

Comportamiento agronómico de líneas experimentales y variedades comerciales de soja (*Glycine max*, Fabaceae) en el Chaco central de Paraguay

Paredes Martínez, O. R.¹; Rondanini, D.P.^{2*} 

¹ Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO), Avda. Brasilia 939 c/Ciancio, Asunción, Paraguay

² IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina

*autor por correspondencia: rondanin@agro.uba.ar

Comportamiento agronómico de líneas experimentales y variedades comerciales de soja (*Glycine max*, Fabaceae) en el Chaco central de Paraguay. La soja es el principal cultivo de grano en Paraguay. Su producción avanza en el Chaco central y se requiere información sobre el comportamiento de nuevos cultivares que se adapten a la región. El objetivo fue analizar la productividad y adaptabilidad de cultivares de soja en secano en el Chaco central paraguayo. En Loma Plata (Cooperativa Chortitzer Ltda) se evaluaron a campo 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales (VC) en un diseño en bloques completos al azar con 3 repeticiones. La temporada (2019) fue calurosa en la etapa vegetativa y sufrió anegamiento en las etapas reproductivas. Se registró la fenología, el rendimiento y sus componentes y la composición de granos. Entre los cultivares, la duración de la etapa fenológica siembra-floración varió entre 30 y 50 días. El rendimiento se ubicó en el rango de 800 a 1600 kg/Ha, con diferencias significativas entre cultivares ($p < 0,0001$). Las líneas 23, 9, 13, 6 y 25 fueron competitivas contra las mejores VC (VC6 y VC5). El rendimiento se asoció al número de granos ($r=0,82$). La composición de los granos fue estable, con 22,6-24,0 % de aceite y valores anormalmente bajos ($< 28\%$) de proteína. Se concluye que hay líneas experimentales promisorias para el Chaco central, con rendimientos competitivos respecto a las variedades comerciales y que la línea 23 tiene elevado número de vainas y peso de grano, con adaptación al suelo con alta frecuencia de inundación. Su utilidad en sistemas de rotación en los arrozales chaqueños es un tema de interés para próximas investigaciones.

Palabras clave: adaptabilidad, anegamiento, *Glycine max*, número de granos, rendimiento

Agronomic performance of experimental lines and commercial varieties of soybean (*Glycine max*, Fabaceae) in the central Chaco of Paraguay. Soybean is the main grain crop in Paraguay. Soybean production advances in central Chaco, and information is required on the behavior of new cultivars that are adapted to the region. The objective was to analyze the productivity and adaptability of soybean cultivars in a dry system in the central Chaco from Paraguay. In Loma Plata (Cooperativa Chortitzer Ltda) 25 experimental lines and 6 commercial varieties (VC) were evaluated in a field trial in a randomized complete block design with 3 replicates. The growing season (2019) was hot in the vegetative stage and suffered from waterlogging in the reproductive stages. Crop phenology, grain yield and its components, and grain composition were recorded. Among cultivars, the sowing-flowe-

ring period lasted 30 and 50 days. Grain yield ranged 800 to 1600 kg/Ha, with significant differences among cultivars ($p < 0.0001$). Lines 23, 9, 13, 6, and 25 were competitive against the best VC (VC6 and VC5). Grain yield was associated with the number of grains ($r = 0.82$). The composition of the grains was stable, with 22.6-24.0 % oil and abnormally low values of protein ($< 28\%$). It is concluded that there are promising experimental lines for the central Chaco, with competitive grain yield compared to commercial lines, and that the line 23 has a high number of pods and grain weight, with an adaptation to soils with high frequency of flooding. Its usefulness in crop rotation systems, including rice in the Chaco emerges as a topic of interest for future research.

Keywords: crop adaptability, waterlogging, *Glycine max*, seed number, seed yield

INTRODUCCIÓN

En el Paraguay, la soja *Glycine max* (L.) Merr. fue introducida alrededor del año 1921, se expandió como cultivo de producción agrícola recién en la década de los '60 y se intensificó su producción a partir del año 1968 (Morel, 2017). Actualmente, la soja es el principal cultivo del Paraguay con una producción máxima de los últimos 5 años alrededor de 10,2 millones de toneladas en un área cultivada 3,5 millones de hectáreas, la cual se redujo en la última zafra 2021-2022 a 4,3 millones de toneladas en un área cultivada de 3,3 millones de hectáreas por razones climáticas. El nivel de producción convirtió al país en el cuarto mayor exportador y quinto mayor productor de soja a nivel mundial (CAPECO, 2023). Las principales zonas de producción se encuentran en la región oriental del país, sobre todo en la ecoregión del bosque atlántico paranaense (Arce et al., 2011). Por el contrario, en la región occidental del país, la superficie dedicada a la soja es de apenas 30.000 hectáreas, concentrada en el Chaco central: en los departamentos Boquerón, Alto Paraguay y Presidente Hayes (Passerieu, 2017; Neufeld, 2019).

La región occidental o Chaco es una región tradicionalmente de ganadería extensiva (Glatzle, 2005). Con respecto a la agricultura, el algodón (*Gossypium hirsutum* L.) es el cultivo principal, también se siembra maní (*Arachis hypogaea* L.) y sésamo (*Sesamum indicum* L.) y la soja ingresa como una alternativa para rotar con pasturas,

en siembras a partir del mes de diciembre con las primeras lluvias, (Green Chaco, 2021; Harder, 2021). Los suelos agrícolas son cambisoles o inceptisoles, con textura limosa y moderados problemas de salinidad (Barboza et al., 1998; Piris da Motta Fleitas, 2020). El clima es semiárido cálido. El promedio anual de temperatura es de 25°C, pero alcanza temperaturas máximas de 40 a 45°C en enero. Las variaciones estacionales y la amplitud térmica diaria son marcadas. La temperatura del verano en el Chaco central a menudo se encuentra por encima de los 40°C, mientras que en junio y julio la temperatura puede descender hasta bajo cero. Las estaciones meteorológicas de Mariscal Estigarribia y del Fortín Pratt Gill, en el centro y al noroeste del Chaco paraguayo respectivamente, han registrado temperaturas de verano de hasta 46°C, mientras que en el invierno estas mismas estaciones han registrado temperaturas bajas de -7°C (Renshaw, 1996; Piris da Motta Fleitas, 2020). En general se registran las precipitaciones en el bajo Chaco con 1.400 mm (promedio) disminuyendo a 500 mm hacia la frontera con Bolivia. La precipitación media anual en el Chaco central es de 850 mm, fluctuando entre 400-1200 mm en años muy secos o excesivamente húmedos, respectivamente (CEPAL, 2014; González Santander, 2016). Las lluvias se concentran en los meses de verano, de noviembre a marzo (DMH, 2019).

