



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**VARIABLES AMBIENTALES Y DE MANEJO QUE DEFINEN EL RENDIMIENTO
DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.) EN EL NORESTE ARGENTINO**

ING. AGR. ANDRÉS MADIAS

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE RECURSOS NATURALES

DIRECTOR: DR. LUCAS BORRÁS
CO- DIRECTORA: DRA. BRENDA L. GAMBIN

2021

VARIABLES AMBIENTALES Y DE MANEJO QUE DEFINEN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.) EN EL NORESTE ARGENTINO

Andrés Madias

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en campos de productores de la región noreste de Argentina durante el período comprendido entre 2008 y 2019, bajo la dirección del Dr. Lucas Borrás y la co-dirección de la Dra. Brenda L. Gambin.

Nombre y firma del Maestrando

Andrés Madias

Nombre y firma del Director

Lucas Borrás

Nombre y firma del Co – Directora

Brenda L. Gambín

Defensa: 6 de octubre de 2021.

AGRADECIMIENTOS

A Lucas Borrás y Brenda Gambín por su apoyo e incentivo a lo largo de todo el proceso de formación, y por sus valiosos aportes sobre la tesis.

A Lucas Vitantonio-Mazzini y Guido Di Mauro por guiarme durante el proceso de análisis y transmitirme sus conocimientos.

A Rodolfo Gil, Leandro Ventroni y Tomás Coyos por incentivar y apoyarme durante la maestría.

A todos los productores y técnicos que pusieron a disposición su tiempo, sus campos y insumos para llevar adelante los experimentos. Especialmente a Gerardo Quintana por todo el trabajo conjunto durante estos años.

A la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa que apoyó la formación de recursos humanos.

A los docentes que han contribuido con mi formación a lo largo de la maestría y la Facultad de Ciencias Agrarias por brindar este espacio de formación académica.

A mis padres, compañera, hija e hijo por el apoyo e incentivo constante brindado durante todo el camino.

DEDICATORIAS

A mi papá y mamá, por su apoyo constante y por haberme transmitido sus valores y experiencia.

A mi compañera, a mi hija y a mi hijo, por el apoyo brindado a lo largo de este camino.

A mis abuelos y abuelas, que siempre estuvieron y estarán presentes.

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

Trabajos en revistas internacionales derivados de la tesis:

Madias, A.; Di Mauro, G.; Vitantonio-Mazzini, L.N.; Gambin, B.L.; Borrás, L., 2021. Environment quality, sowing date, and genotype determine soybean yields in the Argentinean Gran Chaco. *European Journal of Agronomy*, vol. 123, 126217. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126217>

Trabajos presentados en jornadas y congresos derivados de la tesis:

Madias, A.; Di Mauro, G.; Vitantonio-Mazzini, L.N.; Gambin, B.L.; Borrás, L.; Quintana, G.J.R., 2019. Optimizando el manejo de soja en el NEA. XXVII Congreso AAPRESID. Rosario, Santa Fe. (Presentación oral).

Madias, A.; Di Mauro, G.; Vitantonio-Mazzini, L.N.; Gambin, B.L.; Borrás, L., 2019. ¿Cómo el ambiente y el manejo impactan en el rendimiento de la soja en la Región NEA?. XXVII Congreso AAPRESID. Rosario, Santa Fe. (Presentación poster).

Madias, A.; Di Mauro, G.; Vitantonio-Mazzini, L.N.; Gambin, B.L.; Borrás, L., 2019. Variables ambientales y de manejo que definen el rendimiento del cultivo de soja en el NEA. VII Jornada de intercambio académico público-privado. Bayer e INTA Oliveros. Oliveros, Santa Fe. (Presentación oral).

INDICE

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
Objetivo general	16
Objetivos específicos	17
Hipótesis a evaluar	17
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Características de la región de estudio.....	18
Descripción de los ensayos en campos de productores	20
Impacto de variables ambientales y de manejo sobre el rendimiento (obj. específico I) ...	22
<i>Datos utilizados</i>	22
<i>Análisis estadístico</i>	23
Interacciones del grupo de madurez con el manejo y el ambiente (obj. específico II).....	25
<i>Datos utilizados</i>	25
<i>Análisis estadístico</i>	26
RESULTADOS	27
Impacto de variables ambientales y de manejo sobre el rendimiento (obj. específico I) ...	27
<i>Modelos sin y con efectos fijos</i>	29
<i>Impacto de las variables predictoras sobre el rendimiento</i>	33
Interacciones del grupo de madurez con el manejo y el ambiente (obj. específico II).....	35
DISCUSIÓN.....	39
CONCLUSIONES	43
Contrastes de hipótesis planteadas.....	43
Perspectivas para futuras líneas de investigación	44
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXO.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Argentina y zona de estudio (A); distribución de los principales tipos de suelo (orden) dentro de la región NEA en escala 1:500.000 (B); y años de desmonte de los suelos en el Chaco Seco dentro de la región NEA (C).

Figura 2. Lluvias (*panel superior; azul*), evapotranspiración de referencia (*panel superior; rojo*) y temperatura media mensual (*panel inferior; gris*) para tres localidades del representativas de la región de estudio: Bandera (Santiago del Estero), Las Breñas (Chaco) y Reconquista (Santa Fe).

Figura 3. Ubicación de los sitios experimentales dentro de la región NEA.

Figura 4. Rendimiento promedio ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) a lo largo de los 106 sitios donde se evaluó un mismo genotipo (Munasqa, grupo de madurez VIII).

Figura 5. Relación entre rendimiento de soja y lluvias desde 30 días pre-siembra (PS) a R7 (Fig. 5A), fecha de siembra (Fig. 5B), evapotranspiración de referencia desde siembra (S) a R7 (Fig. 5C), años de agricultura (Fig. 5D), períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7 (Fig. 5E), y fósforo del suelo (Fig. 5F).

Figura 6. Rendimiento explorado en cada uno de los 27 ensayos considerados en el segundo análisis, donde se evaluaron genotipos pertenecientes a grupos de madurez V, VI, VII y VIII.

Figura 7. Relación entre rendimiento y fecha de siembra (días después del 1^{ro} de noviembre; Fig. 7A) o materia orgánica del suelo (%; 0-20 cm; Fig. 7B) para grupos de madurez (GM) V, VI, VII, y VIII.

Figura A1. Matriz de correlaciones de Pearson de todas las variables consideradas inicialmente y rendimiento para el primer análisis (objetivo específico I). Colores azules indican correlación positiva y rojos correlación negativa; la intensidad del color y el tamaño del punto indican el valor de la correlación (r).

Figura A2. Matriz de correlaciones de Pearson de todas las variables consideradas inicialmente y rendimiento para el segundo análisis (objetivo específico II). Colores azules indican correlación positiva y rojos correlación negativa; la intensidad del color y el tamaño del punto indican el valor de la correlación (r).

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rango explorado de variables de manejo y del ambiente en 106 ensayos para evaluar su potencial impacto en el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina incluidos en el modelo por encima del óptimo (objetivo específico I)

Tabla 2. Estadísticos para los diez mejores modelos de efectos mixtos generados, más el modelo nulo (sin efectos fijos), entre 512 modelos evaluados, incluyendo R^2 marginal (R^2_M), R^2 condicional (R^2_C), criterio de información de Akaike (CIA) y peso de Akaike (w_i).

Tabla 3. Componentes de la varianza (CV) de los efectos aleatorios y los estimados $\pm$ error estándar (EE) de los efectos fijos para modelos sin y con la influencia de diferentes variables de manejo y ambientales sobre el rendimiento de soja.

Tabla 4. Componentes de la varianza (CV) de los efectos aleatorios y estimados $\pm$ error estándar (EE) de los efectos fijos para modelos sin y con la influencia del grupo de madurez del genotipo (GM), la materia orgánica del suelo, la fecha de siembra, y sus interacciones con el GM sobre el rendimiento (valores sin estandarizar).

Tabla A1. Rango explorado de cada una de las variables de manejo y del ambiente inicialmente consideradas en el análisis de 106 ensayos para evaluar la potencial influencia de cada variable sobre el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina. (objetivo específico I).

Tabla A2. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables predictoras a nivel de sitio incluidas en el modelo por encima del óptimo, para evaluar su potencial influencia sobre el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina (objetivo específico I).

Tabla A3. Genotipos evaluados dentro de cada grupo de madurez en el análisis realizado para el objetivo específico II, junto al número de sitios donde cada genotipo fue evaluado.

Tabla A4. Mejor predictor lineal insesgado (MPLI) del rendimiento (kg.ha^{-1}) $\pm$ error estándar (EE) para todos los genotipos testeados dentro de cada grupo de madurez en el análisis realizado para el objetivo específico II.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CIA:	Criterio de información de Akaike
CPV:	Cambio proporcional de la varianza
CV:	Componente de la varianza
EE:	Error estándar
EMA:	Ensayos multi-ambientales
ET ₀ :	Evapotranspiración de referencia
FIV:	Factor de inflación de la varianza
GM:	Grupo de madurez
ha:	Hectárea
IMM:	Inferencia multi-modelo
IR:	Importancia relativa
m:	Metro
mm:	Milímetro
m ² :	Metro cuadrado
MV:	Máxima verosimilitud
MVR:	Máxima verosimilitud restringida
NEA:	Noreste de Argentina
ppm:	Partes por millón
PS:	pre-siembra
R1:	Inicio de floración
r:	Coeficiente de correlación
R ² _M :	Coeficiente de determinación marginal
R7:	Madurez fisiológica
R ² _C :	Coeficiente de determinación condicional
S:	Siembra
β:	Coeficiente de regresión
ω:	Peso de Akaike

RESUMEN

La región noreste de Argentina (NEA) forma parte del Gran Chaco, una de las regiones a nivel global con las mayores tasas de deforestación en los últimos años a causa de la expansión de la frontera agrícola. Esta nueva superficie productiva está mayormente destinada al cultivo de soja. A pesar de la importancia económica del cultivo de soja para esta región, son escasos los estudios orientados a proveer mejoras para un manejo sustentable de los sistemas de producción. Los objetivos del trabajo fueron (i) identificar variables de manejo y del ambiente claves para el rendimiento de soja, y cuantificar su impacto, y (ii) explorar interacciones entre el grupo de madurez (GM) del genotipo y otras variables de manejo y ambientales. Se realizaron 112 ensayos multi-ambientales (EMAs) en campos de productores durante 11 campañas productivas consecutivas (2008/09 a 2018/19) donde en cada uno se incluyeron 14 a 19 genotipos comerciales dentro del rango de GM V a VIII.

En primer lugar se analizó un solo genotipo sembrado en 106 EMAs para identificar las variables de manejo y ambiente que tengan buen poder predictivo para el rendimiento de soja, que varió entre 435 y 5117 kg.ha⁻¹. Las variables ambientales más relevantes fueron, en orden de importancia, lluvias desde 30 días antes de la siembra a madurez fisiológica (R7), años desde el inicio de la agricultura, evapotranspiración de referencia desde siembra a R7, y número de períodos de 2 días con temperatura máxima mayor a 35°C desde inicio de floración (R1) a R7. En base a la importancia relativa (IR), la fecha de siembra fue la variable de manejo más importante (IR = 0,99), seguida por la disponibilidad de fósforo del suelo (IR = 0,59). En el segundo análisis, se encontró que la elección del genotipo también tuvo un importante efecto significativo. Hubo una interacción entre el GM y la fecha de siembra, se encontró una mayor reducción del rendimiento por el atraso de la fecha de siembra en GM VIII, seguido de GM VII, mostrando los GM VI y V las menores mermas. Las mayores diferencias de rendimiento entre GM fueron observadas en ambientes con elevado contenido de materia orgánica del suelo (rango desde 1,64 a 4,05%). Los resultados mostraron variables de manejo específicas para optimizar el manejo de los sistemas de producción de soja en la región NEA. Las reducciones en rendimiento provocadas por los años desde el inicio de la agricultura y por disminuciones en la materia orgánica del suelo sugieren un deterioro de la calidad de los ambientes de la región, y la necesidad del desarrollo de nuevas alternativas productivas para detener estas tendencias.

Palabras clave: Años en agricultura; Factores limitantes del rendimiento; Fecha de siembra; Grupo de madurez; Modelos mixtos.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL AND MANAGEMENT VARIABLES AFFECTING SOYBEAN (*Glycine max* (L.) Merr.) YIELD IN NORTHEASTERN ARGENTINA

Northeastern Argentina is part of the Gran Chaco, one of the global regions with the highest recent rates of agricultural expansion due to soybean production. In this region, studies that provide options for sustainable soybean management are scarce. The objectives of this study were (i) to identify and to quantify key management and environmental soybean yield predictors, and (ii) to explore interactions among management and environmental factors with maturity group selection. Commercial genotypes were evaluated in 112 multi-environment on-farm trials (METs) during 11 consecutive years (from 2008/09 to 2018/19), where 14 to 19 commercial genotypes within the range of MG V to VIII were included in each one.

We first analyzed a single genotype sown in 106 METs to identify management and environmental variables that have good predictive power for soybean yield, which ranged from 435 to 5117 kg.ha⁻¹. Relevant environmental variables were, in order of importance, rainfall from 30 days before sowing to physiological maturity (R7), years after land conversion to agriculture, reference evapotranspiration from sowing to R7, and the number of 2-day periods with maximum temperatures above 35°C from beginning of flowering to R7. Sowing date was the most important management variable, followed by phosphorous availability. In the second analysis, it was found that genotype selection also had a strong significant effect. There was an interaction between the MG and the sowing date, a greater reduction in yield was found due to delays in the sowing date in MG VIII, followed by MG VII, with MG VI and V showing the lowest losses. The greatest differences in yield between MG were observed in environments with a high content of soil organic matter (range from 1,64 to 4,05%). These results illustrate specific management variables to guide farmers and advisors to optimize regional soybean cropping systems. The negative yield effect promoted by years after land conversion and reductions in soil organic matter suggest a decline in the environmental quality of the region and the need for new production alternatives to halt these trends.

Keywords: Years after land conversion; Yield limiting factors; Sowing date; Maturity group; Mixed-model effects

INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de soja está en continuo crecimiento (Barret, 2019). Esta demanda es cubierta a través del incremento de producción por unidad de superficie, pero también a través de la expansión de la superficie cultivada a nivel mundial. Actualmente, Argentina produce el 16% de la producción total de soja a nivel mundial (FAO, 2019), y es el mayor exportador de harina de soja de alta proteína (USDA-FAS, 2019). Esto fue posible gracias al incremento de la superficie destinada al cultivo de soja en la región templada de producción del Argentina (entre latitudes 30° y 38° sur), y por la expansión del cultivo de soja a zonas marginales o nuevas zonas de producción (Aizen et al., 2009; Ray et al., 2012; Viglizzo et al., 2011).

La región noreste de Argentina (NEA) está integrada por las provincias de Chaco, Formosa, este de Santiago del Estero y norte de Santa Fe, siendo a su vez parte de la región conocida como Gran Chaco (Bucher, 1982). En esta región se ha observado una de las mayores tasas de deforestación a nivel mundial a partir de mediados de la década del '90 (Piquer-Rodríguez et al., 2015; Vallejos et al., 2015; Volante y Paruelo, 2015), con una fuerte relación entre el aumento de la superficie deforestada y el incremento de la superficie destinada al cultivo de soja en la región y también, en menor medida, al incremento de la cría de ganado bovino (Baldi y Jobbágy, 2012; Fehlenberg et al., 2017). A su vez, en esta región se han encontrado evidencias de la degradación de los suelos, como disminución del carbono orgánico, erosión y compactación, asociadas a la cantidad de años desde la remoción de la vegetación natural (Baldassini and Paruelo, 2020; Osinaga et al., 2018; Rojas et al., 2016). Según la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), una agricultura sostenible debe satisfacer la necesidad de las generaciones presentes y futuras, garantizando simultáneamente la rentabilidad, la salud del medio ambiente y la equidad social y económica. Por lo tanto, en la región bajo estudio es necesario desarrollar e impulsar sistemas de producción que atiendan estos requisitos de sostenibilidad.

