7	1,8	-
	5	0,15	43	32,2	0,2	-
Paysandú	1	0,18	34,3	38,9	5,6	-
O17-06	2	0,14	37,8	37,9	4,45	-
Aplicación	3	0,1	50,5	34,7	2,71	-
	4	0,28	44,8	32,1	1,62	-
Colonia	1	0,2	35,9	17,2	3,84	-
L27-10	2	0,33	50,5	14,1	2,26	-
Aplicación	3	0,28	51,6	12,8	1,19	-
	4	0,15	41,3	12	0,33	-

Apéndice 1. Caracterización de los suelos utilizados para la calibración, validación y aplicación del modelo

Lugar/ Perfil/Usó	Horizonte	Prof. (m)	Arcilla (%)	Arena (%)	M.O (%)	DAP (g cm-3)
Colonia	1	0,16	23	28	4,4	-
	2	0,12	27	24	3,5	-
M25-05	3	0,17	46	18	1,5	-
	4	0,25	43	14	1,04	-
Aplicación	5	0,4	41	19	0,4	-
	6	0,2	41	19	0,15	-
	7	0,1	33	16	0,11	-

Apéndice 2. Unidad de suelos en las que es posible encontrar los perfiles de suelo utilizados para los ejemplos de aplicación

Perfil	Unidad	Categoría	Clasificación	textura
J18-01	San Jorge	Dominante	Argisol dústrico ócrico abrupúico.	Ar
G14-18	Paso Cohelo Los Mimbres	Dominante Asociado	Vertisol háplico	LAc
M13-04	Itapebí-Tres Árboles Cuchilla Haedo Queguay Chico	Dominante Asociado Asociado	Brunosol éútrico túpico	LAc v.
M25-05	Isla Mala San Gabriel-Guaycurú	Dominante Asociado	Brunosol éútrico túpico	LAc
L27-10	Libertad	Dominante	Brunosol éútrico túpico	Fr
O17-06	Young	Dominante	Brunosol éútrico túpico	Fr
E16-21	Fraile Muerto	Dominante	Brunosol éútrico túpico	LiAc v.
F29-20	Alférez	Dominante	Brunosol éútrico túpico	LAc
F23-01	José Pedro Varela Bañado de Oro	Dominante Asociado	Brunosol subéútrico lúvico	F

30 Zonas agrícolas en expansión

Apéndice 3. Ecuaciones utilizadas en el proceso de calibración y evaluación del modelo.

- Raíz del cuadrado medio del error (RCME).

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_j)^2}{n}}$$

Dónde:

Si: Valor simulado.

Oj: Valor observado.

n: Número de observaciones.

- Relación RCME(%)

$$\frac{RCME}{MediaObservada} \cdot 100 = RCME \quad (\%)$$

- Índice de ajuste (IoA%)

$$IoA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_j)^2}{\sum_{i=1}^n |P'_i| + |O'_i|^2}}$$

Donde: $P' = P_i - \bar{P}$; $O' = O_i - \bar{O}$

Apéndice 4. Coeficientes derivados de la calibración del modelo de simulación de cultivos CropSyst para trigo, cebada, maíz, soja y sorgo en Uruguay

Variable	Unidad	Trigo		Cebada		Maíz		Sorgo		Soja	
		Don Alberto	Nogal	Arrayán	Carumbé	DK 670 MG	MASS 494 MG	MS 109	MS 102	DM 5.1i	A 6411
Base temperature (°C)	°C	3	3	3	3	8	8	8	8	6	6
Cutoff temperature (°C)	°C	25	25	25	25	30	30	30	30	25	25
Canopy extinction coefficient for total (global) solar radiation	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4*	0,45*	0,5*	0,5*
Evapotranspiration crop coefficient at full canopy	Mm	1,00*	1,00*	1,2*	1,2*	1,2*	1,1*	1,1*	1,1*	1,05*	1,05*
Maximum water uptake	mm/day	10*	10*	10	10	14	14	12	12	10*	10*
Leaf water potential at the onset of stomatal closure	J/kg	-1200	-1200	-1300	-1300	-1200	-1200	-1200	-1200	-1000	-1000
Wilting leaf water potential	J/kg	-1800	-1800	-2000	-2000	-1800	-1800	-1800	-1800	-1600	-1600
Above ground biomass transpiration coefficient (K) for annuals	Pa	5	5	5	5	10	10	8*	8,2*	5*	5*
Means daily temperature that limits early growth	°C	20	20	20	20	25	25	25	25	20	20
Radiation Use Efficiency (PAR)	g/Mj	3	3	3	3	3*	4	3,5*	3,5*	1,32*	2,00*
Fraction of the max. LAI at physiological maturity		0,70	0,70	0,80	0,80	0,80*	0,9	0,8*	0,8*	0,80*	0,80*
Specific leaf area at optimum temperature	m ² /Kg	25*	25*	22	22	22	22	24*	24*	22*	22*
Steam/leaf partition coefficient		4*	4*	3*	3*	3*	2,8	1*	1*	3	3
Emergence	°C-day	100*	100*	100*	100*	57*	75*	60*	60*	104*	100*
Maximum root depth	°C-day	1150*	1150*	1000*	900*	850*	750*	1040*	1040*	1327*	1100*
End of vegetative growth	°C-day	1050*	1055*	1000*	850*	850*	1000*	1200*	1200*	1420*	1300*
Begin flowering	°C-day	1100*	1115*	980*	870*	1150*	1100*	1200*	1200*	1300*	1000*
Begin filling	°C-day	1170*	1190*	1120*	970*	1400*	1475*	1500*	1330*	1400*	1400*
Physiological maturity	°C-day	1750*	1780*	1720*	1450*	1950*	1750*	1750*	1650*	2500*	2400*
Maximum rooting depth	m	1,5	1,5	1,5	1,5	1,7*	1,7*	1,7*	1,7*	1,50*	1,50*
Sensitivity to water and nitrogen stresses during flowering	-	1,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,1*	1,0*	0,5*	0,50*	0,50*
Leaf area duration	°C-day	700*	700*	850	850	1200*	850	1200	1200	700*	700*
Unstressed harvest index	-	0,50*	0,55*	0,55*	0,55*	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,50*	0,50*