El mejoramiento genético de soja en Paraguay se inició en 1980, con la realización de los primeros cruzamientos de materiales introduci-

dos desde los Estados Unidos, Japón y Brasil, en el Centro de Investigación Capitán Miranda. Soja paraguaya (SOJAPAR) es el resultado de la alianza estratégica entre Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA) y el Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO) para el desarrollo del Programa de Fortalecimiento de la Investigación de Soja en Paraguay. Como resultado del programa de mejoramiento fueron lanzadas en diferentes años las variedades convencionales: Uniala y Aurora (1997), CRIA- 2 y CRIA-3 (2001), CRIA-4 y CRIA-5 (2005), CRIA-6 (2008), CM422 Milagrosa (2010). Las variedades transgénicas (RR1, evento 40-3-2) fueron SOJAPAR 19 (2016), SOJAPAR R24 (2017) y SOJAPAR R34 (2018), SOJAPAR R49 Y SOJAPAR R75 (2019) (Tejada Rodríguez et al., 2022). La mayoría de estas variedades están adaptadas principalmente a la región oriental, y muy pocas presentan algo de adaptación a la región occidental, entre ellas se encuentra la SOJAPAR R75, con un grupo de madurez de 7.5 y una alta rusticidad (Tejada Rodríguez et al., 2022). La soja posee un elevado potencial de productividad y rentabilidad, por lo que es importante disponer de variantes genotípicas que permitan elevados y estables rendimientos en diferentes latitudes, fechas de siembra y tipos de suelo (Morel, 2017). La adaptabilidad es la capacidad de los genotipos para responder ventajosamente a la mejora del medio ambiente y la estabilidad se refiere a la capacidad de los genotipos para exhibir un comportamiento predecible de acuerdo con las variaciones ambientales (Mariotti et al., 1976). Mientras que Morais (1980) define la adaptabilidad como la estabilidad del comportamiento que le interesa al obtentor, es decir, la estabilidad de un genotipo determinado también determina la fiabilidad en los parámetros de adaptabilidad estimados.

La meta de los fitomejoradores es producir cultivares con altos rendimientos en grano estables a través de los ambientes de producción (Hallauer, 2007). Esto constituye un gran desafío pues dichos rasgos complejos dependen del

ambiente, del genotipo y de sus interacciones. La selección de cultivares en un entorno muy variable resulta compleja, cuando las condiciones de temperatura, radiación y distribución de precipitaciones varían ampliamente de una campaña a otra (Zuil, 2017). Debido a la demanda creciente de variedades de soja que puedan tolerar situaciones de estrés, el programa también empezó a desarrollar líneas experimentales que puedan generar ganancias en el Chaco central (Morel, 2017). Para ello, busca identificar los caracteres relevantes para el desempeño de los cultivos en estos ambientes de producción, encontrar variabilidad en sus expresiones, que dicha variabilidad sea heredable, y que se puedan monitorear fácilmente (Andrade et al., 2009). Los nuevos materiales genéticos buscan no solo mayor potencial, sino también mayor estabilidad del rendimiento en diferentes ambientes. El desafío es poder diseñar una intensificación sustentable de la agricultura haciendo un uso eficiente de los recursos del ambiente (Salica, 2019; Andrade, 2021).

El rendimiento del cultivo de soja resulta de dos componentes numéricos principales que no son plenamente independientes entre sí: el número de granos que se establecen por unidad de área y el peso unitario que alcanzan los granos (Egli y Zhen-Wen, 1991; Board et al., 1995). Las variaciones en número de granos están estrechamente relacionadas con cambios en el rendimiento, a diferencia de la relación entre el peso de los granos y el rendimiento, que no es tan robusta (Egli y Bruening, 2006; Kantolic et al., 2003). Existe una relación positiva entre la tasa de crecimiento del cultivo en etapas reproductivas y el rendimiento de soja (Jiang y Egli, 1995). Se ha determinado que parte del incremento en los rendimientos en soja está asociado a aumentos en la intercepción de la radiación solar y su conversión a biomasa (Koester et al., 2014). Trabajos recientes en la región núcleo pampeana de Argentina han mostrado una fuerte relación entre el número de semillas, la tasa de crecimiento durante el período crítico entre inicio de floración (R1)

e inicio de llenado de granos (R5) y la biomasa reproductiva en R5 para doseles con diferentes arreglos espaciales (Masino et al., 2018; Monzon et al., 2021) indicando la importancia de maximizar el crecimiento en las etapas reproductivas de soja para alcanzar elevados rendimientos. La medición de la tasa de crecimiento en el periodo crítico para la definición del rendimiento resulta difícil en campo. Por eso sería de utilidad para el mejoramiento analizar la relación entre el rendimiento y otras variables indirectas de fácil medición, como la cobertura y el verdor del dosel. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: i) identificar líneas de soja promisorias para la ecorregión del Chaco central, con mayor o igual rendimiento que alguno de las variedades comerciales, ii) evaluar la variabilidad de su fenología y componentes numéricos del rendimiento, y iii) analizar la asociación entre el rendimiento y las medidas indirectas de crecimiento del dosel en etapas críticas reproductivas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo experimental se realizó en una parcela de la Cooperativa Chortitzer Komitee Ltda, ubicada en la ciudad de Loma Plata, Dpto Boquerón, Paraguay, con puntos de georreferencia 22° 28' S, 59° 55' O y 133 m.s.n.m. de un suelo Cambisol éutrico, CMe, de textura franca con 37% de arena, 24% de arcilla y 38% de limo, con 1,8%

de materia orgánica, buena provisión de P, S, K y Mg y con moderada limitación por salinidad (ICASA, 2019). Los valores del análisis del suelo se pueden observar en la Tabla 1. La siembra se realizó el 19 de enero de 2019 en una parcela manejada bajo el sistema de siembra directa durante los últimos tres años, a una densidad de 10 semillas por metro lineal (equivalente a 20 semillas/m²) con 0,45 m de distancia entre hileras. Cada unidad experimental estuvo constituida por 4 surcos de 8 metros de largo por 2 metros de ancho y las evaluaciones fueron realizadas sobre los surcos centrales. Las semillas fueron tratadas con fungicidas (Fludioxonil + Metalaxil) y el insecticida Fipronil e inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* según las dosis de marbete. No se realizó fertilización y hubo un control químico de las malezas: 2 semanas antes de la siembra se aplicó glifosato sal potásica al 66% a una dosis de 2 litros/Ha. Luego se aplicaron los insecticidas acetamiprid+ benzoato de emamectina + lufenuron, como también los herbicidas fomentafen + fluazifop-p 30 días posteriores a la siembra. Se realizó otra aplicación con acetamiprid + benzoato de emamectina + lufenuron dos meses después de la siembra.