En la actualidad en la Región NEA se producen 5,3 millones de toneladas de soja en 1,9 millones de hectáreas, representando un 10 y 12% de la producción de soja total de Argentina, respectivamente (MAGYP, 2019). A nivel económico, la soja es un cultivo relevante dentro de la producción agrícola regional, por ejemplo, en la provincia del Chaco en 2019 se destinó el 42% de la superficie sembrada con cultivos anuales estivales al cultivo de soja (MAGYP, 2019), habiendo el sector agrícola aportado el 9,8% del producto bruto de la provincia (Ministerio de Planificación y Economía de Chaco, 2019). En una escala

internacional, la producción de soja de esta región recibe una importante atención producto de la conexión entre la deforestación, la producción de soja y la utilización de su harina para la producción de carne y leche (y sus derivados) en Europa (Fehlenberg et al., 2017; Goñi, 2018). A pesar de la importancia regional e internacional de esta región, se ha puesto poca atención sobre los factores de manejo y del ambiente que definen la productividad de la soja en la misma. Son necesarios estudios orientados a optimizar el manejo del cultivo, y a mejorar los indicadores de sostenibilidad de la producción de soja argentina.

En diferentes sistemas de producción del mundo se han identificado variables de manejo y del ambiente claves en la determinación del rendimiento de soja, pero no hay registros de este tipo de estudios en áreas con similares características agroecológicas a la región NEA. Las variables ambientales que usualmente impactan en el rendimiento de soja incluyen factores climáticos como la disponibilidad de agua y la temperatura (Andrade y Satorre, 2015; Ashley y Ethridge, 1978; Baker et al., 1989; Boote et al., 2005; Prasad et al., 2008), la radiación (Rattalino Edreira et al., 2020), tipo de suelo (Di Mauro et al., 2018) y diferentes parámetros edáficos como la materia orgánica o el pH (Bacigaluppo et al., 2011; Smith et al., 2020), entre otros. Las variables de manejo incluyen aquellas que pueden ser controladas por los productores, como la fecha de siembra y la elección del genotipo (Egli y Cornelius, 2009; Mourtzinis et al., 2017; Vitantonio-Mazzini et al., 2021), el esquema de rotación de cultivos, el espaciamiento entre surcos, densidad de plantas y calidad de siembra (Di Mauro et al., 2019; Masino et al., 2018), fertilización (Calviño y Sadras, 1999), y el uso de fungicidas (Di Mauro et al., 2018). Además, las interacciones entre genotipo, manejo y variables ambientales son habituales (Goldman et al., 1989; Salmerón et al., 2016; Wilson et al., 2014; Zhou et al., 2016). En nuestra región de estudio, por ejemplo, en los últimos diez años se experimentó un reemplazo de variedades de soja pertenecientes a grupos de madurez (GM, o largo del ciclo) VII y VIII por variedades de ciclo más cortos pertenecientes a GM V y VI. Sin embargo, no existen evidencias científicas claras de que este reemplazo haya sido beneficioso a través de diferentes ambientes o fechas de siembra. Por otro lado, el carbono orgánico de los suelos en la región bajo estudio está disminuyendo luego de la transformación de la vegetación natural (Baldassini y Paruelo, 2020; Viglizzo et al., 2011), pero ninguno de estos estudios, por ejemplo, ha evaluado la existencia de reducciones del rendimiento de los cultivos asociadas al número de años desde el inicio de la agricultura ni a la reducción de niveles de materia orgánica de los suelos. Por lo tanto, la identificación de variables predictoras del rendimiento que impacten sobre el rendimiento del cultivo puede mostrar la importancia de las decisiones de los productores, y proporcionar información clave en búsqueda de una agricultura más eficiente y sustentable en estas

nuevas áreas de producción. El ajuste del manejo de los sistemas de producción, en general, y del manejo de cultivo de soja, en particular, en la región NEA permitiría mejorar la rentabilidad del cultivo, la capacidad de inversión de los agricultores y la factibilidad de que estos adopten en prácticas de manejo (ej. cultivos de servicios, reposición de nutrientes) que aporten a mejorar la sostenibilidad actual de los sistemas de producción locales (Petrzelka et al., 1996; Siebrecht, 2020).

Aramburu-Merlos (2015) determinó que en el NEA los rendimientos actuales de soja representan un 60% de los rendimientos potenciales limitados por agua. Este resultado demuestra que los productores tienen la posibilidad de explorar interacciones entre el manejo del cultivo y el ambiente para cerrar brechas de producción existentes e incrementar la producción regional (Hatfield y Walthall, 2015). Para este propósito resulta crítico la identificación de predictores de rendimiento específicos para el cultivo para ayudar a los productores en los procesos de toma de decisión (Gambin et al., 2016; Tiftonell et al., 2008). Llamativamente, no hay registro de estudios destinados a identificar y cuantificar los factores más relevantes para la determinación del rendimiento de soja en la región.

La Red de Evaluación de Variedades de Soja en el NEA de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID) es un trabajo conjunto de AAPRESID con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Las Breñas. Tiene por objetivo evaluar el potencial, estabilidad y adaptabilidad de genotipos de soja en esta región. Comenzó en la campaña 2007/08 a raíz de la necesidad de productores y técnicos de generar información local, producto de que en años anteriores se extrapolaba al NEA la información generada en Tucumán (región noroeste de Argentina, o NOA) por la Estación Experimental Obispo Colombes. La evaluación de genotipos comerciales en los ambientes de producción locales es el objetivo primordial de la red, pero la información generada por este tipo de redes puede permitir abordar la respuesta de otros objetivos más ambientales o de manejo del cultivo si existe la información necesaria (Gambin et al., 2016; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). La presente tesis tiene como objetivo evaluar varios de estos factores.

Objetivo general

- Generar información sobre factores de manejo y del ambiente más relevantes en la determinación del rendimiento del cultivo de soja en la región noreste de Argentina (NEA).

Objetivos específicos

- I. Identificar variables de manejo y ambiente más relevantes para el rendimiento de soja, y cuantificar la magnitud de sus efectos.
- II. Explorar interacciones entre el grupo de madurez del genotipo seleccionado con variables de manejo y del ambiente.

Hipótesis a evaluar

- I. Los años desde el inicio de la agricultura tienen influencia en el rendimiento del cultivo de soja.
- II. El aumento del nivel de cobertura de rastrojo del suelo tiene un impacto positivo en el rendimiento.
- III. Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y las temperaturas máximas promedio son los factores ambientales de mayor impacto en el rendimiento.
- IV. La fecha de siembra y la elección del grupo de madurez son, entre las variables de manejo, las de mayor impacto en el rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de la región de estudio

La región NEA es parte del Gran Chaco, incluyendo sus dos subregiones, el chaco seco y el chaco húmedo (Bucher, 1982; Fig. 1A). El clima de esta región es subtropical, con un régimen de precipitaciones anuales que rondan los 700 a 1200 mm, en un gradiente creciente de oeste a este, con una marcada concentración de las lluvias en los meses estivales (Fig. 2, panel superior). En gran parte del año, especialmente durante los meses estivales, la evapotranspiración de referencia supera a la oferta hídrica, por lo que son habituales los episodios de déficit hídrico para los cultivos (Maddonni, 2012) (Fig. 2, panel superior). Las temperaturas medias anuales oscilan entre 19 y 22 °C en un gradiente de sur a norte, llegando los promedios mensuales de los meses estivales a superar los 27 °C en las zonas más al norte de la región (Fig. 2, panel inferior). En lo referente a los suelos de la región predominan los órdenes molisol, entisol, inceptisol y alfisol (Fig. 1B). El material originario de los suelos de la región es el loess, al igual que los suelos de la región Pampeana (Rubio et al., 2019).

El avance de la frontera agrícola hacia esta región a través de la deforestación, es un proceso que se ha ido desarrollando desde antes de mediados del siglo XX en determinadas zonas del NEA (Zarrilli, 2016), pero que se ha intensificado desde mediados de la década del '90 hasta la actualidad (Torrella et al., 2007; Hansen et al., 2013; Vallejos et al., 2015). Debido a lo expuesto, las tierras en producción muestran un amplio rango de años desde su conversión a la producción agrícola, habiendo lotes con más de 50 años desde su desmonte hasta otros que han ingresado en producción hace menos de 5 años (Fig. 1C).

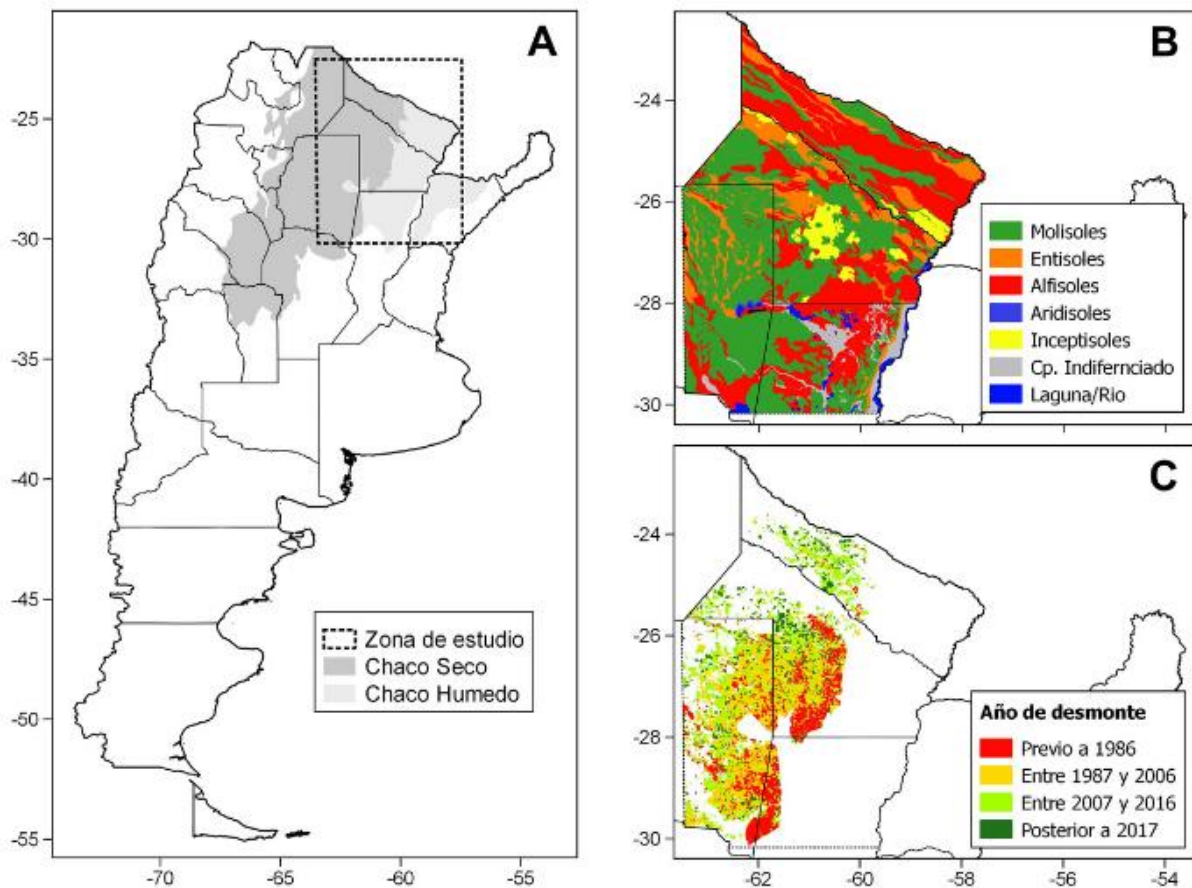


Figura 1. Mapa de Argentina y zona de estudio (A); distribución de los principales tipos de suelo (orden) dentro de la región NEA en escala 1:500.000 (B); y años de desmonte de los suelos en el Chaco Seco dentro de la región NEA (C). Figuras elaboradas a partir de GeoINTA (Fig. 1B) y www.monitoreodesmonte.com (Fig. 1C).

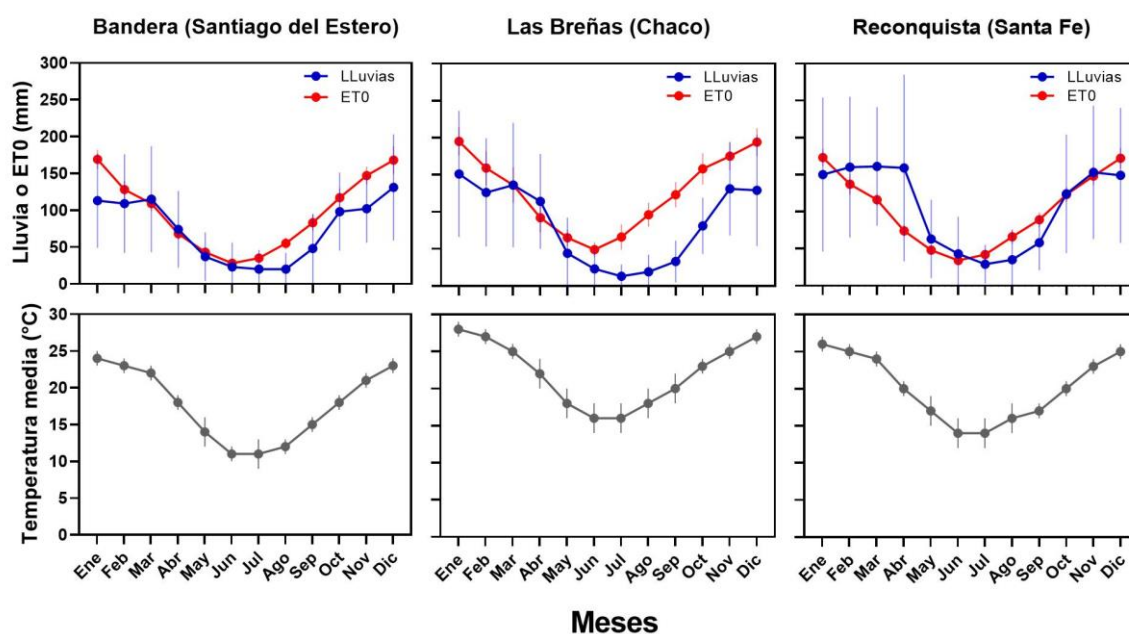


Figura 2. Lluvias (*panel superior; azul*), evapotranspiración de referencia (*panel superior; rojo*) y temperatura media mensual (*panel inferior; gris*) para tres localidades del representativas de la región de estudio: **Bandera (Santiago del Estero)**, **Las Breñas (Chaco)** y **Reconquista (Santa Fe)**. Elaboración propia a partir de series climáticas que abarcan los períodos 1970 a 2019 para Las Breñas (Chaco), 1971 a 2020 para Reconquista (Santa Fe), y 1968 a 2013 para Bandera (Santiago del Estero). Los puntos indican la media y los bigotes indican ± 1 desvío estándar.

Descripción de los ensayos en campos de productores

Se condujeron un total de 112 experimentos a lo largo de 11 campañas, desde 2008/09 a 2018/19, en la región NEA. Estos ensayos fueron parte de una red de ensayos multi-ambientales (EMA) para la evaluación de variedades de soja en la región de estudio, coordinada por AAPRESID e INTA Las Breñas (Fig. 3). Los EMAs consisten en evaluar un grupo de genotipos a lo largo de un gran número de ambientes, y representan una herramienta útil para mejoradores, agrónomos y productores para apoyar el proceso de selección de genotipos.

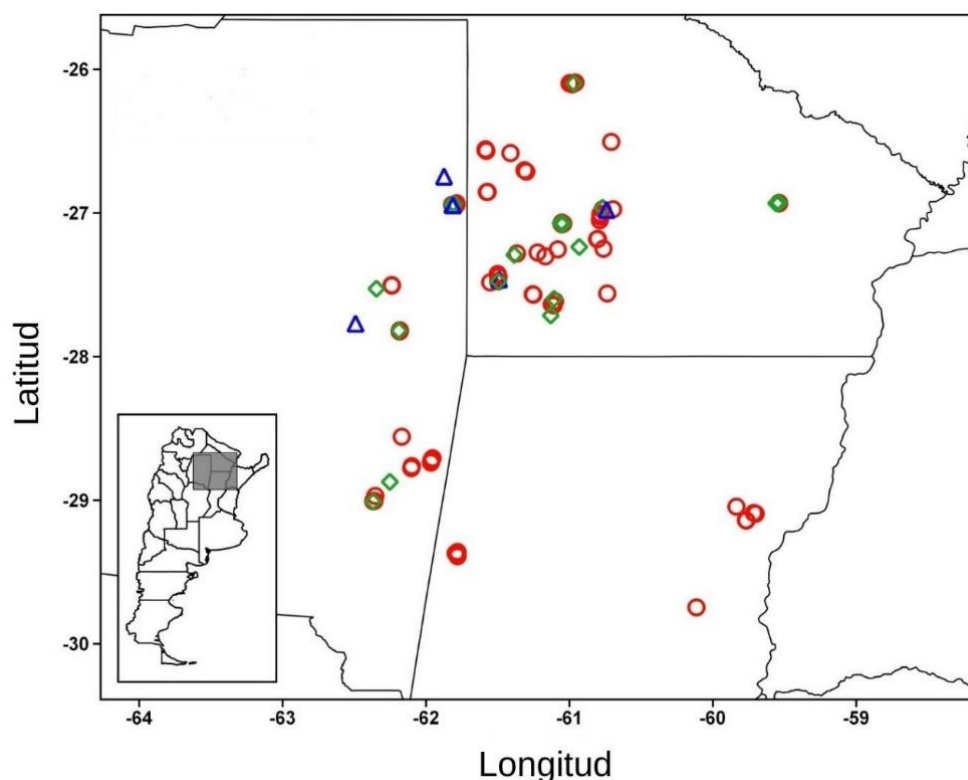


Figura 3. Ubicación de los sitios experimentales dentro de la región NEA. Se detallan los ensayos utilizados en el análisis 1 (círculos rojos), en el análisis 2 (triángulos azules), y en los análisis 1 y 2 simultáneamente (diamantes verdes). En el recuadro se destaca la zona de estudio dentro del mapa de Argentina.