Apéndice 5. Cultivares y fechas de siembra utilizados en el análisis de rendimiento para distintos suelos y zonas.

Cultivo	Cultivar	Fecha Siembra
Trigo	Nogal	20-may
Soja	A 6411	10-nov
Maíz	MASS 494	05-sep

8. BIBLIOGRAFÍA

- ARKIN, G.F., VANDERLIP, R.L., RITCHIE, J.T.**, 1976. A dynamic grain sorghum growth model. *Trans. ASAE* 19, 622-626.
- BELLOCHI, G., SILVESTRI, N., MAZZONCINI, M., MENINI, S.** 2002. Using the CropSyst Model in Continuous Rainfed Maize (*Zea mais L.*) under Alternative Management Options. *Italian Journal of Agronomy* 6, 43-56.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G., PICKERING, N.B.** 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 99-128.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W., PICKERING, N.B.** 1996. Potential Uses and Limitations of Crop Models. pp. 704-716.
- BOUYOUCOS, G.J.** 1936. Directions for Making Mechanical Analysis of Soils by the Hydrometer Method. *Soil Sci.* 42.
- DE WIT, C.T., BROUWER, R., PENNING DE VRIES, F.W.** 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969., Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.
- HOFFMAN, E., PERDOMO, C., ERNST, O., BORDOLI, M., PASTORINI, M., PONS, C., BORGHI, E.** 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas* 46, 13-18.
- MAZZILLI, S., PÉREZ, C., ERNST, O.** 2011. Una alternativa para optimizar el uso de fungicidas para controlar fusariosis de espiga en trigo. *Agrociencia* 15, 61-68.
- MCCOWN, R.L., HAMMER, G.L., HARGREAVES, J.N.G., HOLZWORTH, D.P., FREEBAIRN, D.M.** 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50, 255-271.
- MONZON, J.P., SADRAS, V.O., ANDRADE, F.H.** 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crops Research* 98, 83-90.
- MOSCHINI, R.C., PIOLI, R., CARMONA, M., SACCHI, O.** 2001. Empirical Predictions of Wheat Head Blight in the Northern Argentinean Pampas Region. *Crop Sci.* 41, 1541-1545.
- RITCHIE, J.T., SINGH, U., GODWIN, D.C., BOWEN, W.T.** 1998. Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 77-79.
- ROMERO, R.** 1996. Vulnerabilidad y adaptación de la cebada cervecera al cambio climático en Uruguay. Documentos on-line. INIA.
- SADRAS, V.C.** 2002. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Research* 77, 201-215.
- SAWCHIK, J.** 1996. Vulnerabilidad y adaptación del maíz al cambio climático en el Uruguay. Documentos on-line.
- SAXTON, K.E., RAWLS, W.J.** 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci Soc Am J* 70, 1569-1578.
- SINCLAIR, T.R., SELIGMAN, N.A.G.** 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agron. J.* 88, 698-704.
- STÖCKLE, C.O., DONATELLI, M., NELSON, R.** 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- STOCKLE, C.O., MARTIN, S.A., CAMPBELL, G.S.** 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46, 335-359.
- SWANEY, D.P., JONES, J.W., BOGGESE, W.G., WILKERSON, C.G., MISHOE, J.W.** 1983. Real-time irrigation decision analysis using simulation. *Trans. ASAE* 26, 562-568.
- TAVELLA, W.** 1994. Calibración y Validación del Modelo Ceres-Wheat en Uruguay. Universidad de la República, Montevideo-Uruguay.
- WALKLEY, A., BLACK, I.A.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63, 251-263.
- WILKERSON, G.G., MISHOE, J.W., JONES, J.W., BOGGESE, W.G., SWANEY, D.P.** 1983. Within-season decision making for pest control in soybeans. *ASAE Paper No.* 83 - 4044, St. Joseph, MI.