TABLA 1. Análisis del suelo en la parcela experimental en Loma Plata

pH en Agua	pH	V Sat. Bases	CTC	M.O.
6,78	6,92	83,94%	9,96 meq/100g	1,81%
P	K	Ca	Mg	Al
75,90 ppm	252,50 ppm	4,86 meq/100g	2,60 meq/100g	0,12 meq/100g
H+Al (Ac)	Na	S	Zn	Mn
1,60 meq/100g	59,30 ppm	37,78 ppm	3,03 ppm	78,70 ppm
Cu	Fe	K/CTC	Ca/CTC	Mg/CTC
1,03 ppm	84,50 ppm	6,5%	48,8%	26,1%
Al/CTC	H/CTC	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
1,2%	14,9%	1,9	7,5	4,0

Se sembraron 25 líneas experimentales de soja (Tabla 2) seleccionadas en base al tiempo de maduración de los granos (grupo de madurez GM VI a VIII) con ciclo medio a largo en la Región Oriental (Departamento Central y Alto Paraná) donde se encuentra el Programa de Mejoramiento de Soja de IPTA/INBIO. Las 6 variedades comerciales fueron: BMX- POTENCIA RR (VC1), M-6410 Ipro (VC2), SOJAPAR R24 (VC3), SOJAPAR R19 (VC4), DM 8277 IPRO (VC5), NS 7209 IPRO (VC6), las cuales fueron seleccionadas por presentar buena aceptación de los agricultores del Chaco. Los cultivares son de crecimiento indeterminado y difieren entre sí en cuanto al ciclo y las tecnologías transgénicas (INTACTA para control de orugas de lepidópteros y RR1 para tolerancia al herbicida glifosato). Las líneas experimentales son resistentes a

TABLA 2. Características de las líneas experimentales y variedades comerciales (VC) de soja en la Región Oriental

N°	Cultivares	Días a		Altura		Peso de 100 granos (g)	Ciclo	Tecnología
		Floración (R1)	Madurez (R8)	Plantas (cm)	Vainas (cm)			
VC1	BMX- POTENCIA RR	45	134	97	15	13,8	VI Largo	RR1
2	SP15128	47	124	88	17	13,9	VI Medio	RR1
3	SP15212	46	131	92	15	13,9	VI Largo	RR1
4	SP16005	43	124	85	15	14,8	VI Medio	RR1
5	SP14642	43	122	85	17	12,9	VI Medio	RR1
6	SP14657	46	123	84	17	13,3	VI Medio	RR1
7	SP14658	52	130	105	15	13,1	VI Largo	RR1
8	SP14675	53	133	93	16	14,6	VI Largo	RR1
9	SP15127	46	125	87	17	13,6	VI Medio	RR1
VC2	M-6410 IPRO	46	128	92	16	13,4	VI Largo	INTACTA
11	SP15129	52	129	85	17	12,5	VI Largo	RR1
12	SP15028	42	123	112	15	13,2	VI Medio	RR1
13	SP15214	47	130	105	14	13,7	VI Medio	RR1
14	SP15033	45	123	83	17	12,7	VI Medio	RR1
15	SP15135	41	137	75	12	13,9	VII Medio	RR1
16	SP15211	52	130	99	18	13,3	VI Largo	RR1
17	SP15201	45	131	82	16	13,5	VI Largo	RR1
18	SP 17079	45	124	78	16	13,6	VI Medio	RR1
19	SP 17080	45	125	85	15	12,6	VI Medio	RR1
20	SP 17081	46	126	89	14	12,6	VI Largo	RR1
21	SP 17083	42	125	80	16	13,8	VI Medio	RR1
22	SP 17087	53	135	89	16	13,8	VII Corto	RR1
23	SP 17088	52	135	80	15	13,6	VII Corto	RR1
24	SP 17089	52	136	95	17	13,6	VII Corto	RR1
25	SP 17090	53	135	101	18	14,2	VII Corto	RR1
26	SP 17091	42	137	78	12	14,5	VII Medio	RR1
27	SP 17092	53	136	98	20	13,1	VII Corto	RR1
VC3	SOJAPAR R24	47	128	100	16	17,0	VI Largo	RR1
VC4	SOJAPAR R19	47	132	110	16	15,0	VI Largo	RR1
VC5	DM 8277 IPRO	s/d	112	120	s/d	15,5	VIII Largo	INTACTA
VC6	NS 7209 IPRO	41	135	110	s/d	18,5	VI Largo	INTACTA

VC: variedad comercial, RR1: resistencia al herbicida glifosato, INTACTA: resistencia a orugas de lepidópteros, s/d: sin dato

la enfermedad roya asiática de la soja producida por el hongo *Phakopsora pachyrhizi*, además se caracterizan por ser tolerantes a la enfermedad podredumbre carbonosa del tallo producida por el hongo *Macrophomina phaseolina*. Las líneas se asignaron a las parcelas en un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) con 3 repeticiones. Los bloques permitieron controlar variabilidad existente en el relieve de la parcela.

Las observaciones del comportamiento fenológico fueron realizadas en dos oportunidades por semana utilizando la escala de Fehr y Caviness (1977) en todas las variedades (experimentales y comerciales), registrando los eventos de emergencia (VE), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez de granos (R8). En R1 y R5 se determinaron la cobertura vegetal verde en la zona central de cada unidad experimental, utilizando la aplicación móvil Canopeo, desarrollado por la Universidad de Oklahoma (Patrignani y Ochsner, 2015). Su funcionamiento se basa en la colorimetría, ofreciendo resultados *in situ* más precisos que los exámenes visuales. La toma de las imágenes fue realizada a 60 cm del suelo. Además, se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en R5 mediante un equipo reflectómetro portátil Green Seeker (Trimble Inc, California) que se trata de un equipo sensor terrestre portátil, que emite luz a través de diodos y registra la reflectancia del cultivo, y este índice permite supervisar variaciones de la cobertura vegetal verde durante el desarrollo del cultivo (Gutiérrez-Soto et al., 2011). La temperatura se obtuvo de una estación meteorológica automática instalada en Loma Plata y las precipitaciones se registraron mediante un pluviómetro ubicado a 100 m de la parcela.