En los EMAs se incluyeron genotipos comerciales recomendados para la región por las empresas proveedoras de semillas, perteneciendo los mismos a los grupos de madurez (GM) V, VI, VII y VIII. Los genotipos se sembraron en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones en cada sitio. Los ensayos fueron conducidos en franjas, y el tamaño de las parcelas varió entre 100 y 300 m de largo, y de 8 a 14 surcos de ancho. El espaciamiento entre surcos fue de 0,52 m (91% de los sitios) o menor. Los lotes de producción donde se implantaron los ensayos estuvieron bajo agricultura por 3 a 111 años, y han sido manejados en siembra directa por 3 a 21 años. Los tipos de suelo fueron Molisoles (86% de los sitios), Entisoles, Alfisoles e Inceptisoles (Soil Survey Staff, 2014; Ledesma y Zurita, 1995; Boetto y Duffau, 1982; Mosconi et al., 1981; Espino et al., 1983). La capacidad de uso de los suelos varió entre II y IV (Klingebiel y Montgomery, 1961).

Los ensayos fueron conducidos en secano y con la tecnología disponible en cada campo. Las decisiones de manejo fueron realizadas por cada productor, por lo que los ensayos fueron representativos del manejo del cultivo de soja en los sistemas productivos de la región. La densidad de siembra varió entre 15 y 50 semillas m⁻². Las plagas, malezas y

enfermedades fueron controladas químicamente siguiendo recomendaciones de manejo para la zona.

Al momento de siembra se tomaron muestras de suelo a 0 a 20 cm de profundidad, las cuales fueron llevadas a laboratorio para determinar materia orgánica del suelo (%), fósforo del suelo (ppm) y pH. La materia orgánica se determinó siguiendo Walkley y Black (1934), y el fósforo por la metodología Bray I (Bray y Kurtz, 1945). La cobertura de rastrojo (%) se determinó a la siembra siguiendo el método de transecta (Laflen et al., 1981). Resumidamente, el método consiste en extender sobre el suelo una cuerda de 10 m con marcas cada 10 cm (100 marcas en total), contar el número de marcas que están tocando un pedazo de rastrojo y obtener su proporción respecto al total de marcas. En cada ensayo, se registró la fecha de siembra y las fechas de ocurrencia de los estadios fenológicos R1 (inicio de floración) y R7 (madurez fisiológica) para cada genotipo (Fehr et al., 1971). El tipo de cultivo se definió como de segunda o de primera, según haya sido antecedido, o no, por un cultivo de cosecha en la misma campaña (Andrade y Satorre, 2015). Los EMAs fueron en el 75 y 25% de los sitios soja de primera y de segunda, respectivamente.

Se registraron las lluvias diarias en cada sitio. La temperatura diaria del aire (media, mínima y máxima) a 1,5 m de la superficie del suelo y la radiación diaria se obtuvieron de la estación climática de INTA más cercana a cada sitio (SIGA-INTA, 2019; <http://siga2.inta.gov.ar/#/>). En los sitios para los cuales los datos de radiación no estuvieron disponibles, se utilizaron datos de la NASA-POWER (<https://power.larc.nasa.gov/>), ya que proveen estimaciones confiables de radiación solar para zonas de relieve plano como la región bajo estudio (Van Wart et al., 2013). En los casos donde no hubo una estación meteorológica a menos de 60 km del sitio del ensayo los datos de temperatura del aire fueron estimados por interpolación a partir de los datos de las estaciones más cercanas.

El rendimiento en grano de cada parcela en cada sitio se determinó mediante la cosecha mecánica de la parcela completa, pesaje de la masa de granos cosechada, y dividiendo la masa total de granos cosechada por la superficie de la parcela. A su vez, se determinó el porcentaje de humedad de los granos para cada parcela y luego el rendimiento fue ajustado a 13,5% de humedad.

Impacto de variables ambientales y de manejo sobre el rendimiento (objetivo específico I)

Datos utilizados

Este análisis abordó la identificación de las variables de manejo y ambientales que pueden ser utilizadas como predictores del rendimiento, y la cuantificación de la magnitud de sus efectos (en kg.ha⁻¹). Para ello se analizaron un total de 106 ensayos conducidos durante 10 campañas, desde 2008/09 a 2017/18 (Fig. 3), donde un genotipo fue evaluado en todos los sitios (Munasqa, GM VIII).

Análisis estadístico

Se exploraron diferentes predictores a nivel de cada sitio considerando la disponibilidad de datos y suficiente variación entre sitios. Estos predictores se clasificaron como variables de manejo o del ambiente, en base a la posibilidad de que puedan o no ser modificados por los productores, respectivamente. Las variables de manejo exploradas incluyeron el tipo de cultivo (soja de primera o soja de segunda), materia orgánica del suelo, fósforo del suelo, pH del suelo, fecha de siembra, densidad de siembra, cobertura de rastrojo, uso de fungicida, y años bajo siembra directa. Las variables ambientales exploradas incluyeron variables de suelo, como la capacidad de uso y los años desde el inicio de la agricultura (de aquí en adelante años de agricultura); y diferentes variables climáticas. Las variables climáticas incluyeron radiación acumulada, temperatura máxima promedio, temperatura media promedio, lluvias acumuladas y evapotranspiración de referencia acumulada (también conocida como ET₀; Allen et al., 1994; de aquí en adelante llamadas lluvias y evapotranspiración de referencia, respectivamente). Todas las variables climáticas fueron calculadas para tres períodos en función de la fenología del cultivo: siembra a R1, R1 a R7, y siembra a R7 (Fehr et al., 1971). Además de los períodos mencionados, las lluvias acumuladas fueron calculadas para el período comprendido desde 30 días antes de la siembra hasta la siembra, y en el período comprendido desde 30 días antes de la siembra hasta R7. La evapotranspiración de referencia se calculó siguiendo a Hargreaves y Samani (1985). A su vez, se incluyeron tres variables relacionadas con estrés térmico siguiendo lo propuesto por Gibson y Mullen (1996) y Casali et al. (2018). Estas variables fueron: (i) número de días con temperaturas máximas mayores a 35°C, (ii) número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C, y (iii) grados acumulados por encima de 35°C, calculado como la suma de la diferencia diaria entre la máxima temperatura y 35°C. Estas variables de estrés térmico fueron también calculadas, al igual que las demás variables climáticas, para los periodos siembra a R1, R1 a R7, y siembra a R7. En el análisis exploratorio inicial se incluyeron nueve variables de manejo y 26 variables relacionadas con el ambiente.

Inicialmente se realizó un exhaustivo análisis exploratorio de los datos, analizando la relación de cada una de las variables predictoras con el rendimiento. Se evaluó la multicolinealidad entre variables predictoras cuantitativas mediante matrices de correlación de Pearson y factor de inflación de la varianza (FIV), utilizando el software R versión 3.5.1 (R Core Team, 2018, fmsb package, Nakazawa, 2014). La colinealidad entre variables cualitativas y cuantitativas fue evaluada usando análisis de la varianza (agricolae package, Mendiburu, 2017).

En segundo lugar, mediante la utilización de modelos de efectos lineales mixtos se evaluó la influencia de diferentes variables predictoras sobre el rendimiento de soja (paquete lme4, función lmer; Bates et al., 2013) utilizando R (R Core Team, 2018, version 3.5.1). Durante el proceso de selección de modelo se siguió una estrategia de arriba hacia abajo o de tipo *top-down* (Gambin et al., 2016; Zuur et al., 2009). Luego de la exploración de datos se definió el “modelo por encima del óptimo” que incluyó nueve variables predictoras (o efectos fijos), incluyendo funciones polinómicas de primer y segundo orden. El sitio fue considerado como efecto aleatorio.

En tercer lugar, se encontró la estructura óptima de efectos fijos del modelo estadístico siguiendo la inferencia multi-modelo (IMM) basada en el enfoque de la teoría de la información (Burnham y Anderson, 2002, 2004). Este enfoque no acepta el concepto de que existe un “modelo verdadero” simple para describir sistemas biológicos. La selección del modelo de mejor aproximado representa la inferencia de los datos y nos dice que “efectos” (representados por parámetros) pueden ser respaldados por los datos (Burnham y Anderson, 2002). El criterio de información de Akaike (CIA) fue utilizado para seleccionar los modelos con mejor ajuste para las diferentes combinaciones de los predictores considerados como efectos fijos (Aho et al., 2014). En función del contexto y de los objetivos, el CIA es una herramienta apropiada para la selección de modelos comparada con otras como el criterio de información Bayesiano o la prueba de hipótesis (Aho et al., 2014; Burnham et al., 2011). Debido a que los modelos tienen diferentes efectos fijos pero la misma estructura aleatoria, se utilizó la estimación por máxima verosimilitud (MV) y no por máxima verosimilitud restringida (MVR) (Zuur et al., 2009).

En cuarto lugar, se calculó el peso de la evidencia de los modelos (ponderación o peso de Akaike; w_i) y la importancia relativa (IR) de cada potencial predictor del rendimiento. El w_i representa la probabilidad de un modelo i sea realmente el “mejor modelo” dado un conjunto de modelos considerados. El w_i toma valores entre 0 y 1, y la sumatoria del w_i de todos los modelos es igual a 1. La IR de una variable se calculó como la suma de los w_i de todos los modelos que incluyeron la variable (Burnham y Anderson, 2004). A veces, el mejor modelo

seleccionado por AIC incluirá y excluirá algunas variables; sin embargo, esta inclusión o exclusión por sí sola no indica la importancia de un predictor particular a través de diferentes modelos. En consecuencia, la IR proporciona una estimación mucho más representativa de la evidencia de la importancia para todos los predictores (Burnham y Anderson, 2004). El ω_i de cada modelo se derivó de la IMM y en base al ω_i se calculó la IR de cada posible predictor (paquete *MuMIn*, función *importance*) (Barton, 2018). El modelo final se presentó utilizando la estimación por MVR. Se realizó un análisis gráfico de los residuos estandarizados y se verificaron los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza en todos los casos (Zuur et al., 2009).

Finalmente, el modelo con predictores se comparó con el modelo sin efectos fijos a través del cambio proporcional de la varianza (CPV) según lo propuesto por Merlo et al. (2005). El R^2 marginal (R^2_M) y el R^2 condicional (R^2_C) se obtuvieron siguiendo la metodología descrita en Nakagawa y Schielzeth (2013) para modelos lineales mixtos generalizados. El R^2_M representa la varianza explicada por los factores fijos, y el R^2_C la varianza explicada por el modelo completo (considerando factores fijos y aleatorios) (Nakagawa y Schielzeth, 2013).

Debido a que los predictores del rendimiento estaban en diferentes unidades y escalas, los pasos descritos previamente fueron realizados utilizando las variables estandarizadas a valores-z (Gambin et al., 2016). Las estimaciones de los coeficientes de regresión (β +) fueron también presentadas con valores sin estandarizar para facilitar la interpretación.

Interacciones del grupo de madurez con el manejo y el ambiente (objetivo específico II)

Datos utilizados

Este análisis abordó el estudio de posibles interacciones entre el GM del genotipo y variables de manejo y ambiente. Para alcanzar este objetivo, se analizaron 27 ensayos donde se evaluaron diferentes genotipos pertenecientes a GM V, VI, VII y VIII. La lista completa de genotipos analizados se puede encontrar en la tabla A3 del anexo. Estos ensayos fueron conducidos entre las campañas 2013/14 y 2018/19, y en todos los casos incluyeron 14 o más genotipos cada uno (siempre estando representados los GM analizados). Los ensayos de campañas previas a 2013/14 fueron descartados para evitar

posibles efectos de ganancia genética, y para incluir solo ensayos donde estuvieron presentes genotipos resistentes a lepidópteros (soja Bt OGM) dentro de cada GM.

La distribución de los ensayos evaluados para este objetivo se puede visualizar en la Figura 3.

Análisis estadístico

La exploración de datos se focalizó en variables predictoras que interactúan con el GM del genotipo, analizando las mismas variables de manejo y ambientales descritas en el análisis previo (Tabla 1 y Tabla A1 en el anexo). Se utilizaron modelos lineales mixtos (paquete lme4, función lmer; Bates et al., 2013) para evaluar la influencia del GM del genotipo y su interacción con variables de manejo y del ambiente, utilizando R. El sitio, los bloques anidados a los sitios y el genotipo se consideraron efectos aleatorios. Se utilizó el CIA para seleccionar el modelo de mejor ajuste entre combinaciones de dos variables predictoras de efectos fijos en interacción con el GM (Aho et al., 2014). Los modelos se compararon utilizando la prueba de razón logarítmica de verosimilitud.

RESULTADOS

Impacto de variables ambientales y de manejo sobre el rendimiento (objetivo específico I)

Para evaluar cuales fueron los predictores de manejo y del ambiente más importantes para la determinación del rendimiento del cultivo de soja en la región de estudio se analizó el rendimiento de un genotipo único evaluado a lo largo de 106 ensayos que fueron conducidos durante 10 campañas consecutivas. El rango de variables de manejo y ambientales evaluado permitió explorar rendimientos muy contrastantes, que variaron desde 435 a 5117 kg.ha⁻¹ a través de los sitios (Fig. 4). Esta amplia variación observada permitió evaluar adecuadamente el efecto sobre el rendimiento de un amplio número de predictores.

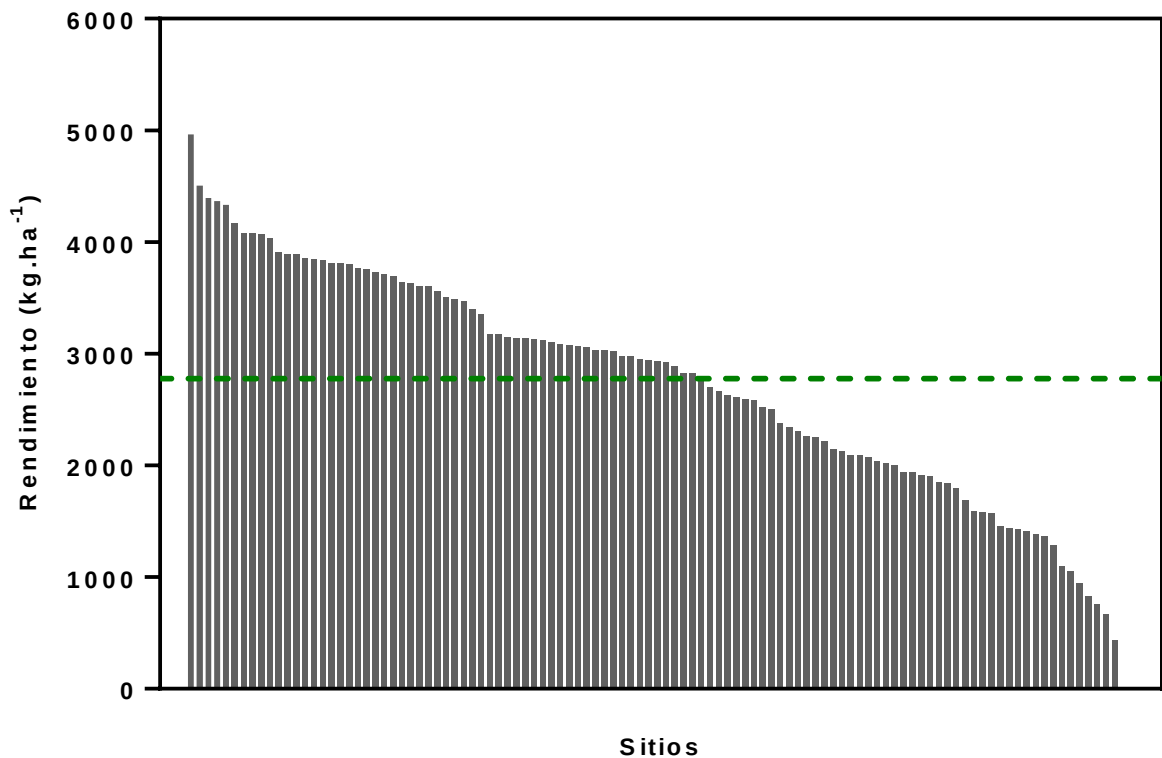


Figura 4. Rendimiento promedio a lo largo de los 106 sitios donde se evaluó un mismo genotipo (Munasqa, grupo de madurez VIII). La línea verde discontinua representa el rendimiento promedio de todos los sitios. El valor de rendimiento de cada sitio es el promedio de las tres repeticiones.