Previamente a la cosecha, se registró mediante una cinta centimetrada la altura total de planta (desde el suelo al ápice del tallo) y la distancia entre el suelo y la primera vaina (despeje) en todas las plantas de los surcos centrales. Se seleccionaron al azar 10 plantas por unidad experimental de

los surcos centrales y se contabilizaron el número de ramas por planta y la cantidad total de vainas de cada planta. Las vainas por unidad de superficie se obtuvieron multiplicando las vainas/planta por la densidad final de plantas. En la madurez, se trillaron 12 m lineales de cada unidad experimental, de los surcos centrales de cada parcela (equivalentes a 5,4 m² de área). Se determinaron la humedad de los granos con la utilización de un humidímetro (HD-1021, Delver) y se pesaron en una balanza de precisión. El rendimiento se expresó como peso de granos por unidad de área y con un tenor de 13,5% de humedad. Se seleccionaron al azar 100 granos de cada línea y se pesaron en una balanza de precisión para obtener el peso de 100 granos. El número de granos por unidad de superficie se calculó dividiendo el rendimiento por el peso unitario de grano. La concentración de aceite y proteína en los granos se determinaron mediante la técnica espectroscópica con la utilización del equipo de análisis de infrarrojo cercano NIR (Infratec 1241, Foss Analytics), las determinaciones se realizaron con la selección al azar de 500 g de granos por líneas experimentales y variedades comerciales de soja. La cuantificación del contenido de aceite y proteína bruta se obtuvieron multiplicando el peso del grano por la concentración en grano.

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y las diferencias entre medias se determinaron mediante un análisis de varianza, además de comparaciones de medias por el Test de Tukey con un nivel de significancia del 5%. La correlación entre los componentes del rendimiento se analizó mediante el Análisis de Correlación de Pearson con una significancia del 5%. Se utilizó el programa estadístico InfoStat®

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología y condiciones ambientales exploradas

La temporada 2019 fue calurosa y extremadamente húmeda (Tabla 3). Las lluvias del mes de

TABLA 3. Características ambientales de 2019 en Loma Plata (Boquerón, Paraguay)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Fotoperiodo promedio (h)	13,2	12,8	11,8	11,5	11,0
Temperatura mínima promedio (°C)	23	23	21	20	17
Temperatura máxima promedio (°C)	37	35	31	30	26
Precipitaciones mensuales (mm)	91	93	278	178	66



Figura 1. A) Vista general de las parcelas de soja evaluadas en Loma Plata (Boquerón, Paraguay), B) Detalle de la cobertura del dosel en febrero 2019, C) Condición de anegamiento por excesivas lluvias en marzo 2019

enero retrasaron la siembra (19/1/19) y las lluvias torrenciales de marzo y abril anegaron en toda la región durante varios días. Al inicio del anegamiento, el 20 de marzo, las variedades de GM VII y VIII se encontraban en el estadio fenológico R2, mientras que las variedades de GM VI en R3. En un año usual la precipitación es de 900 mm anuales, distribuidos principalmente en los meses de enero (137,5 mm), febrero (112,5 mm), marzo (137,5 mm), abril (87,5 mm) y mayo (62,5 mm). En los meses de marzo y abril hubo una precipitación dos veces mayor a la normal, por lo que se acumuló agua sobre la superficie del suelo (Figura 1).

Se observó un comportamiento fenológico variable entre los cultivares y se correlaciona en parte con los GM de cada genotipo (Figura 2). La duración de la etapa entre siembra y floración (S-

R1) varió entre 30-50 días entre cultivares, con R1 desde 18/2/19 (líneas precoces) hasta 10/3/19 (extensas). La duración de la etapa entre floración y madurez (R1-R8) varió entre 56-70 días, y el ciclo total (S-R8) varió entre 96 y 115 días, finalizando entre el 25/4/19 al 14/5/19. Se observaron 4 variedades comerciales precoces (30 días a R1 y 96 días a R8) y dos variedades de ciclo más extendido (VC5 y VC6). Entre las líneas experimentales, 25 y 27 resultaron las de mayor ciclo, con 50 días a R1 y 115 días a R8, superando en una semana a las variedades comerciales más largas. Estas líneas de ciclo más largo posiblemente tengan mayor sensibilidad al fotoperiodo y/o menor fotoperiodo umbral, lo cual se asocia con la presencia de distintos genes de madurez (Cober et al., 2014).

Rendimiento de grano en líneas experimentales de soja

El rendimiento en grano (expresado al 13,5 % de humedad) se ubicó en el rango de 800 a 1600 kg/Ha (Figura 3). Estos valores resultaron bajos, asociados a las condiciones climáticas que retrasaron la fecha de siembra y causaron anegamiento en las etapas post floración. Se observó variabilidad en el rendimiento entre repeticiones del mismo genotipo, asociado a condiciones edáficas y del micro relieve. Pese a ello, el rendimiento varió significativamente entre las líneas ($p < 0,0001$). Las líneas 23, 9, 13, 6 y 25 fueron competitivas, sin diferencias significativas contra las mejores variedades comerciales (VC6 y VC5), mientras que las líneas 19, 7, 22 y la VC4

tuvieron los menores rendimientos (800 kg/Ha).

El rendimiento de grano no se asoció con el ciclo (Figura 4) aunque las líneas que superaron el rendimiento promedio de las 6 variedades comerciales (1060 kg/Ha, línea punteada en Figura 4) tuvieron 35 y 40 días de duración entre siembra y R1 y unos 103 días de duración entre siembra y R8. Para confirmar que dicha duración del ciclo es la óptima para maximizar los rendimientos de soja en el Chaco, deberán repetirse las evaluaciones en un mayor número de años, localidades y fechas de siembra, incluyendo fechas más tempranas que la evaluada aquí. Otros autores analizaron las bases fisiológicas que relacionan los cambios en la duración del ciclo con la ubicación del periodo crítico de determinación

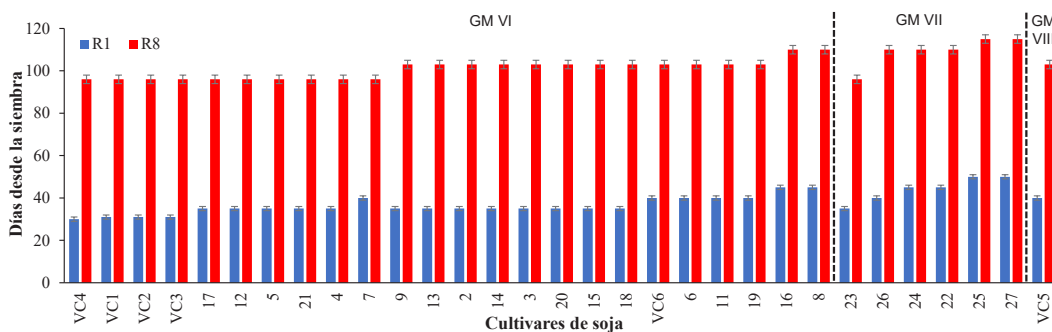


Figura 2. Duración del periodo desde siembra hasta la floración (R1) y madurez de granos (R8) en 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales de soja en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Las líneas punteadas dividen a los cultivares según su grupo de madurez (GM) y dentro de cada grupo, están ordenados por duración a madurez