Algunos de los predictores del rendimiento del cultivo que mostraron una relación aparente con el rendimiento fueron excluidos del análisis debido a multicolinealidad. Este fue el caso de materia orgánica del suelo, que estuvo correlacionada negativamente con los años de agricultura ($r: -0,55$; $p < 0,001$), uso de fungicida que estuvo asociado con lluvias ($p < 0,01$), clase de suelo, donde los suelos clase III evidenciaron mayor cantidad de años de agricultura ($p < 0,01$), y cobertura de rastrojos, que fue mayor cuando el tipo de cultivo fue soja de segunda ($p < 0,001$). La mayor parte de las variables climáticas estuvieron correlacionadas entre ellas, por ello se seleccionaron solamente aquellas que mostraron las mayores correlaciones con rendimiento (ver Anexo Figura A1).

Los predictores seleccionados para los análisis siguientes incluyeron cinco variables de manejo y cuatro variables del ambiente (Tabla 1). Las variables de manejo fueron tipo de cultivo (soja de primera o de segunda), fósforo del suelo (variando entre 9 y 129 ppm), pH del suelo (entre 5,7 y 7,6), fecha de siembra (entre el 3 de diciembre y 2 de febrero), y años en siembra directa (desde 4 a 21). Las variables del ambiente incluyeron lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 (variando entre 163 y 945 mm), evapotranspiración de referencia desde siembra a R7 (variando entre 403 y 691 mm), número de períodos de dos días con temperatura máxima superior a 35°C desde R1 a R7 (variando entre 0 y 30), y años de agricultura (variando entre 4 y 111 años).

Tabla 1. Rango explorado de variables de manejo y del ambiente en 106 ensayos para evaluar su potencial impacto en el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina incluidos en el modelo por encima del óptimo (objetivo específico I). El mismo genotipo fue sembrado en todos los ensayos (Munasqa, grupo de madurez VIII).

Clase de variable	Variable	Tipo de variable	Unidad	Rango explorado
Manejo	Tipo de cultivo	Cualitativa		Soja 1 ^{ra} o 2 ^{da}
	Fecha de siembra	Cuantitativa	días después del 1 ^{ro} de noviembre	33 - 94
	Fósforo del suelo	Cuantitativa	ppm	9 - 129
	pH del suelo	Cuantitativa		5,7 – 7,6
	Años en siembra directa	Cuantitativa	años	4 - 21
Ambiente	Lluvias desde PS a R7	Cuantitativa	mm	163 - 945
	ET ₀ desde S a R7	Cuantitativa	mm	403 - 691
	Períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7	Cuantitativa	periodos	0 - 30
	Años de agricultura	Cuantitativa	años	4 - 111

PS se refiere a período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra a la siembra), S a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica (Fehr et al., 1971), y ET₀ a evapotranspiración de referencia.

A pesar de haber encontrado correlaciones significativas entre algunas variables predictoras (Tabla A2 del anexo) el FIV fue inferior a 10, y por lo tanto todas estas variables fueron incluidas como predictores de efectos fijos dentro de los modelos. Años de agricultura y años de siembra directa estuvieron positivamente correlacionadas ($r: 0,45$; $p < 0,001$). Estas dos variables, a su vez estuvieron negativamente correlacionadas con pH del suelo ($r: -0,22$ y $p < 0,05$ para años de agricultura; y $r: -0,40$ y $p < 0,001$ para años en siembra directa). La fecha de siembra estuvo correlacionada negativamente con ET₀ desde siembra a R7 ($r: -0,51$; $p < 0,001$). Finalmente, el número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7 estuvo asociado negativamente con las lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 ($r: -0,43$; $p < 0,001$), y positivamente con ET₀ desde siembra a R7 ($r: 0,5$; $p < 0,001$) (Tabla A2 del anexo).

Modelos sin y con efectos fijos

Primero se identificó un modelo sin efectos fijos. Este modelo exploró la variación aleatoria, que estuvo asociada con diferencias de rendimiento entre sitios. Para el conjunto de datos esta variación entre sitios explicó el 93% del total de la varianza del rendimiento, en concordancia con la amplia variación del rendimiento observada entre sitios. La varianza

residual para este modelo fue el 7% del total de la varianza. El análisis con datos no estandarizados mostró similares resultados.

En segundo lugar, y en base a las variables predictoras definidas, se exploraron un total de 512 modelos lineales de efectos mixtos. Los diez modelos de mejor ajuste, en base al CIA, están descriptos en la Tabla 3. La varianza explicada por los efectos fijos (R^2_M) en los mejores modelos fue ~50%, y la varianza explicada por los modelos en su totalidad (R^2_C) fue del 94% (Tabla 2).

El mejor modelo (A, menor CIA) incluyó seis predictores de los nueve considerados inicialmente en el “modelo por encima del óptimo”. Estos predictores fueron: fecha de siembra, fósforo del suelo, pH del suelo, años de agricultura, lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7, ET_0 desde siembra a R7, y número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7. A pesar de que este modelo tuvo bajo peso (w_i : 0,05; Tabla 2), los predictores que incluyó tuvieron elevada importancia relativa ($IR \geq 0,59$; Tabla 2). Este último resultado se puede visualizar en la presencia de estos predictores en los mejores modelos (Tabla 2). En base a la IR de las variables que incluyó se utilizó el modelo A para realizar inferencias con los datos.

Los predictores del rendimiento del cultivo de efectos fijos incluidos en el modelo A contribuyeron a reducir la varianza de rendimiento sitio a sitio en 51,6% (CPV; Tabla 3), mostrando que la mitad de la variación explorada en el rendimiento de soja ($R^2_M = 0,50$; Tabla 2) estuvo asociada a dos variables de manejo (fecha de siembra y fósforo del suelo) y cuatro variables ambientales (lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7, años de agricultura, ET_0 desde siembra a R7, y número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7) (Tabla 2). El cambio proporcional de la varianza del residual del modelo (CPV_{RESIDUAL}) fue 0,03%, mostrando que el residual del “mejor modelo” fue similar al del modelo sin efectos fijos (Tabla 3). Esto era esperado ya que los residuales explican la variación dentro de los sitios, y el modelo ajustado solo consideró predictores a nivel de sitio. El modelo con datos no estandarizados mostró resultados similares.

Tabla 2. Estadísticos para los diez mejores modelos de efectos mixtos generados, más el modelo nulo (sin efectos fijos), entre 512 modelos evaluados, incluyendo R^2 marginal (R^2_M), R^2 condicional (R^2_C), criterio de información de Akaike (CIA) y peso de Akaike (ω_i). Las cruces indican que la variable predictora fue incluida en el modelo en particular. La columna Δ CIA muestra la diferencia del valor de CIA entre un modelo en particular y el modelo con menor AIC. El valor ω_i indica la probabilidad de un modelo en particular de ser el mejor modelo entre todos los modelos generados. IR representa la importancia relativa de cada predictor. Los modelos fueron comparados utilizando el método de la máxima verosimilitud (MV). Los datos fueron estandarizados en valores-z previamente al análisis. Ver materiales y métodos para más detalles.

Modelo	Variables de manejo					Variables del ambiente				Estadísticos de los modelos				
	Fecha de siembra	Fósforo del suelo	Tipo de cultivo	pH del suelo	Años en siembra directa	Lluvias desde PS a R7	ET ₀ desde S a R7	Períodos de dos días de temperatura máxima mayor a 35°C desde R1 a R7	Años de agricultura	R^2_M	R^2_C	CIA	Δ CIA	ω_i
A	X	X				X	X	X	X	0,50	0,94	4563,6	0,0	0,05
B	X	X	X			X	X	X	X	0,50	0,94	4564,2	0,7	0,04
C	X	X				X	X		X	0,49	0,94	4564,3	0,7	0,03
D	X	X		X		X	X	X	X	0,50	0,94	4564,5	0,9	0,03
E	X		X			X	X	X	X	0,49	0,94	4564,5	0,9	0,03
F	X					X	X	X	X	0,49	0,94	4564,5	0,9	0,03
G	X					X	X		X	0,48	0,94	4564,6	1,0	0,03
H	X	X				X		X	X	0,49	0,94	4564,7	1,1	0,03
I	X	X	X			X		X	X	0,49	0,94	4564,8	1,3	0,03
J	X		X			X	X		X	0,49	0,94	4565,1	1,6	0,02
Nulo										—	—	4629,5	65,9	0,00
IR	0,99	0,59	0,41	0,35	0,32	0,99	0,74	0,64	0,76					

PS indica el período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra a la siembra), S se refiere a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica, y ET₀ a evapotranspiración de referencia.

Tabla 3 Componentes de la varianza (CV) de los efectos aleatorios y los estimados $\pm$ error estándar (EE) de los efectos fijos para modelos sin y con la influencia de diferentes variables de manejo y ambientales sobre el rendimiento de soja. Los modelos son presentados utilizando tanto datos estandarizados (valores-z) como no estandarizados.

Modelo		Modelo sin efectos fijos (valores-z)	Modelo final (valores-z)	Modelo sin efectos fijos	Modelo final	Unidades
Efectos aleatorios		CV	CV	CV	CV	
Sitio (S)		0,93879	0,45397	960593	464518	
Residual		0,06621	0,06619	67743	67727	
CPV _s		—	51,6%	—	51,6%	
CPV _{RESIDUAL}		—	0,03%	—	0,02%	
Efectos fijos		Estimado $\pm$ EE	Estimado $\pm$ EE	Estimado $\pm$ EE	Estimado $\pm$ EE	
Intercepto		-0,012 $\pm$ 0,095	0,294 $\pm$ 0,116	2767 $\pm$ 96	1090 $\pm$ 1730	
Fecha de siembra	β_1	—	-0,323 $\pm$ 0,085	—	50 $\pm$ 40	kg.ha ⁻¹ .día ⁻¹
	β_2	—	-0,115 $\pm$ 0,062	—	-0,06 $\pm$ 0,03	
Fósforo del suelo		—	0,119 $\pm$ 0,070		5,4 $\pm$ 3,2	kg.ha ⁻¹ .ppm ⁻¹
Lluvias desde PS a R7	β_1	—	0,451 $\pm$ 0,081	—	7,2 $\pm$ 2,0	kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹
	β_2	—	-0,179 $\pm$ 0,071	—	-0,004 $\pm$ 0,002	
ET ₀ desde S a R7			-0,169 $\pm$ 0,097		-2,7 $\pm$ 1,6	kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹
Períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7		—	-0,142 $\pm$ 0,086	—	-23,7 $\pm$ 14,5	kg.ha ⁻¹ .periodo ⁻¹
Años de agricultura		—	-0,163 $\pm$ 0,071	—	-6,2 $\pm$ 2,7	kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹
FIV		—	< 7,6		< 7,8	

CPV significa cambio proporcional de la varianza; FIV significa factor de inflación de la varianza; β_1 indica coeficiente lineal y β_2 indica coeficiente cuadrático

Impacto de las variables predictoras sobre el rendimiento

Se analizaron las estimaciones de los coeficientes de regresión (β +) para el mejor modelo (modelo A; Tabla 3). El ajuste del modelo con las variables estandarizadas permitió comparar la influencia de los distintos predictores sobre el rendimiento. Entre las variables de manejo, la fecha de siembra fue la más importante, seguida de fósforo del suelo. Entre las variables del ambiente, lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 fue la más importante, seguida por años de agricultura, ET_0 desde siembra a R7, y número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35 °C desde R1 a R7.

La fecha de siembra tuvo coeficiente lineal (β_1) y cuadrático (β_2) de 50 ± 40 y $-0,6 \pm 0,3 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$, respectivamente (Tabla 3). Estos coeficientes de regresión muestran que el rango de fecha de siembra óptimo va desde el 4 de diciembre al 27 de diciembre (95% del rendimiento máximo), con una disminución promedio del rendimiento de -43 kg.ha^{-1} por cada día de atraso luego de esta ventana de siembra (Fig. 5B). El fósforo del suelo tuvo un efecto positivo sobre el rendimiento de $5,4 \pm 3,2 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ppm}^{-1}$ (Tabla 3; Fig. 5F).

Las lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 tuvieron un efecto positivo decreciente sobre el rendimiento (Fig. 5A), con una pendiente inicial de $7,2 \pm 2 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Tabla 3). Los coeficientes de regresión mostraron que son necesarios al menos 612 mm de lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 para alcanzar los máximos rendimientos (95% del máximo rendimiento, 3362 kg.ha^{-1}). Los años de agricultura mostraron un efecto negativo sobre el rendimiento de $-6,2 \pm 2,7 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ (Tabla 3; Fig. 5D). La ET_0 desde siembra a R7 mostró un efecto negativo de $-2,7 \pm 1,6 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ sobre el rendimiento (Tabla 3; Fig. 5C), y el número de períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7 también evidenció un impacto negativo sobre el rendimiento de $23,7 \pm 14,5 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{período}^{-1}$ (Tabla 3; Fig. 5E).

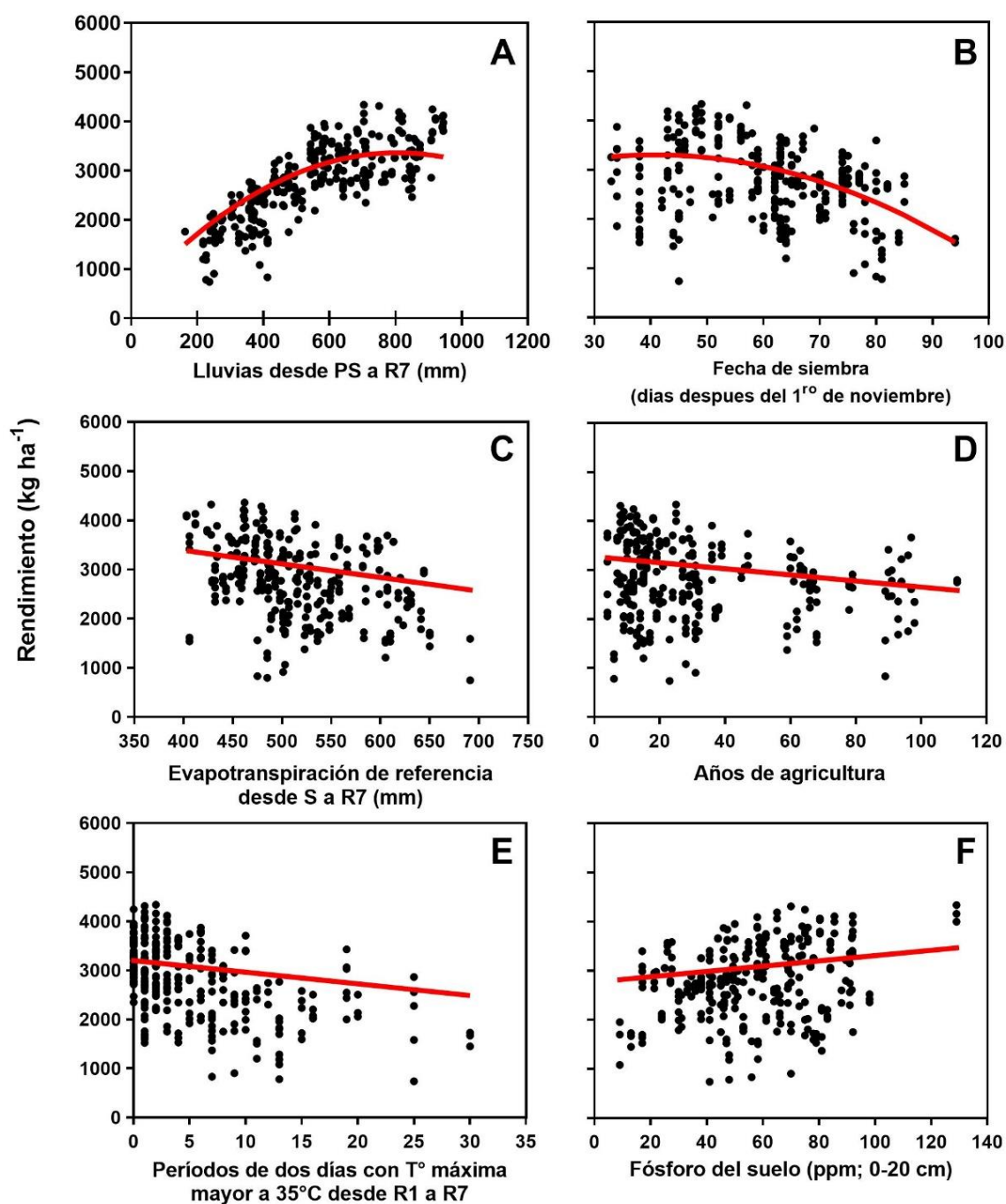


Figura 5. Relación entre rendimiento de soja y lluvias desde 30 días pre-siembra (PS) a R7 (Fig. 5A), fecha de siembra (Fig. 5B), evapotranspiración de referencia desde siembra (S) a R7 (Fig. 5C), años de agricultura (Fig. 5D), períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7 (Fig. 5E), y fósforo del suelo (Fig. 5F). La línea roja refleja el β_+ para cada predictor. El efecto aleatorio fue restado a los rendimientos observados. Los predictores fueron ordenados en orden decreciente de la magnitud de su efecto en base a los valores z.