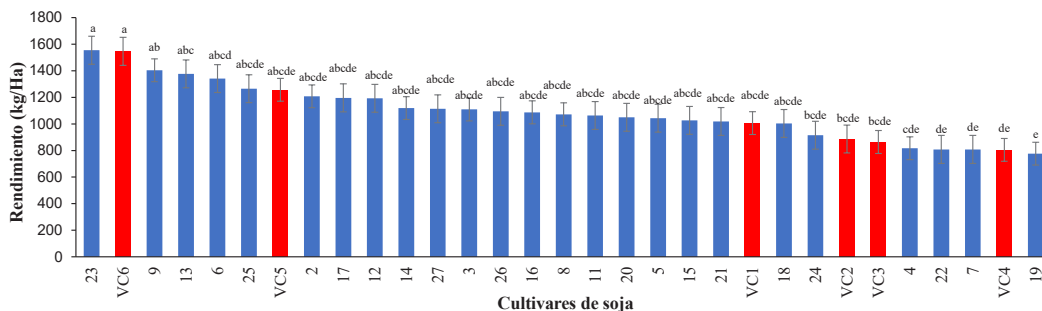


Figura 3. Rendimiento en grano por superficie (ajustado al 13,5 % humedad) en 25 líneas experimentales (en color azul) y 6 variedades comerciales (VC, en color rojo) de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey con 5% de significancia

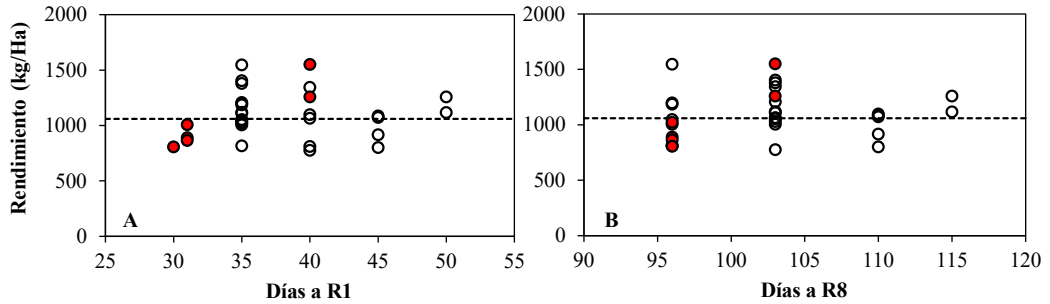


Figura 4. A) Rendimiento de grano (kg/Ha) por superficie (ajustado al 13,5 % humedad) en función de los días desde la siembra hasta la floración (R1) y B) desde los días desde la siembra hasta la madurez (R8) en 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales de soja (en rojo) evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). En rojo las variedades comerciales y en blanco las líneas experimentales. Cada punto es el promedio de 3 repeticiones. La línea punteada indica el rendimiento promedio de las 6 variedades comerciales (1060 kg/Ha)

del rendimiento, indicando la relación positiva entre el número de granos y la duración del periodo de formación de vainas (Kantolic y Slafer, 2001) así como los efectos del fotoperiodo sobre la duración de etapas reproductivas y el número de granos, mediado por el retraso en el desarrollo de vainas dominantes, permitiendo el desarrollo de vainas de menor jerarquía dentro de un mismo racimo floral (Nico et al., 2016).

Los rendimientos de soja registrados en años anteriores en las parcelas experimentales de la Cooperativa Chortitzer varían de acuerdo con las condiciones climáticas muy variables que se presentan en cada zafra. En la zafra 2017/2018 se obtuvo el menor promedio de rendimiento en los ensayos, llegando solamente a los 1587 kg/Ha, a causa de una fuerte sequía en periodo crítico. Sin embargo, hubo años, como la zafra 2014/15, donde se lograron en promedio 3242 kg/Ha, lo cual demuestra que existe un potencial interesante para apostar por la soja en esa zona (Morel, A. comunicación personal). En la zafra 2018/19 en siembra del 15 de enero del 2019 el rendimiento de soja se ubicó en el rango de 1432 kg/Ha a 443 kg/Ha, con un promedio de 960 kg/Ha. Claramente, el exceso de lluvia en marzo y abril de 2019 (Tabla 3) fue un factor negativo que afectó el comportamiento de las líneas y de las varie-

dades comerciales. Otro factor adicional para considerar junto con las precipitaciones es el tipo de suelo. Los ensayos de la cooperativa son sembrados en 3 tipos de suelos: regosol, cambisol y luvisol, en los cuales en años donde la precipitación es mucho mayor a lo normal los cambisoles y luvisoles no pueden infiltrar con tanta rapidez el agua a causa de un gran porcentaje de limo y arcilla en los primeros horizontes del suelo. En contraste, los regosoles tienen una textura más arenosa lo cual permite una mayor infiltración del agua de lluvia, y los ensayos de la cooperativa donde hubo mayores promedios de rendimiento en 2019 se encontraban en regosoles (Paredes, O. comunicación personal). Esa heterogeneidad de suelo tan característica de esa región, así como también las precipitaciones tan variables entre parcelas vecinas hacen que el Chaco central sea una región con rendimientos de soja muy diferentes en un mismo año.

A nivel regional, los rendimientos de ensayos de variedades comerciales de soja adaptadas a la región de Loma Plata en la zafra 2017/2018 dieron como promedio 2369 kg/Ha, considerando fechas de siembra temprana (27 de diciembre), normal (15 de diciembre) y tardía (6 de febrero), sembrado en una parcela con buena permeabilidad del suelo. Mientras tanto en los ensayos de

la Cooperativa Fernheim, distante a unos 50 km al noroeste de estos ensayos, en la zafra 2018/19 se obtuvo en promedio 1110 kg/Ha y en la zafra 2017/18 en promedio 2342 kg/Ha (Paredes, O. comunicación personal). Estos valores de rendimiento resultan atractivos económicamente para los productores e indican la posibilidad de incorporar soja en las rotaciones agrícolas en el Chaco.

La región de Loma Plata cuenta con características edafo-climáticas similares con algunas otras regiones de la misma latitud o ecorregión. Por ejemplo, con el noreste de la provincia de Salta – Argentina tiene similar fotoperiodo y temperatura. Comparativamente, la localidad de Embarcación, en Salta (23°13'S, 64°06'O) en la zafra 2018/19 obtuvo un promedio de rendimiento de 4446 kg/Ha (RECSO 2019). En Mosconi (22°36'S, 63°49'O) se obtuvo 3282 kg/Ha en la zafra 2017/18 y en Ballivián (22°56'S, 63°52'O) se obtuvieron 3057 kg/Ha (EEAOC, 2019). Con el Departamento de Santa Cruz – Bolivia, Boquerón comparte la ecorregión del Chaco, cuyos suelos son muy similares, ricos en nutrientes, la diferencia estaría en el régimen de precipitación que es mayor en Santa Cruz, aquí en la zafra 2015/16 como promedio se registró 2140 kg/Ha y en la zafra 2016/17 se registró 2580 kg/Ha (ANAPO, 2016). El estado de Mato Grosso do

Sul – Brasil cuenta con localidades con latitudes similares a Loma Plata. Allí también la diferencia está en el régimen de lluvias (cantidad y momento) y el tipo de suelo, mientras que la temperatura y horas luz son similares. En la localidad de Dourados (22°13'S, 54°48'O) en la zafra 2018/19 en promedio se registró 3972 kg/Ha de soja, en Bonito (21°07'S, 56°28'O) fue de 4518 kg/Ha y en Antonio Joao (22°12'S, 55°56'O) se llegó a 4380 kg/Ha (Fundacao MS, 2021). Estos valores muestran el potencial de rendimiento de las ecorregiones, con variedades comerciales adaptadas y buen manejo agronómico.

Cobertura y NDVI en etapas reproductivas en líneas experimentales de soja

La Figura 5 muestra la cobertura foliar alcanzada por los cultivares de soja en floración (R1) y al comienzo del llenado de granos (R5) considerando que estos estadios fenológicos abarcan el período crítico para la definición del rendimiento en soja. En R1 se observó una importante variabilidad en el nivel de cobertura entre los genotipos evaluados, sin diferencias significativas entre cultivares ($p>0.05$), todas las líneas experimentales han superado valores de cobertura del 30%, a excepción de la línea 21. Los mayores valores de cobertura en R1 se observaron en la variedad

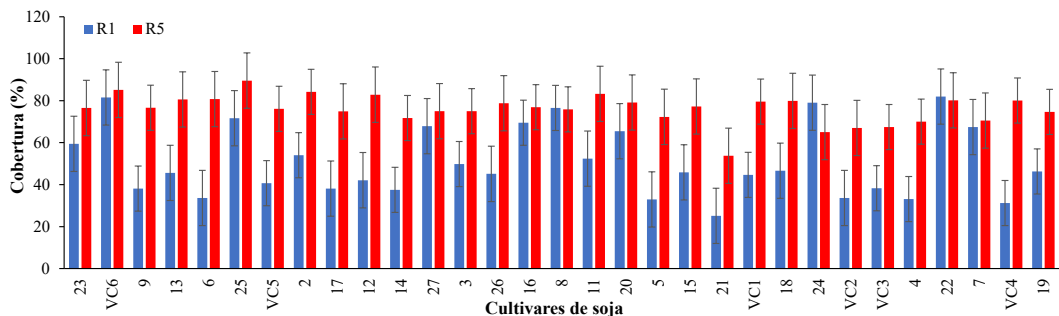


Figura 5. Nivel de cobertura del cultivo (% de superficie del suelo) en dos momentos fenológicos (R1: Floración, R5: inicio de llenado de granos) en 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Los cultivares están ordenados como en la Figura 3. Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. No se observan diferencias significativas entre cultivares para cada momento fenológico según la prueba de Tukey con 5% de significancia

comercial VC6 y las líneas 24 y 22, que presentaron un 80%. En R5, la variabilidad entre cultivares fue ligeramente menor, promediando un valor de cobertura del 80%, sin diferencias significativas entre cultivares ($p > 0.05$). La línea 21 tuvo un excepcionalmente bajo valor de cobertura en R5 (no alcanzó el 60%) posiblemente asociado con la sensibilidad al anegamiento. Los porcentajes de cobertura de dosel más elevados (90%) en R5 se dieron en los genotipos VC6, 25 y 22 (Figura 5).

Uno de los objetivos de los productores es lograr el dosel cerrado (95% de intercepción de la radiación solar incidente, con un índice de área foliar cercano a 4) en plena floración (Rizzo, 2000). En este ensayo ninguno de los cultivares pudo llegar a ese valor en floración, y sólo se acercaron 3 cultivares en R5. Esto podría deberse al retraso en la fecha de siembra y al estrés hídrico que sufrieron las plantas por la inundación del terreno por las lluvias durante varios días.

Las diferencias (delta) en el porcentaje de cobertura entre R1 y R5 indican el aumento del área foliar ocurrido en este periodo crítico para la definición del rendimiento. Estos valores se ubicaron en el rango de 25 a 90 puntos porcentuales, con extremos de gran aumento de la cobertura en la línea 9 (de 32 a 77%, delta 45%) y escaso aumento en las líneas 24 (de 79 a 85%, delta 6%) y línea 22 (de 82 a 90%, delta 8%) que ya tenían elevada

cobertura en R1. En la línea 7 no hubo prácticamente aumento de cobertura. Para el conjunto de datos, no se observó relación significativa entre el rendimiento en grano y el incremento (delta) de cobertura entre R1 y R5 (como aproximación al crecimiento del cultivo en el periodo crítico). Dado que durante el periodo de R1 a R5 muchos genotipos permanecieron anegados por las lluvias, las diferencias en el aumento de la cobertura entre R1 y R5 pueden deberse a la diferente capacidad que tiene cada genotipo para tolerar las situaciones de inundación. En este sentido, la línea 9 resulta interesante para confirmar su capacidad de crecimiento foliar en condiciones de anegamiento. Además de la capacidad de la planta de tolerar el anegamiento, se requiere evaluar la capacidad de los rizobios de sobrevivir al anegamiento en etapas reproductivas, lo cual podría sostener la provisión de nitrógeno para el crecimiento foliar.

El NDVI permite, mediante el espectro de luz que refleja el dosel, estimar la cobertura vegetal y su verdor, el cual tiene influencia sobre la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa. En la mayoría de los cultivares, los valores de NDVI en R5 variaron entre 0.90 y 0.80, sin diferencias significativas entre cultivares (Figura 6).