Interacciones del grupo de madurez con el manejo y el ambiente (objetivo específico II)

En el segundo análisis se evaluaron posibles diferencias en la respuesta en rendimiento de GM ante cambios en variables de manejo y ambientales en 27 ensayos. En estos ensayos el rendimiento promedio varió desde 1596 a 4538 kg.ha⁻¹ entre sitios (Fig. 6). El rango de variación de los valores de las diferentes variables de manejo y ambientales exploradas fue similar el descrito en la Tabla 1 y Tabla A1 del anexo.

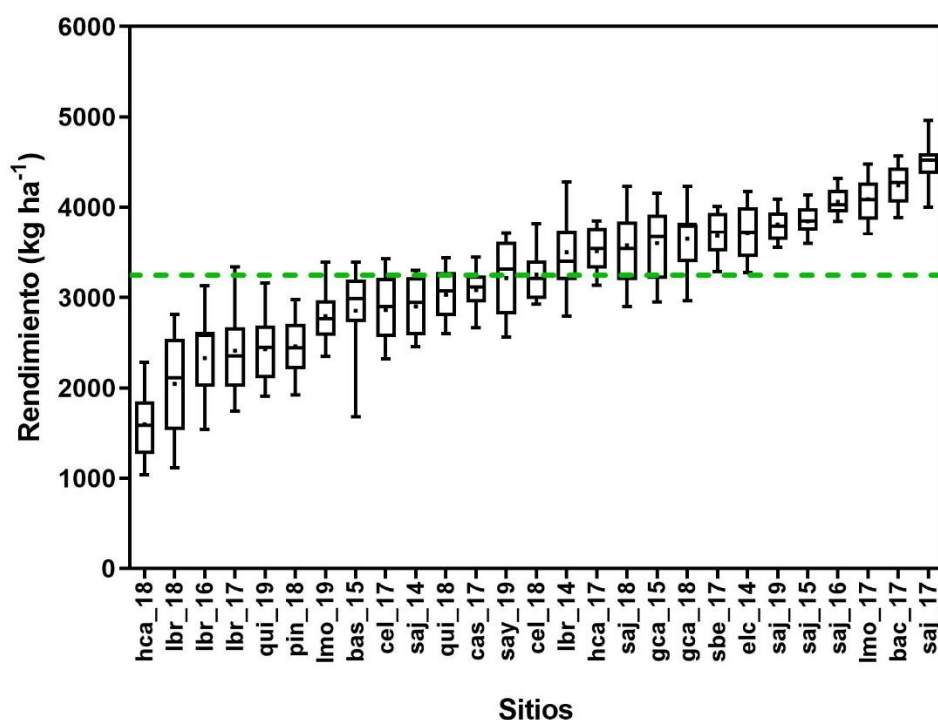


Figura 6. Rendimiento explorado en cada uno de los 27 ensayos considerados en el segundo análisis, donde se evaluaron genotipos pertenecientes a grupos de madurez V, VI, VII y VIII. La línea discontinua verde indica el rendimiento promedio a través de todos los sitios.

El análisis exploratorio de los datos sobre la interacción del GM con las variables de manejo y del ambiente analizadas sugirió que las variables explicativas que interactuaron con el GM del genotipo fueron fecha de siembra y materia orgánica del suelo. Las variables ambientales mostraron correlación con la fecha de siembra (ver Anexo Figura A2) o bien el grupo de madurez tuvo un efecto significativo sobre sus valores ($p < 0,001$), y por esta razón fueron excluidas del análisis. El resto de las variables estudiadas no evidenció asociación aparente con el rendimiento.

Para el conjunto de datos el modelo sin efectos fijos mostró que el 75% del total de la variación del rendimiento fue explicada por diferencias entre sitios (Tabla 4). El genotipo explicó el 4% del total de la varianza. La variación residual de este modelo fue de 21% (Tabla 4).

Tabla 4. Componentes de la varianza (CV) de los efectos aleatorios y estimados $\pm$ error estándar (EE) de los efectos fijos para modelos sin y con la influencia del grupo de madurez del genotipo (GM), la materia orgánica del suelo, la fecha de siembra, y sus interacciones con el GM sobre el rendimiento (valores sin estandarizar).

		Modelo sin efectos fijos	Modelo con efectos fijos
<i>Efectos aleatorios</i>		<i>CV</i>	<i>CV</i>
Sitio (S)		509302	411573
Genotipo (G)		27636	17445
Residual		141051	133914
CPV _S		—	19%
CPV _G		—	37%
CPV _{RESIDUAL}		—	5%
<i>Efectos fijos</i>		<i>Estimado $\pm$ EE</i>	<i>Estimado $\pm$ EE</i>
Intercepto ^A		3218 $\pm$ 140	-458 $\pm$ 4886
Fecha de siembra (FS) ^A	β_1	—	113,6 $\pm$ 163,3
	β_2	—	-1,1 $\pm$ 1,3
Materia orgánica del suelo (MOS) ^A		—	405 $\pm$ 226
GM VI		—	1980 $\pm$ 1456
GM VI x FS	β_1	—	-64,5 $\pm$ 49,5
	β_2	—	0,49 $\pm$ 0,40
GM VI x MOS		—	72 $\pm$ 75
GM VII		—	4811 $\pm$ 1472
GM VII x FS	β_1	—	-145,0 $\pm$ 50,3
	β_2	—	1,09 $\pm$ 0,41
GM VII x MOS		—	-76 $\pm$ 77
GM VIII		—	5682 $\pm$ 1720
GM VIII x FS	β_1	—	-168,8 $\pm$ 57,8
	β_2	—	1,19 $\pm$ 0,47
GM VIII x MOS		—	-21 $\pm$ 85
R^2_M			0,38
R^2_C			0,85

^A El GM V es la línea de base.

CPV significa cambio proporcional de la varianza, R^2_M significa R^2 marginal, y R^2_C significa R^2 condicional.

El modelo final, que incluyó todos los efectos fijos e interacciones, mostró un CIA menor que el modelo sin efectos fijos (19233 vs. 19303 para los modelos con y sin efectos fijos, respectivamente; $p < 0,001$), indicando la mejora del modelo luego de haber incluido estas variables. La inclusión de los efectos fijos contribuyó a que la varianza del rendimiento explicada por el sitio disminuya un 19% (CPV_A). La variación del rendimiento explicada por el genotipo y la residual disminuyeron en un 37 y 5%, respectivamente (CPV_G y $CPV_{RESIDUAL}$; Tabla 4). El modelo final mostró que se describió adecuadamente la variación del rendimiento, explicando los efectos fijos un 38% de la varianza total (R^2_M), y el modelo completo explicando un 85% de la misma (R^2_C).

Mientras que la inclusión del GM como efecto fijo mostró que el 37% de la variación del rendimiento entre genotipos estuvo relacionada con la duración del su ciclo, hubo aún una importante variación del rendimiento entre genotipos que no estuvo relacionada con su GM. La duración del ciclo del cultivo (S a R7) en fechas de siembra tempranas (ej. 10 de diciembre) fue de 105-110 a 120-125 días para los GM V largo a VIII medio. El retraso en la fecha de siembra (ej. 10 de enero) generó un acortamiento de los ciclos, los cuales fueron de 95-100 días para GM más cortos y 105-110 para GM más largos. Los GM más largos (VII y VIII) acortaron más su ciclo que los GM V y VI, especialmente la etapa S a R1.

Los efectos genotípicos aleatorios (Tabla A4 en el anexo) mostraron que la diferencia de rendimiento entre el genotipo de mayor y menor rendimiento fueron de 396, 412, 419 y 345 $kg \cdot ha^{-1}$ para GM V, VI, VII, y VIII, respectivamente. Esto indicó que la elección de genotipos dentro de cada GM es necesaria para optimizar el manejo del cultivo.

Los efectos fijos mostraron que la fecha de siembra tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento (Fig. 7A). La interacción fecha de siembra x GM ($p < 0,05$) indicó que la fecha de siembra óptima (95% del máximo rendimiento para cada GM) fue hasta el 19 de diciembre para GM VIII, 21 de diciembre para GM VII, 28 de diciembre para GM VI, y 3 de enero para GM V. Con fechas de siembra tempranas el rendimiento de los GM VI, VII y VIII fue mayor que el de los GM V (Fig. 7A), mientras que el retraso de la fecha de siembra causó mayores reducciones del rendimiento en GM VIII en comparación con los demás GM (Fig. 7A). La disminución del rendimiento entre la fecha de siembra límite dentro del rango óptimo para cada GM y la última fecha de siembra explorada fue de 1515, 1054, 880, y 842 $kg \cdot ha^{-1}$ para GM VIII, VII, VI, y V, respectivamente.

La materia orgánica del suelo tuvo un efecto positivo sobre el rendimiento que interactuó con el GM ($p < 0,001$; Fig. 7B). Los GM mostraron diferente respuesta ante incrementos en los niveles de materia orgánica. La mayor respuesta en rendimiento se observó en los GM V y VI, mostrando un incremento de 405 y 477 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ por cada 1% de materia orgánica del suelo (Tabla 4). Esta respuesta fue menor para los GM VII y VIII, siendo de 328 y 383 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ por cada 1% de materia orgánica, respectivamente (Tabla 4). Este resultado indica una ventaja comparativa de GM cortos (V y VI) ante mejoras en la calidad del suelo.

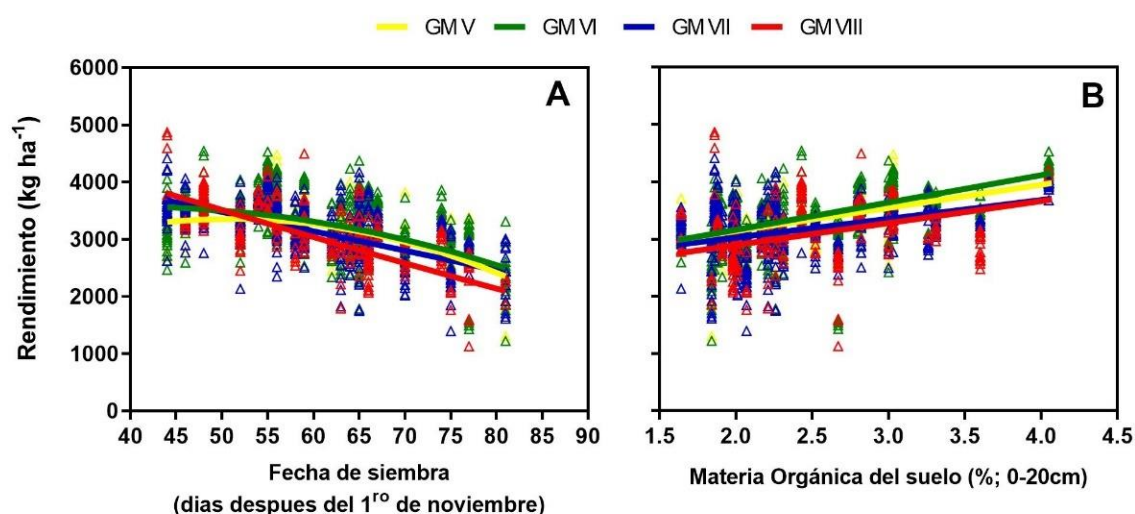


Figura 7. Relación entre rendimiento y fecha de siembra (días después del 1^{ro} de noviembre; Fig. 7A) o materia orgánica del suelo (%; 0-20 cm; Fig. 7B) para grupos de madurez (GM) V, VI, VII, y VIII. Los datos están representados en color amarillo para GM V, verde para GM VI, azul para GM VII, y rojo para GM VIII. Las líneas muestran los $\beta+$ para cada predictor. Los efectos aleatorios fueron sustraídos de los datos de rendimiento observados.

DISCUSIÓN

La presente tesis permitió identificar predictores claves para el rendimiento de soja, y cuantificar la magnitud de su efecto, en la región NEA. En base a la bibliografía disponible este es el primer análisis que aborda estos objetivos para el manejo de soja en el NEA. Aramburu Merlos et al. (2015) encontraron que la brecha productiva respecto al rendimiento limitado por agua en el cultivo de soja se ubica alrededor del 40% en la región, mostrando que existe un espacio para mejorar los rendimientos actuales de los productores a través de ajustes de manejo. Cuando se analizó la variabilidad de rendimiento de un único genotipo a lo largo de un amplio gradiente temporal y espacial, los resultados mostraron que dos variables del manejo fueron claves en la determinación del rendimiento del cultivo de soja, la fecha de siembra y el fósforo del suelo.

La fecha de siembra fue identificada como la variable de manejo más importante en la determinación del rendimiento del cultivo de soja en la región. El período o ventana de siembra óptima para maximizar el rendimiento fue desde inicios a fines de diciembre. Retrasos a partir de esta fecha mostraron reducciones del rendimiento de $43 \text{ kg.ha}^{-1} \text{ día de atraso}^{-1}$. En Brasil en latitudes similares, se han reportado menores pérdidas de rendimiento ($26 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$) pero para retrasos posteriores al 4 de noviembre (Zanon et al., 2016). En nuestra región de estudio, no son habituales fechas de siembra más tempranas (noviembre) debido a que los productores retrasan la fecha de siembra hasta diciembre para evitar que el período de determinación del número de granos (R1-R3) ocurra durante enero e inicio de febrero, cuando son comunes elevadas temperaturas y balances híbridos negativos (Maddonni, 2012; Herrera, 2009). En latitudes mayores (37° sur) se han reportado mayores pérdidas de rendimiento ($56 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$) por retrasos en la siembra en fechas de siembra similares a las exploradas en el presente estudio (Calviño et al., 2003). Una probable explicación a esta diferencia es que la disminución en los niveles de radiación solar, el fotoperíodo y la temperatura durante los estadios reproductivos en fechas de siembra tardías es menos marcada en nuestra región de estudio (26° a 30° sur) que en latitudes mayores (Andrade y Satorre, 2015).

El fósforo es un nutriente clave para el crecimiento de la soja (Calviño y Sadras, 1999), cuyos niveles críticos en suelo para Argentina oscilan entre 5,7 y 17,7 ppm a 20 cm de profundidad dependiendo de la textura del suelo y el potencial de rendimiento (Correndo et al., 2018). Sorprendentemente, se encontró respuesta positiva al aumento del nivel de fósforo de los suelos, a pesar de los elevados niveles de fósforo

de suelo determinados en los ensayos (en el 98% de los ensayos los valores de fósforo fueron superiores a 17 ppm en la profundidad de 0 a 20 cm).