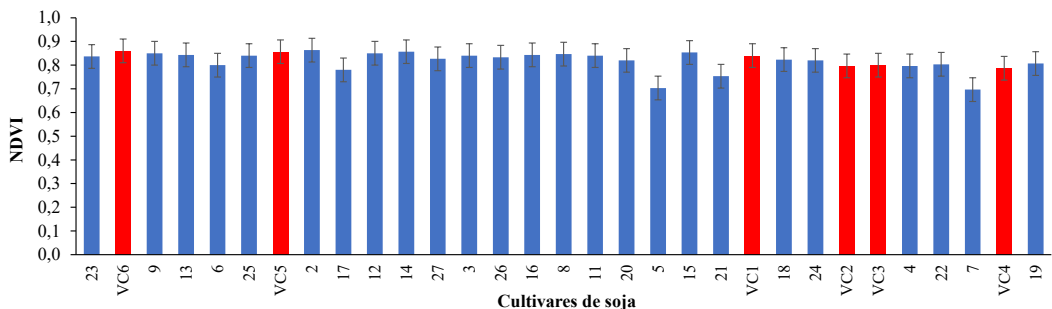


Figura 6. Valores del índice de vegetación de la diferencia normalizado (NDVI) medidos en comienzo de llenado de granos (R5) en 25 líneas experimentales (en color azul) y 6 variedades comerciales (VC, en color rojo) de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Los cultivares están ordenados como en la Figura 3. Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. No se observan diferencias significativas entre cultivares según la prueba de Tukey con 5% de significancia

Cuando se comparan los valores de NDVI con la bibliografía, fueron muy similares a los valores de NDVI en soja en el estadio R5 en Londrina, Paraná – Brasil (23°18'36"S, 51°09'46"O) los cuales rondaban los 0.88 en la zafra 2012/13 (Crusiol et al., 2013). En dicho estudio hubo una estabilización del NDVI desde R2 a R6. También concuerdan con los resultados alrededor de 0.85 de Della Justina (2014) en Cascavel, Paraná – Brasil (24° 57' 20.99" S 53° 27' 19.01" O) y de Morlin (2018) quien obtuvo valores NDVI promedio de 0.86 en R4 en Jaboticabal, San Pablo – Brasil (21° 15' 19" S 48° 19' 21" O). En Paraguay, en la zafra 2020/2021 se informaron valores bajos de NDVI (0.45) asociados a fallas en la siembra y deficiente crecimiento del cultivo (Baranski, 2021). Uno de los cuestionamientos al NDVI, es que se satura y pierde poder de discriminación cuando se cierra el dosel. Por eso, en este ensayo se determinaron las dos variables, cobertura y NDVI, en R5, y la correlación entre ambas variables no resultó significativa ($r=0,5$).

Cuando el NDVI en R5 se asoció con el rendimiento en grano (Figura 7) no se observó una correlación significativa ($r=0,48$). La línea experimental 9 tuvo un rendimiento de 1196 kg/Ha y la VC1 con 1006 kg/Ha, ambos con NDVI de 0.87. Sin embargo, existen casos en donde las variedades comerciales con igual NDVI que las líneas experimentales tuvieron un rendimiento superior, por ejemplo, la VC5 (1258 kg/ha) comparando con las líneas 8 (1073 kg/Ha) y 16 (1080 kg/Ha), todos ellos con 0.86 de NDVI. En el mismo sentido, la VC6 (1547 kg/Ha) y la línea 23 (1555 kg/Ha) obtuvieron entre 400 a 500 kg/Ha más de rendimiento que las líneas 3 (1110 kg/Ha) y 15 (1027 kg/Ha), todas con NDVI 0.85. Las demás variedades comerciales (VC3, VC4 y VC5) se ubicaron entre las de peor rendimiento (865, 806 y 886 kg/Ha respectivamente) y tuvieron valores bajos de NDVI (0.80, 0.78 y 0.74 respectivamente).

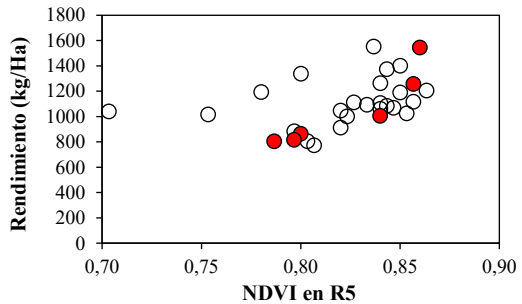


Figura 7. Rendimiento en grano (13,5% humedad) en función del NDVI en R5 en 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). En rojo las variedades comerciales y en blanco las líneas experimentales. Cada punto es el promedio de 3 repeticiones. No se observa correlación significativa entre las variables

Estructura de plantas y componentes del rendimiento en líneas experimentales de soja

En la madurez de los granos se determinaron características estructurales de las plantas de las líneas experimentales de soja estudiadas (Tabla 4). Considerando que la densidad final fue muy baja (12 plantas/m² en promedio) comparado con una densidad tradicional en esta región (de 20 a 24 plantas/m²), una obtención en la altura de planta promedio de 66 cm indica el buen desarrollo vegetativo, y cabe resaltar que la etapa vegetativa no estuvo afectada por el exceso de agua, no así el periodo reproductivo. El número de ramas por planta fue similar en promedio, a los promedios en años anteriores, que superan las 5 ramas por planta, ya que estas líneas se caracterizan por una alta capacidad para ramificar. Un ensayo realizado por Berdén Prates y Rabery Cáceres (2008) en San Lorenzo, Paraguay (25°20'22"S, 57°30'31"O) en el año 2007/08, en variedades de soja comerciales sembradas a una densidad de 30 plantas por m² obtuvo 5,2 ramas por planta, similar al promedio de este experimento, pero al compararlo con los valores mínimos y máximos

TABLA 4. Resumen de valores de altura de planta, despeje, densidad final de plantas y número de ramas a cosecha en líneas de soja evaluadas en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo)

	Altura (cm)	Despeje (cm)	Densidad final (pl/m ²)	Ramas (#/pl)
Mínimo	52	11	9	3
Máximo	79	19	13	9
Promedio	66	13	12	5

se observan diferencias. Por lo que las líneas de mayor número de ramas (las líneas 25, 8, 24) posiblemente manifestaron menor dominancia apical, sin que esto se relacione con su grupo de madurez ni el largo de ciclo. También es posible que estas líneas tengan variaciones en genes mayores que controlan la ramificación en poblaciones naturales de soja (Liang et al., 2022).

Con respecto al número de vainas por unidad de superficie, se observaron diferencias significativas entre cultivares (p=0,04). La mayoría de los

genotipos obtuvieron entre 400 a 600 de vainas por m² (Figura 8, A) lo que equivale de 18 a 27 vainas por planta, aproximadamente. El cultivar 7 tuvo menos de 400 vainas por m², mientras que los cultivares 20, 23, 25 y VC5 superaron las 600 vainas por m². El máximo número de vainas por superficie lo obtuvo la línea 20, con aproximadamente 1000 vainas por m², lo que equivale a 45 vainas por planta. Estos valores resultan inferiores a los obtenidos por Berdén Prates y Rabery Cáceres (2008) en Paraguay, que superaron las