Las prácticas de manejo que no mostraron significancia estadística en la determinación del rendimiento en la región de estudio fueron el tipo de cultivo (soja de primera o de segunda), pH del suelo, densidad de siembra y años en siembra directa. El hecho de que el tipo de cultivo no haya sido incluido entre los predictores más relevantes en los modelos es contrastante respecto a lo estudiado en otras regiones productivas de Argentina (Di Mauro et al., 2018). En nuestra región de estudio la fecha de siembra de la soja de primera y la soja de segunda son similares, por lo que no hay reducción del rendimiento por atraso en la fecha de siembra en soja de segunda comparada con soja de primera, como es común observar en otras regiones. Además, la ausencia de diferencias estadísticas de rendimiento entre tipos de cultivo podría estar explicada por escasas o nulas diferencias en la disponibilidad de agua a la siembra entre ellos. Esto tiene dos posibles causas, el limitado consumo de agua asociado al bajo rendimiento del cultivo antecesor observado en la región ($\sim 1600 \text{ kg.ha}^{-1}$ para trigo, el antecesor más común; MAGYP, 2019), y el prolongado período (uno o dos meses) entre la cosecha del trigo (fin de octubre e inicio de noviembre) y la siembra del cultivo de soja, que permite la recarga del perfil de suelo con las lluvias de primavera previamente a la siembra de la soja de segunda. Este resultado sugiere que es posible intensificar el uso del suelo durante el período invernal, con cultivos de grano o de servicios, sin tener un impacto negativo significativo en el rendimiento de soja, incrementando el aprovechamiento de los recursos ambientales durante el período invernal, el secuestro de carbono y la diversidad de los sistemas, contribuyendo con su sostenibilidad (Lal, 2019).

El impacto negativo directo de años de agricultura sobre el rendimiento de soja es, en base a la bibliografía consultada, la primera vez en ser reportado. La región de estudio ha sufrido elevadas tasas de deforestación a gran escala durante los últimos 30 años (Piquer-Rodríguez et al., 2015; Vallejos et al., 2015; Volante et al., 2016), y en base a estos resultados se pone en evidencia que los actuales sistemas de producción están llevando a un deterioro de los suelos, el cual está teniendo un impacto directo en el desempeño de los cultivos. Esta relación puede ser explicada a través del impacto negativo de los años de agricultura sobre la materia orgánica del suelo o la densidad aparente, entre otras propiedades (Baldassini y Paruelo, 2020; Osinaga et al., 2018; Villarino et al., 2017), que han sido reportadas como factores relevantes en la determinación del rendimiento de soja (Kravchenko y Bullock, 2000; Pereira et al., 2018). En la presente tesis también se encontró un impacto negativo de los años de agricultura sobre la materia orgánica del suelo ($r: -0,55$; $p < 0,001$). En base a estos

resultados, se plantea la necesidad de un cambio en los actuales esquemas de producción, de modo tal que permitan prevenir o revertir (dependiendo del caso) los procesos de deterioro de los suelos para mantener o mejorar su capacidad productiva a lo largo del tiempo, una de las bases de la agricultura sostenible (FAO, 2015).

Las lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7 fue la variable climática más importante en la determinación del rendimiento de soja en la región. En base al modelo final, son necesarios al menos 612 mm para maximizar el rendimiento. Esta cantidad es similar a la reportada para maximizar el rendimiento de soja por otros autores en la región templada de argentina (600 mm; Andrade y Satorre, 2015) y en el cinturón maicero de Estados Unidos (650 mm; Grassini et al., 2015), pero diferente a la reportada como necesaria para similares latitudes en Brasil (800 mm; Zanon et al., 2016). El rango explorado de evapotranspiración de referencia desde siembra a R7 (403 a 691 mm) está en concordancia con estudios previos en esta región (Morábito et al., 2015), y su correlación negativa con el rendimiento es razonable debido a que el incremento en la evapotranspiración de referencia está asociada a mayor déficit de presión de vapor (Zhou et al., 2014) el cuál se correlaciona negativamente con la eficiencia de uso del agua (Abbate et al., 2004). El impacto negativo encontrado de breves períodos de estrés térmico durante estadios reproductivos (número de períodos de dos días consecutivos con temperaturas máximas mayores a 35°C desde R1 a R7) sobre el rendimiento se encuentra en concordancia por lo observado por otros autores (Prasad et al., 2008; Siebers et al., 2015). Por ejemplo, Casali et al. (2018) recientemente informaron la influencia de estrés térmico sobre el rendimiento de maíz en la misma región de estudio.

Una de las limitantes de este análisis es la falta de datos respecto a los posibles efectos relacionados con la presencia de napas interactuando con los cultivos de soja de la región, tanto respecto a la profundidad como a la calidad de su agua. Una de las consecuencias de la deforestación ha sido el ascenso de las napas en los últimos años (Giménez et al., 2016; Nasetto et al., 2012; Santoni et al., 2010), las que están actualmente interactuando con los cultivos con diversos efectos según su profundidad y calidad. Es conocido que las napas tienen un fuerte impacto sobre el rendimiento de soja (Nasetto et al., 2009; Vitantonio-Mazzini et al., 2021), y dada la evidente importancia de factores relacionados con la disponibilidad de agua, como la lluvia y la evapotranspiración, el impacto de la napa y su interacción con otras variables debería ser evaluado en trabajos futuros.

El análisis también mostró que las interacciones entre el GM de la soja con la fecha de siembra y con la materia orgánica del suelo son importantes en la determinación del rendimiento. Los resultados demuestran que la elección del GM del

genotipo debe ser hecha en base a la fecha de siembra, y que los GM intermedios y cortos permiten reducir las pérdidas de rendimiento por atraso en la fecha de siembra respecto a GM largos. También se encontró una respuesta diferencial entre GM al contenido de materia orgánica del suelo, que resultó en un mejor desempeño de los GM V y VI en los ambientes de mayor contenido de materia orgánica. La mejora de la calidad de los suelos asociada con niveles crecientes de materia orgánica (Reeves, 1997) fue también más beneficiosa para GM más cortos en otras regiones de Argentina (Vega y Salas, 2012). El rango de respuesta en rendimiento al incremento en los niveles de materia orgánica (328 a 477 kg.ha⁻¹ por cada 1% de materia orgánica) fue similar al encontrado por Bacigaluppo et al. (2011) en la región central de producción de soja de Argentina (332 a 435 kg.ha⁻¹ por cada 1% de materia orgánica). A su vez, los resultados también mostraron que la elección del genotipo dentro de cada GM es una decisión de manejo clave, en concordancia con otros estudios (de Felipe et al., 2016; Pardo et al., 2015; Specht y Williams, 1984). Los resultados encontrados permiten orientar la toma de decisión sobre prácticas de manejo, como fecha de siembra y elección de genotipo, que, sin implicar un mayor costo de producción, permiten optimizar la producción del cultivo en la región.

Finalmente, estos resultados no solamente son relevantes para ajustar prácticas de manejo y optimizar los rendimientos del cultivo de soja, sino también para promover la sostenibilidad de los sistemas de producción. Alcanzar mayores rendimientos de soja, además de impactar directamente en el aporte de carbono (vía residuos de cosecha y raíces) a los suelos, es también clave para incrementar los ingresos de los productores, su competitividad y su capacidad para invertir en opciones de manejo orientadas a mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos (Siebrecht, 2020). Un ejemplo es la posibilidad de invertir en incluir cultivos de cobertura en las rotaciones, incluir cultivos menos rentables (como trigo, maíz o sorgo), o fertilizar para reponer los nutrientes extraídos por los cultivos. Además, el hecho de que la inclusión de un cultivo de renta invernal no generó un impacto negativo significativo en el rendimiento, abre las puertas para explorar alternativas de intensificación estratégica, con cultivos de renta o de cobertura, durante el período invernal que aporten diversidad a las rotaciones, incrementen los aportes de carbono y contribuyan a la conservación de los suelos, aportando así a la sostenibilidad de los sistemas de producción regionales.

La optimización del manejo de soja y el incremento de los niveles de sustentabilidad de los sistemas de producción son claves no solo para los productores sino para toda la cadena de producción y comercialización.

CONCLUSIONES

Se identificaron variables de manejo y del ambiente que impactan sobre el rendimiento de soja en la región NEA de Argentina. También se exploraron las variables que interactúan con el GM del genotipo. En esta región, la optimización del manejo del cultivo y la reducción de las actuales brechas de rendimiento son necesarias, y estudios orientados a ajustar decisiones de manejo no estaban disponibles.

Decisiones de manejo relacionadas con la elección del genotipo, la fecha de siembra y el fósforo del suelo, son claves para maximizar el rendimiento del cultivo. La elección del GM del genotipo debe ser realizada en función de la fecha de siembra y el contenido de materia orgánica del suelo. Grupos de madurez más largos superaron a los más cortos en fechas de siembra tempranas, mientras que en fechas de siembra tardías los GM más cortos mostraron mejor desempeño. Los GM cortos superaron en rendimiento a los largos en lotes con mayores niveles de materia orgánica del suelo. Las variables ambientales como lluvias y evapotranspiración de referencia durante el ciclo del cultivo, y períodos de estrés térmico durante estadios reproductivos, son predictores relevantes para el rendimiento del cultivo de soja en la región NEA.

El impacto negativo de los años de agricultura de cada lote sobre el rendimiento de soja está evidenciando una disminución en la productividad del suelo a través de los años. Esto remarca la necesidad de diseñar alternativas de manejo orientadas a mantener o mejorar la capacidad productiva de los suelos. La optimización en el manejo del cultivo de soja permitiría alcanzar mayores rendimientos, lo que a su vez debería incrementar la capacidad de los productores de incurrir en nuevas inversiones, como incluir cultivos de servicios en sus rotaciones, o incrementar la superficie destinada a maíz y sorgo, llevando a sistemas de producción más resilientes y sustentables.

Contrastes de hipótesis planteadas

La primera hipótesis plantea que los años desde el inicio de la agricultura tienen influencia en el rendimiento del cultivo de soja en el NEA. Esta hipótesis es aceptada, siendo que los años desde inicio de la agricultura fue una de las variables predictoras relevantes en la determinación del rendimiento de soja en la región, con un efecto negativo sobre el mismo.

Se rechaza la segunda hipótesis que postula que el aumento del nivel de cobertura de rastrojo del suelo tiene un impacto positivo en el rendimiento. En el

análisis exploratorio inicial no mostró ningún tipo de relación con el rendimiento, y si bien tuvo cierta asociación con el tipo de cultivo antecesor (soja 1ra o soja 2da), esta última variable tampoco fue identificada dentro de las variables más importantes.

La tercera hipótesis afirma que las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y las temperaturas máximas promedio son los factores de mayor impacto en el rendimiento del cultivo de soja en el NEA. Esta hipótesis se rechaza. Las lluvias desde 30 días antes de la siembra hasta R7 mostraron una mayor relación con el rendimiento del cultivo que las lluvias desde la siembra a R7 en el análisis exploratorio inicial, por ello la primera fue incluida en los análisis posteriores, donde se identificó como la variable de mayor relevancia. Entre las variables relacionadas con temperaturas máximas, el número de períodos de dos días con más 35°C de temperaturas máximas desde R1 a R7 mostró una mejor relación con el rendimiento que las temperaturas máximas promedio para cualquiera de los períodos analizados (siembra a R7, siembra a R1 y R1 a R7) en el análisis exploratorio, y por eso fue incluida los análisis posteriores. A su vez, las demás variables del ambiente incluidas (lluvias desde 30 días antes de la siembra a R7, evapotranspiración de referencia desde siembra a R7, y años de agricultura) tuvieron mayor relevancia en la determinación del rendimiento que el número de períodos de dos días con más de 35°C de temperatura máxima desde R1 a R7.

Se acepta la cuarta hipótesis, que postula que la fecha de siembra y la elección del GM son, entre las variables de manejo, las dos de mayor impacto en el rendimiento del cultivo de soja en el NEA. En el primer análisis la fecha de siembra fue la variable de manejo de mayor impacto en la determinación de rendimiento. El segundo análisis mostró que la variación de rendimiento en función de la elección de fecha de siembra y GM es mayor que la observada según el nivel de materia orgánica y grupo de madurez, dentro de los rangos explorados para cada variable.

Perspectivas para futuras líneas de investigación

Los resultados obtenidos en la presente tesis permitieron identificar algunos aspectos relevantes tanto del manejo del cultivo de soja, así como del ambiente de producción, que abren las puertas a nuevos interrogantes para futuras líneas de investigación en el noreste argentino.

Por un lado, la caída en los niveles productivos asociada a cantidad de años en agricultura y al contenido de materia orgánica de los suelos, pone de manifiesto la pérdida progresiva de la capacidad productiva de los suelos de la región. En este sentido, son necesarios estudios que establezcan criterios para el diseño de nuevos

sistemas de producción que permitan mantener o mejorar la capacidad productiva de los suelos.

La importancia productiva de los factores relacionados con la dinámica del agua en los sistemas abre, al menos, dos posibles líneas de trabajo. Por un lado, dado el incremento de nivel de las napas en algunas zonas de la región NEA, sería importante profundizar los estudios para ajustar el manejo del cultivo en función de la profundidad y calidad de la napa; así como estudios orientados a establecer criterios para entender y manejar la napa a nivel de cuencas y evitar pérdidas productivas por anegamiento de grandes áreas en esta región. Por otro lado, sería relevante desarrollar estudios orientados a ajustar estrategias de manejo que permitan mejorar la captura, conservación y utilización del agua en los sistemas productivos.

El impacto positivo de la disponibilidad de fósforo sobre el rendimiento de soja, encontrándose el mismo en niveles iguales o superiores a los umbrales de referencia a nivel país, invita a profundizar los estudios incorporando variables relacionadas con la calidad estructural de los suelos que puedan estar limitando el aprovechamiento del fósforo disponible por el cultivo de soja y otros cultivos.

Por último, dado que las fechas de siembra tardías tienen un marcado impacto en el rendimiento, y que en la región NEA son habituales retrasos en la misma por fuera de la ventana óptima (por sequía, anegamiento, sojas sembradas sobre girasoles o maíces en la misma estación de crecimiento) sería importante ajustar otras prácticas de manejo además del grupo de madurez, como el espaciamiento y la densidad de siembra, que permitan reducir este impacto negativo sobre la producción.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P.E., Dardanelli, J.L., Cantarero, M.G., Maturano, M., Melchiori, R.J.M., Suero, E.E., 2004. Climatic and Water Availability Effects on Water-Use Efficiency in Wheat. *Crop Sci.* 44, 474–483.
- Aho, K., Derryberry, D., Peterson, T., 2014. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology* 95, 631–636. <https://doi.org/10.1890/13-1452.1>.
- Aizen, M., Garibaldi, L., Dondo, M., 2009. Soybean expansion and agriculture diversity in Argentina. *Ecol. Austral* 19, 45–54.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S., 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43, 1–34.
- Andrade, J.F., Satorre, E.H., 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *F. Crop. Res.* 177, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.008>
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercu, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *F. Crop. Res.* 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Ashley, D.A., Ethridge, W.J., 1978. Irrigation Effects on Vegetative and Reproductive Development of Three Soybean Cultivars 1. *Agron. J.* 70, 467–471. <https://doi.org/10.2134/agronj1978.00021962007000030026x>
- Bacigaluppo, S., Bodrero, M.L., Balzarini, M., Gerster, G.R., Andriani, J.M., Enrico, J.M., Dardanelli, J.L., 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Eur. J. Agron.* 35, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.001>
- Baker, J.T., Allen, L.H., Boote, K.J., Jones, P., Jones, J.W., 1989. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. *Crop Sci.* 29, 98–105. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010024x>
- Baldassini, P., Paruelo, J.M., 2020. Deforestation and current management practices reduce soil organic carbon in the semi-arid Chaco, Argentina. *Agric. Syst.* 178, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102749>
- Baldi, G., Jobbágy, E.G., 2012. Land use in the dry subtropics: Vegetation composition and production across contrasting human contexts. *J. Arid Environ.* 76, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.08.016>

- Barret, A., 2019. Long-term world soybean outlook. En United States Soybean Export Council, <https://ussoy.org/long-term-world-soybean-outlook/> (Ultimo acceso agosto 2020).
- Barton, K., 2018. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.43.6. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn> (Ultimo acceso Marzo 2020).
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2013. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1-21. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4> (Ultimo acceso Marzo 2020).
- Boetto, M., Duffau, R., 1982. Informe final de los estudios edafológicos efectuados en el área comprendida entre las Localidades de La Paloma-Taboada-Selva, año 1978/1980. Santiago del Estero.
- Boote, K.J., Allen, L.H., Prasad, P.V. V., Baker, J.T., Gesch, R.W., Snyder, A.M., Pan, D., Thomas, J.M.G., 2005. Elevated Temperature and CO₂ Impacts on Pollination, Reproductive Growth, and Yield of Several Globally Important Crops. *J. Agric. Meteorol.* 60, 469–474. <https://doi.org/10.2480/agrmet.469>
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci.* 59, 39–46. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Bucher, E.H., 1982. Chaco and Caatinga – South American arid Savannas. En: *Woodlands and Tickets*. Huntley B.J. y Walker B.H. (eds), pp. 48–80. Springer, Berlin.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., Huyvaert, K.P., 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65, 23–35.
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., 1999. Interannual variation in soybean yield: Interaction among rainfall, soil depth and crop management. *F. Crop. Res.* 63, 237–246. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00040-4)
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *F. Crop. Res.* 83, 67–77. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00062-5)
- Casali, L., Rubio, G., Herrera, J.M., 2018. Drought and temperature limit tropical and temperate maize hybrids differently in a subtropical region. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0516-4>
- Correndo, A., Salvagiotti, F., Garcia, F., Gutierrez Boem, F., 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. Primer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión, Santiago de Chile, 11 al 13 de abril.

- de Felipe, M., Gerde, J.A., Rotundo, J.L., 2016. Soybean genetic gain in maturity groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Sci.* 56, 3066–3077. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0214>
- Di Mauro, G., Borrás, L., Rugeroni, P., Rotundo, J.L., 2019. Exploring soybean management options for environments with contrasting water availability. *J. Agron. Crop Sci.* 205, 274–282. <https://doi.org/10.1111/jac.12321>
- Di Mauro, G., Cipriotti, P.A., Gallo, S., Rotundo, J.L., 2018. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *Eur. J. Agron.* 99, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.012>
- Egli, D.B., Cornelius, P.L., 2009. A regional analysis of the response of soybean yield to planting date. *Agron. J.* 101, 330–335. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0148>
- Espino, L.M., Seveso, M.A., Sabatier, M.A., 1983. Mapa de suelos de provincia de Santa Fe, vol. 2. MAGSF - INTA.
- FAO, 2015. Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3940s/i3940s.pdf>. (Último acceso agosto 2021).
- FAO, 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). <http://www.fao.org/faostat/> (Último acceso Marzo 2020).
- Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N.I., Piquer-Rodríguez, M., Gavier-Pizarro, G., Kuemmerle, T., 2017. The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco. *Glob. Environ. Chang.* 45, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.05.001>
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S., 1971. Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine Max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11, 929–931. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>
- Gambin, B.L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L.A., 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric. Syst.* 146, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.03.011>
- GeoINTA. Infraestructura de Datos Espaciales del INTA. <http://www.geointa.inta.gob.ar>. (Último acceso Marzo 2021).
- Gibson, L.R., Mullen, R.E., 1996. Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Sci.* 36, 98–104. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010018x>
- Giménez, R., Mercau, J., Nasetto, M., Páez, R., Jobbágy, E., 2016. The ecohydrological imprint of deforestation in the semiarid Chaco: insights from the

- last forest remnants of a highly cultivated landscape. *Hydrological Processes*, 30, 2603-2616. <https://doi.org/10.1002/hyp.10901>
- Goldman, I.L., Carter, T.E., Patterson, R.P., 1989. Differential genotypic response to drought stress and subsoil aluminum in soybean. *Crop Sci.* 29, 330–334. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900020020x>
- Goñi, U., 2018. Soy destruction in Argentina leads straight to our dinner plates. *The Guardian*, October 26. <https://www.theguardian.com/environment/2018/oct/26/> (Ultimo acceso Enero 2020).
- Grassini, P., Torrión, J.A., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G., Specht, J.E., 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *F. Crop. Res.* 179, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>
- Hansen, M.C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *Appl. Engeneering Agric.* 8, 96–99.
- Hatfield, J.L., Walthall, C.L., 2015. Meeting global food needs: Realizing the potential via genetics × environment × management interactions. *Agron. J.* 107, 1215–1226. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0076>
- Herrera, G.A., 2009. Parámetros climáticos de la estación meteorológica de INTA Las Breñas. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-clima_eea_lb.pdf (Ultimo acceso Marzo 2021).
- Klingebiel, A.A., Montgomery, P.H., 1961. Land-capability classification. Soil conservation service, USDA. Agriculture Handbook No. 210.
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92, 75–83. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x>
- Laflen, J.M., Amemiya, M., Hintz, E.A., 1981. Measuring crop residue cover. *J. soil Water Conserv.* 36, 341–343.
- Lal, R., 2019. Eco-intensification through soil carbon sequestration: Harnessing ecosystem services and advancing sustainable development goals. *J. Soil Water Conserv.* 74, 55A-61A.
- Ledesma, L., Zurita, J., 1995. Los suelos de la Provincia del Chaco, 1ra. ed. Convenio Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Ministerio de la Producción de la Provincia del Chaco.

- Maddonni, G.A., 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107, 325–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>
- MAGYP, 2019. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Estimaciones agrícolas. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>. (Ultimo acceso Marzo 2021).
- Masino, A., Rugeroni, P., Borrás, L., Rotundo, J.L., 2018. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. *Eur. J. Agron.* 98, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.02.006>
- Mendiburu, F.D., 2017. agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R Package Version 1.2-8. <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae> (Ultimo acceso Marzo 2020).
- Merlo, J., Yang, M., Chaix, B., Lynch, J., Råstam, L., 2005. A brief conceptual tutorial on multilevel analysis in social epidemiology: investigating contextual phenomena in different groups of people. *J. Epidemiol. Community Heal.* 59, 729–736.
- Ministerio de Planificación y Economía de Chaco, 2019. Chaco en cifras. <http://estadisticas.chaco.gob.ar/wp-content/uploads/2021/01/Chaco-en-cifras-2019-.pdf> (Ultimo acceso Marzo 2021).
- Monitoreo de deforestación en el Chaco Seco. <http://www.monitoreodesmonte.com.ar/>. Ultimo acceso Marzo 2021)
- Morábito, J., Salatino, S., Hernández, R., Schilardi, C., Álvarez, A., Palmieri, P.R., 2015. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las Provincias del centro-noreste de Argentina. *Rev. la Fac. Ciencias Agrar.* 47, 109–125.
- Mosconi, F.P., Priano, L.J.J., Hein, N.E., Moscatelli, G., Salazar, J.C., Gutiérrez, T., Cáceres, L., 1981. Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe, vol. 1. MAGSF-INTA.
- Mourtzinis, S., Gaspar, A.P., Naeve, S.L., Conley, S.P., 2017. Planting date, maturity, and temperature effects on soybean seed yield and composition. *Agron. J.* 109, 2040–2049. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0247>
- Nakagawa, S., Schielzeth, H., 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods Ecol. Evol.* 4, 133–142. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x>
- Nakazawa, M., 2014. fmsb: functions for medical statistics book with some demographic data. R package version 0.5.1. <http://CRAN.R-project.org/package=fmsb> (Ultimo acceso Marzo 2020).
- NASA-POWER. Prediction Of Worldwide Energy Resources Project. <https://power.larc.nasa.gov/>. (Ultimo acceso Diciembre 2019)

- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., Jackson, R.B., 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.008>
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Sznaider, G.A., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *F. Crop. Res.* 113, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.016>
- Osinaga, N.A., Álvarez, C.R., Taboada, M.A., 2018. Effect of deforestation and subsequent land use management on soil carbon stocks in the South American Chaco. *SOIL* 4, 251–257. <https://doi.org/10.5194/soil-4-251-2018>
- Pardo, E.M., Vellicce, G.R., Aguirrezabal, L., Pereyra Irujo, G., Rocha, C.M.L., García, M.G., Prieto Angueira, S., Welin, B., Sanchez, J., Ledesma, F., Castagnaro, A.P., 2015. Drought tolerance screening under controlled conditions predicts ranking of water-limited yield of field-grown soybean genotypes. *J. Agron. Crop Sci.* 201, 95–104. <https://doi.org/10.1111/jac.12106>
- Pereira, J.O., de Melo, D., Richard, G., Defossez, P., Silva, S.L., de Oliveira, F.A., Batista, R.O., Garcia, A.R.G., 2018. Yield of soybean crop in function of soil compaction affected by tillage system on Oxisol of subtropical region. *Aust. J. Crop Sci.* 12, 227–234. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.02.pne675>
- Petrzelka, P., Korsching, P.F., Malia, J.E., 1996. Farmers' Attitudes and Behavior toward Sustainable Agriculture. *J. Environ. Educ.* 28, 38–44.
- Piquer-Rodríguez, M., Torella, S., Gavier-Pizarro, G., Volante, J., Somma, D., Ginzburg, R., Kuemmerle, T., 2015. Effects of past and future land conversions on forest connectivity in the Argentine Chaco. *Landsc. Ecol.* 30, 817–833. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0147-3>
- Prasad, P.V. V., Staggenborg, S.A., Ristic, Z., 2008a. Impacts of Drought and/or Heat Stress on Physiological, Developmental, Growth, and Yield Processes of Crop Plants, en: Ahuja, L.R., Reddy, V.R., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds.), *Response of Crops to Limited Water Understanding and Modeling Water Stress. Advances in Agricultural Systems Modeling*, pp. 301–355. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel1.c11>
- R Core Team, 2018. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>.
- Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Azzari, G., Andrade, J.F., Conley, S.P., Lobell, D., Specht, J.E., Grassini, P., 2020. From sunlight to seed: Assessing limits to solar radiation capture and conversion in agro-ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 280, 107775. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107775>

- Ray, D.K., Ramankutty, N., Mueller, N.D., West, P.C., Foley, J.A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3, 1293–1297. <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>
- Reeves, D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43, 131–167. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00038-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00038-X)
- Rojas, J.M., Prause, J., Sanzano, G.A., Arce, O.E.A., Sánchez, M.C., 2016. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil Tillage Res.* 155, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.010>
- Rubio, G., Lavado, R.S., Pereyra, F.X. (Eds), 2019. *The soils of Argentina*. Springer International Publishing.
- Salmerón, M., Gbur, E.E., Bourland, F.M., Buehring, N.W., Earnest, L., Fritsch, F.B., Golden, B.R., Hathcoat, D., Lofton, J., McClure, A.T., Miller, T.D., Neely, C., Shannon, G., Udeigwe, T.K., Verbree, D.A., Vories, E.D., Wiebold, W.J., Purcell, L.C., 2016. Yield response to planting date among soybean maturity groups for irrigated production in the US Midsouth. *Crop Sci.* 56, 747–759. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.07.0466>
- Santoni, C.S., Jobbágy, E.G., Contreras, S., 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: Role of land use. *WATER Resour. Res.* 46, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2009WR008784>
- Siebers, M.H., Yendrek, C.R., Drag, D., Locke, A.M., Rios Acosta, L., Leakey, A.D.B., Ainsworth, E.A., Bernacchi, C.J., Ort, D.R., 2015. Heat waves imposed during early pod development in soybean (*Glycine max*) cause significant yield loss despite a rapid recovery from oxidative stress. *Glob. Chang. Biol.* 21, 3114–3125. <https://doi.org/10.1111/gcb.12935>
- Siebrecht, N., 2020. Sustainable agriculture and its implementation gap - Overcoming obstacles to implementation. *Sustainability* 12, 3853. <https://doi.org/10.3390/su12093853>
- SIGA-INTA, 2019. Sistema de información y gestión agrometeorológica. sig2.inta.gov.ar/#/. (Último acceso Diciembre 2019).
- Smith, P., Soussana, J.F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K., 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Glob. Chang. Biol.* <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Specht, J.E., Williams, J.H., 1984. Contribution of genetic technology to soybean productivity—Retrospect and prospect, in: Fehr, W.R. (Ed.), Genetic Contributions to Yield Gains of Five Major Crop Plants. Crop Science Society of America, Madison, pp. 49–74. <https://doi.org/10.2135/cssaspecpub7.c3>
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya-An application of classification and regression tree analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 123, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.05.005>
- Torrella, S.A., Ginzburg, R.G., Adámoli, J.M., 2007. Expansión agropecuaria en el Chaco Argentino: Amenazas para la conservación de la biodiversidad, en: Panorama de la ecología de paisajes en Argentina y países sudamericanos. Matteucci, S.D. (ed). INTA-UNESCO, Buenos Aires, Argentina, 53-63.
- USDA-FAS. United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service. <https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade> (Ultimo acceso Marzo 2020).
- Vallejos, M., Volante, J.N., Mosciaro, M.J., Vale, L.M., Bustamante, M.L., Paruelo, J.M., 2015. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: A plot level geo-database from 1976 to 2012. *J. Arid Environ.* 123, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.11.009>
- Van Wart, J., Grassini, P., Cassman, K.G., 2013. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Glob. Chang. Biol.* 19, 3822–3834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12302>
- Vega, C.R.C., Salas, G., 2012. Bases para el manejo del cultivo de soja. In: Baigorri, H.E., Salado Navarro, L.R. (Eds.), El cultivo de soja en Argentina. Agroeditorial, pp. 147-162.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L. V, Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F., 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 17, 959–973. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x>
- Villarino, S.H., Studdert, G.A., Baldassini, P., Cendoya, M.G., Ciuffoli, L., Mastrángelo, M., Piñeiro, G., 2017. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. *Sci. Total Environ.* 575, 1056–1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.175>

- Vitantonio-Mazzini, L.N., Borrás, L., Garibaldi, L.A., Pérez, D.H., Gallo, S., Gambin, B.L., 2020. Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *F. Crop. Res.* 251, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107779>
- Volante, J.N., Mosciaro, M.J., Gavier-Pizarro, G.I., Paruelo, J.M., 2016. Agricultural expansion in the Semiarid Chaco: Poorly selective contagious advance. *Land use policy* 55, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.025>
- Volante, J.N., Paruelo, J.M., 2015. Is forest or Ecological Transition taking place? Evidence for the Semiarid Chaco in Argentina. *J. Arid Environ.* 123, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.04.017>
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wilson, E.W., Rowntree, S.C., Suhre, J.J., Weidenbenner, N.H., Conley, S.P., Davis, V.M., Diers, B.W., Esker, P.D., Naeve, S.L., Specht, J.E., Casteel, S.N., 2014. Genetic gain × management interactions in soybean: II. nitrogen utilization. *Crop Sci.* 54, 340–348. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.05.0339>
- Zanon, A.J., Streck, N.A., Grassini, P., 2016. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. *Agron. J.* 108, 1447–1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>
- Zarrilli, A., 2016. Transformaciones ambientales y producción agroforestal: El Gran Chaco Argentino en el siglo XX. *Revista História*, 16, 53-71
- Zhou, S., Yu, B., Huang, Y., Wang, G., 2014. The effect of vapor pressure deficit on water use efficiency at the subdaily time scale. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5005–5013. <https://doi.org/10.1002/2014GL060741>
- Zhou, T., Du, Y., Ahmed, S., Liu, T., Ren, M., Liu, W., Yang, W., 2016. Genotypic differences in phosphorus efficiency and the performance of physiological characteristics in response to low phosphorus stress of soybean in southwest of China. *Front. Plant Sci.* 7, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01776>
- Zuur, A., Ieno, E.N., Walker, N., Saveliev, A.A., Smith, G.M., 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer Science & Business Media.

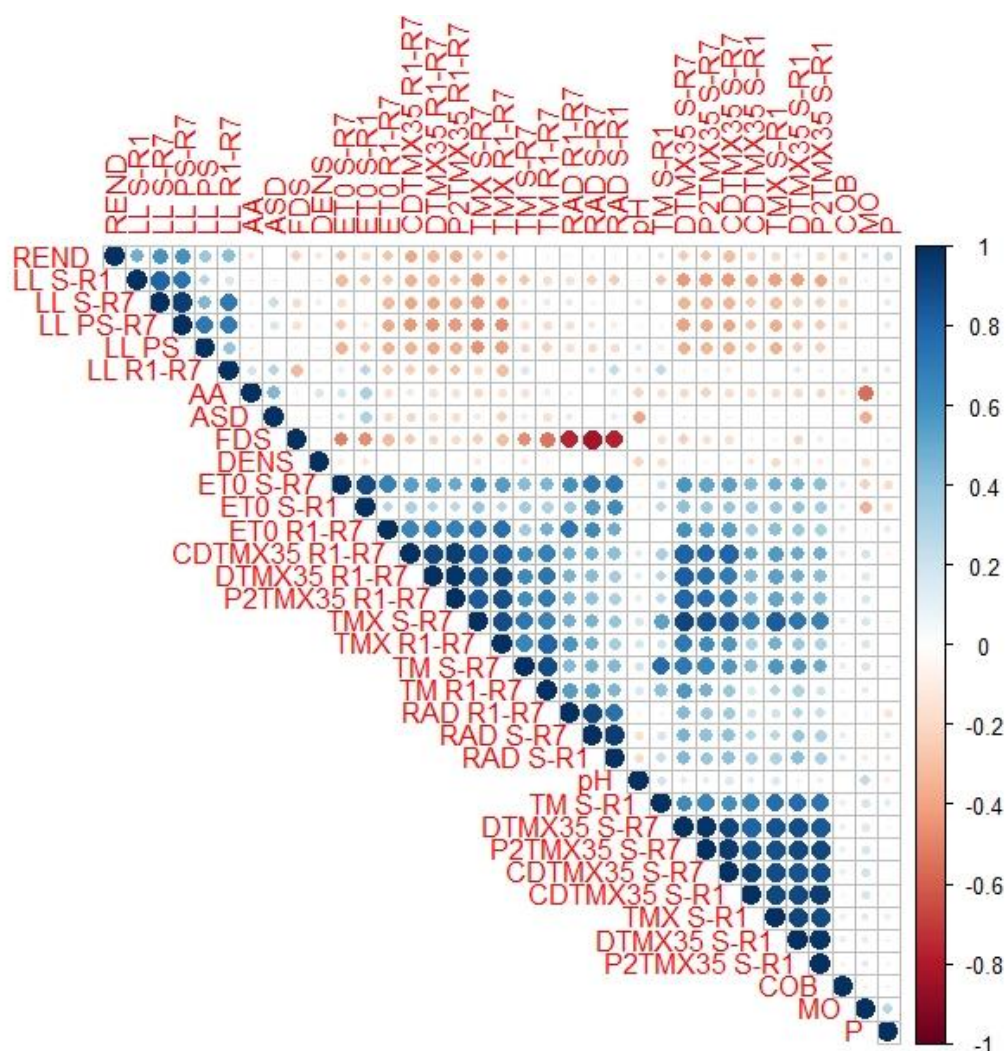
ANEXO

Tabla A1. Rango explorado de cada una de las variables de manejo y del ambiente inicialmente consideradas en el análisis de 106 ensayos para evaluar la potencial influencia de cada variable sobre el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina. (objetivo específico I).

Clase de variable		Variable	Tipo de variable	Unidad	Rango explorado				
Manejo		Tipo de cultivo	Cualitativa		Soja de 1 ^{ra} o 2 ^{da}				
		Fecha de siembra	Cuantitativa	días después del 1 ^{ro} de noviembre	33 - 94				
		Materia orgánica del suelo	Cuantitativa	%	0,96 – 4,08				
		Fósforo del suelo	Cuantitativa	ppm	9 - 129				
		pH del suelo	Cuantitativa		5,7 – 7,6				
		Años en siembra directa	Cuantitativa	años	4 - 21				
		Cobertura de rastrojos	Cuantitativa	%	22 - 100				
		Densidad de siembra	Cuantitativa	semillas m ⁻²	17 - 50				
	Uso de fungicida	Cualitativa	número de aplicaciones	0 - 1 - ≥1					
Ambiente	Suelo	Clase de uso	Cualitativa	Clasificación de clases de suelo	II - III - IV				
		Años de agricultura	Cuantitativa	años	4 - 111				
	Clima	Lluvias	Cuantitativa	mm	S a R1	R1 a R7	S a R7	PS a S	PS a R7
		ET ₀	Cuantitativa	mm	49-565	0-451	114-803	0-314	163-945
		Temperatura máxima promedio	Cuantitativa	°C	221-411	154-298	403-691		
		Temperatura mínima promedio	Cuantitativa	°C	30-38	27-37	29-37		
		Períodos de dos días con temperatura máxima mayor a 35°C entre R1 y R7	Cuantitativa	periodos	25-30	21-28	23-28		
		Grados acumulados por encima de 35°C de temperatura máxima	Cuantitativa	°C	0-42	0-30	1-72		
		Días con temperatura máxima mayor a 35°C	Cuantitativa	días	9-195	0-136	9-328		
		Radiación acumulada	Cuantitativa	MJ m ⁻²	6-50	0-36	7-86		
					1077-1659	663-1159	1786-2802		

Las variables climáticas están reportadas para diferentes períodos. PS se refiere a período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra hasta la siembra), S a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica (Fehr et al., 1971), y ET₀ a evapotranspiración de referencia.

Figura A1. Matriz de correlaciones de Pearson de todas las variables consideradas inicialmente y rendimiento para el primer análisis (objetivo específico I). Colores azules indican correlación positiva y rojos correlación negativa; la intensidad del color y el tamaño del punto indican el valor de la correlación (r).



Las variables climáticas están reportadas para diferentes períodos. PS se refiere a período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra hasta la siembra), S a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica (Fehr et al., 1971), LL a lluvias, AA a años de agricultura, ASD a años en siembra directa, FDS a fecha de siembra, DENS a densidad, ET0 a evapotranspiración de referencia, TM a temperatura media, TMX a temperatura máxima promedio, DTMX35 a días con temperatura máxima mayor a 35°C, CDTMX35 a grados días acumulados por encima de una temperatura máxima mayor a 35°C, P2TMX35 a períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C, RAD a radiación, COB a cobertura de rastrojo a la siembra, MO a materia orgánica del suelo, y P a fósforo del suelo.

Tabla A2. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables predictoras a nivel de sitio incluidas en el modelo por encima del óptimo, para evaluar su potencial influencia sobre el rendimiento de soja en la región noreste de Argentina (objetivo específico I).

	Fósforo del suelo	pH del suelo	Fecha de siembra	Años en siembra directa	ET ₀ desde S a R7	Lluvias desde PS a R7	Años de agricultura	Períodos de dos días con temperatura máxima mayor a 35°C desde R1 a R7
Fósforo del suelo	—	-0,09	0,07	-0,07	-0,18	0,11	-0,08	-0,02
pH del suelo		—	0,02	-0,40***	-0,06	-0,05	-0,22*	0,12
Fecha de siembra			—	-0,03	-0,51***	-0,17	-0,06	-0,19*
Años en siembra directa				—	0,14	0,17	0,45***	-0,18
ET ₀ desde S a R7					—	-0,26**	0,17	0,5***
Lluvias desde PS a R7						—	0,08	-0,43***
Años de agricultura							—	-0,16
Períodos de dos días con temperatura máxima mayor a 35°C desde R1 a R7								—

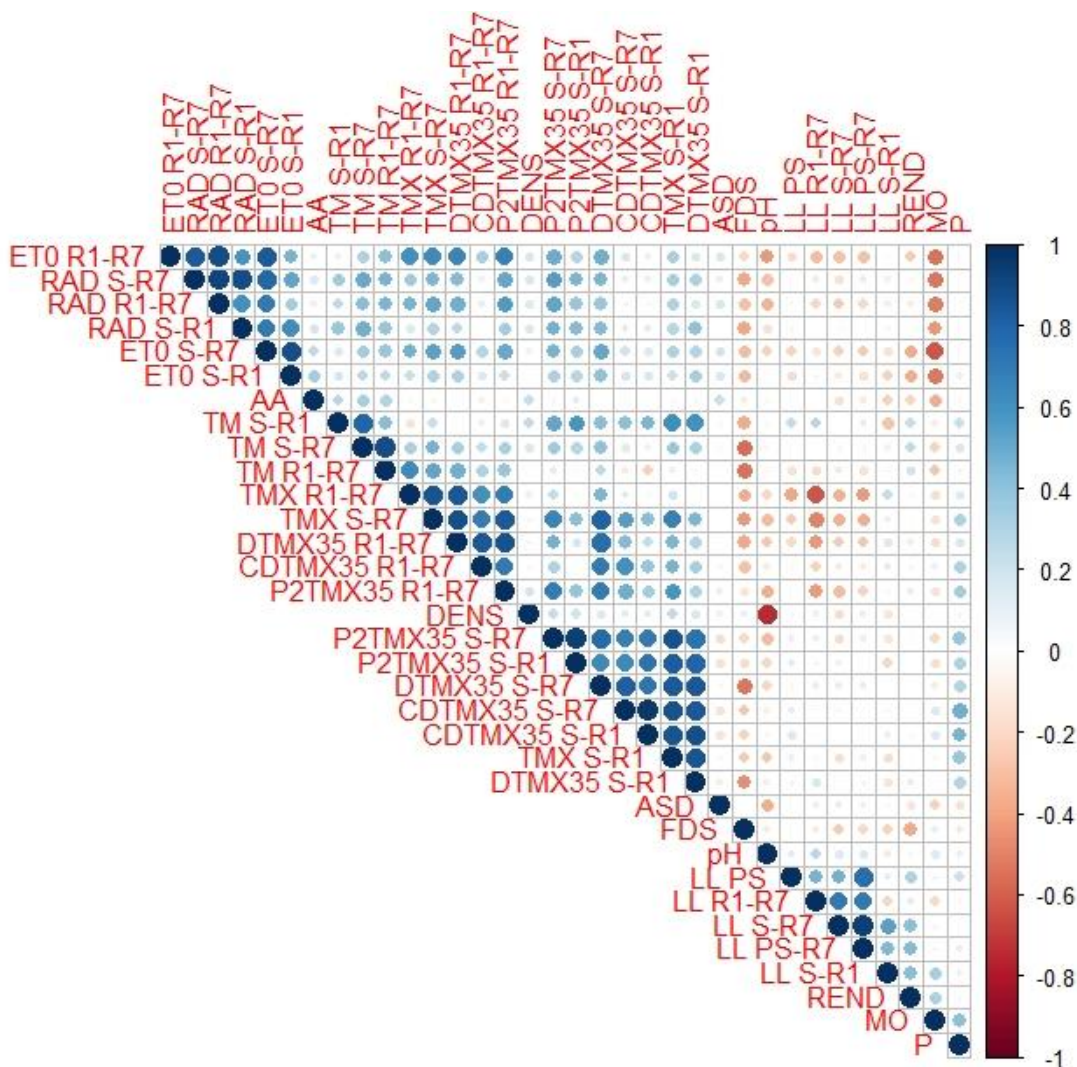
* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

PS se refiere a período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra hasta la siembra), S a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica (Fehr et al., 1971), y ET₀ a evapotranspiración de referencia.

Tabla A3. Genotipos evaluados dentro de cada grupo de madurez en el análisis realizado para el objetivo específico II, junto al número de sitios donde cada genotipo fue evaluado.

Grupo de madurez	Genotipo	Semillero	Número de sitios
V	CZ 5907 IPRO	Credenz	11
	CZ 5905 IPRO	Credenz	9
	LDC 5.9	Louis Dreyfus	3
	59MS01 IPRO	Macroseed	10
	SPS 5x9	Syngenta	3
VI	AS 6211 IPRO	Asgrow	4
	CZ 6806 IPRO	Credenz	20
	CZ 6505	Credenz	15
	CZ 6205	Credenz	4
	DM 67i70 IPRO	Don Mario	11
	DM GARRA IPRO	Don Mario	8
	DM 6563 IPRO	Don Mario	7
	DM 6.8i	Don Mario	1
	HO 6620 IPRO	Horus	15
	HO 6110 IPRO	Horus	5
	HO 6997 IPRO	Horus	3
	LDC 6.9	Louis Dreyfus	3
	MS 6.3 IPRO	Macroseed	19
	MS 6.9 IPRO	Macroseed	12
	NS 6909 IPRO	Nidera	13
	NS 6859 IPRO	Nidera	11
	NS 6483	Nidera	6
	NS 6538 IPRO	Nidera	4
	SYN 1561 IPRO	Syngenta	7
	SYN 6x1	Syngenta	6
VII	AS 6210 IPRO	Asgrow	4
	CZ 7905 IPRO	Credenz	21
	CZ 7.55	Credenz	17
	DM 7976 IPRO	Don Mario	14
	DM 75i75 IPRO	Don Mario	4
	DM 7.8i	Don Mario	3
	HO 7510 IPRO	Horus	10
	Yanasu	Lealsem	3
	MS 7.4 IPRO	Macroseed	3
	NS 7709 IPRO	Nidera	10
	NS 7809	Nidera	7
	NS 7300 IPRO	Nidera	3
	SYN 6X8 IPRO	Syngenta	20
	SYN 7X1 IPRO	Syngenta	19
	SYN 7X8 IPRO	Syngenta	10
VIII	Bio 8.4	Bioceres	11
	DM 8277 IPRO	Don Mario	8
	DM 8075 IPRO	Don Mario	3
	DM 8573 IPRO	Don Mario	3
	Munasqa	Lealsem	19
	LDC 8.5	Louis Dreyfus	8
	NS 8288	Nidera	7
	NS 7209 IPRO	Nidera	6
	NS 8018 IPRO	Nidera	4
	NS 8282	Nidera	2
	SPS 8x8	Syngenta	6

Figura A2. Matriz de correlaciones de Pearson de todas las variables consideradas inicialmente y rendimiento para el segundo análisis (objetivo específico II). Colores azules indican correlación positiva y rojos correlación negativa; la intensidad del color y el tamaño del punto indican el valor de la correlación (r).



Las variables climáticas están reportadas para diferentes períodos. PS se refiere a período pre-siembra (desde 30 días antes de la siembra hasta la siembra), S a siembra, R1 a inicio de floración, R7 a madurez fisiológica (Fehr et al., 1971), LL a lluvias, AA a años de agricultura, ASD a años en siembra directa, FDS a fecha de siembra, DENS a densidad, ET0 a evapotranspiración de referencia, TM a temperatura media, TMX a temperatura máxima promedio, DTMX35 a días con temperatura máxima mayor a 35°C, CDTMX35 a grados días acumulados por encima de una temperatura máxima mayor a 35°C, P2TMX35 a períodos de dos días con temperaturas máximas mayores a 35°C, RAD a radiación, COB a cobertura de rastrojo a la siembra, MO a materia orgánica del suelo, y P a fósforo del suelo.

Tabla A4. Mejor predictor lineal insesgado (MPLI) del rendimiento (kg.ha⁻¹) $\pm$ error estándar (EE) para todos los genotipos testeados dentro de cada grupo de madurez en el análisis realizado para el objetivo específico II.

Grupo de Madurez V		Grupo de Madurez VI		Grupo de Madurez VII		Grupo de Madurez VIII	
Genotipo	MPLI $\pm$ EE	Genotipo	MPLI $\pm$ EE	Genotipo	MPLI $\pm$ EE	Genotipo	MPLI $\pm$ EE
CZ 5907 IPRO	244 $\pm$ 63	AS 6211 IPRO	187 $\pm$ 86	DM 75i75 IPRO	253 $\pm$ 88	DM 8075 IPRO	121 $\pm$ 83
SPS 5x9	58 $\pm$ 93	DM 67i70 IPRO	134 $\pm$ 62	DM 7976 IPRO	141 $\pm$ 56	Bio 8.4	92 $\pm$ 62
LDC 5.9	-58 $\pm$ 92	MS 6.9 IPRO	76 $\pm$ 59	CZ 7905 IPRO	144 $\pm$ 49	NS 8018 IPRO	60 $\pm$ 86
CZ 5905 IPRO	-92 $\pm$ 66	DM GARRA IPRO	78 $\pm$ 69	HO 7510 IPRO	70 $\pm$ 65	SPS 8x8	65 $\pm$ 76
59MS01 IPRO	-152 $\pm$ 64	SYN 1561 IPRO	51 $\pm$ 75	SYN 7X8 IPRO	6 $\pm$ 64	DM 8573 IPRO	43 $\pm$ 93
		LDC 6.9	72 $\pm$ 93	SYN 7X1 IPRO	6 $\pm$ 50	NS 7209 IPRO	39 $\pm$ 76
		SYN 6x1	74 $\pm$ 77	NS 7709 IPRO	-6 $\pm$ 64	LDC 8.5	31 $\pm$ 69
		CZ 6505	35 $\pm$ 51	DM 7.8i	-7 $\pm$ 93	NS 8282	-61 $\pm$ 75
		HO 6620 IPRO	33 $\pm$ 56	Yanasu	-31 $\pm$ 95	DM 8277 IPRO	-67 $\pm$ 69
		CZ 6806 IPRO	12 $\pm$ 50	SYN 6X8 IPRO	-30 $\pm$ 50	Munasqa	-99 $\pm$ 50
		NS 6483	-2 $\pm$ 76	AS 6210 IPRO	-49 $\pm$ 88	NS 8288	-224 $\pm$ 101
		NS 6538 IPRO	-23 $\pm$ 86	MS 7.4 IPRO	-35 $\pm$ 92		
		MS 6.3 IPRO	-41 $\pm$ 50	CZ 7.55	-132 $\pm$ 53		
		HO 6110 IPRO	-50 $\pm$ 81	NS 7300 IPRO	-166 $\pm$ 95		
		NS 6909 IPRO	-63 $\pm$ 58	NS 7809	-163 $\pm$ 73		
		DM 6.8i	-56 $\pm$ 113				
		NS 6859 IPRO	-92 $\pm$ 63				
		HO 6997 IPRO	-88 $\pm$ 92				
		CZ 6205	-112 $\pm$ 86				
		DM 6563 IPRO	-225 $\pm$ 73				