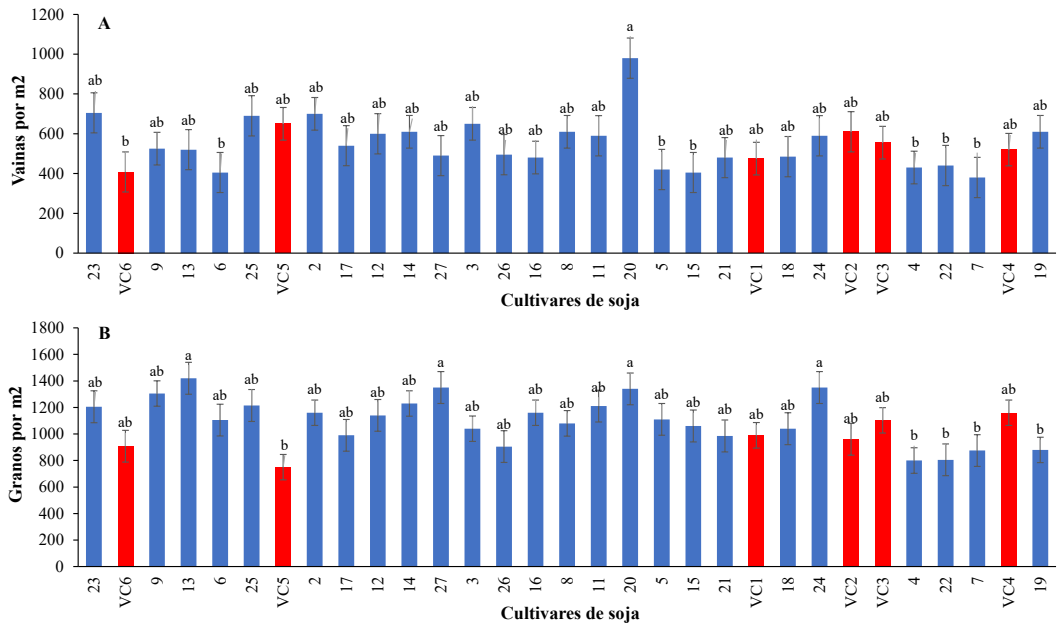


Figura 8. A) Número de vainas por m² y B) número de granos por m² en 25 líneas experimentales (en color azul) y 6 variedades comerciales (VC, en color rojo) de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Los cultivares están ordenados como en la Figura 3. Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey con 5% de significancia

1200 vainas por m² y a los obtenidos en INTA Río Primero, Córdoba (Fuentes, 2018) donde alcanzaron 1300 vainas por m², en los cuales se obtuvieron rendimientos en grano ampliamente superiores a los de este experimento.

El número de granos por m² mostró diferencias significativas entre cultivares ($p=0,03$) y se ubicó mayormente entre los 900 y 1300 granos por m² (Figura 8, B). Sin embargo, hubo cultivares que superaron 1300 granos por m², como las líneas 9, 13, 27, 20 y 24, mientras que los que no alcanzaron los 900 granos por m² fueron VC5, 4, 22, 7 y 19. En INTA Río Primero se obtuvo un promedio de 1900 granos por m², ampliamente superior a los promedios de este experimento (Fuentes, 2018). En cambio, Berdén Prates y Rabery Cáceres (2008) en Paraguay obtuvieron en promedio, valores comparables al promedio de este experimento.

Al dividir el número de granos por m² por el número de vainas por m², se puede estimar el número de granos por vaina. Estos valores se ubicaron en el rango de 1 a 3 granos por vaina, con los mayores valores en las líneas experimentales 5, 6, 13, 15 y 27 con 3 granos por vaina. Este atributo es modificado en menor medida por el ambiente, comparado con el número de vainas y de granos. Por lo cual identificar genotipos con alto número de granos por vaina puede resultar de

interés para el mejoramiento genético, especialmente para ambientes adversos de anegamiento como el experimentado en este ensayo.

Con respecto al peso promedio de 100 granos (Figura 9), se observaron diferencias significativas entre los genotipos ($p=0,0024$) y la mayoría de los genotipos osciló entre 9 y 11 g con un promedio de 10 g. Estos valores resultaron más bajos que los alcanzados por estas líneas en la Región Oriental, que varían de 14 a 17 g en condiciones normales (Tabla 2). Las líneas 23, 17, VC3, 6 y VC6 obtuvieron los mayores pesos de 100 granos (> 11 g). Para los ensayos de Berdén Prates y Rabery Cáceres (2008) en Paraguay el peso promedio de 100 granos fue de 12,9 g, muy similar a lo alcanzado por la línea 23 (12,6 g). En los ensayos de la Cooperativa Chortitzer en los años anteriores se obtuvieron en promedio: 13,2 g a nivel productor y 14,2 g en parcelas de ensayos en la zafra 2016; 11,2 g en ensayos en la zafra 2017 y 11,2 g en ensayos INBIO/Chortitzer en la zafra 2018 (Morel, A. comunicación personal). Los factores del ambiente durante el llenado de los granos afectan el peso alcanzado, y se han documentado los efectos del calor y la sequía, combinados, sobre el peso de grano en soja (Veas et al., 2021) pero aún no se han estudiado los efectos del calor combinado con anegamiento. Cabe resaltar que, a pesar de las condiciones de anegamiento y calor, algunas de las líneas de

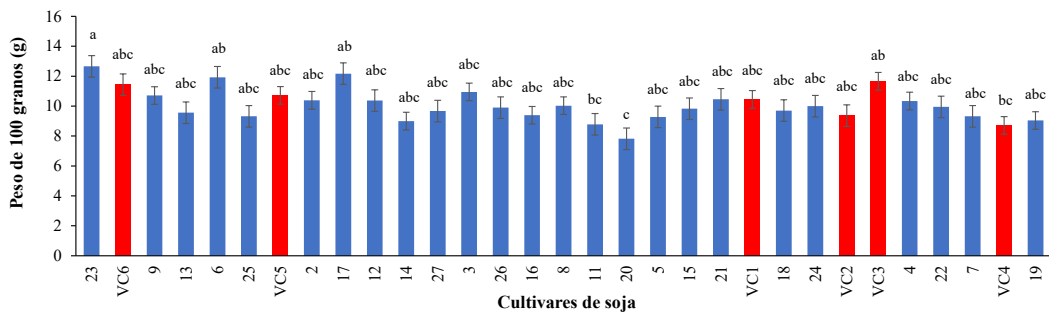


Figura 9. Peso de 100 granos (g) en 25 líneas experimentales (en color azul) y 6 variedades comerciales (VC, en color rojo) de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Los cultivares están ordenados como en la Figura 3. Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey con 5% de significancia

este experimento (como la 6, 17 y 23) alcanzaron los promedios del ensayo de INBIO/Chortitzer de 2018.

Tal como se esperaba, el componente que más se asoció al rendimiento fue el número de granos por superficie, como lo muestra el elevado coeficiente de correlación entre variables (Tabla 5). En un rango amplio de condiciones agronómicas, el número de granos es el componente que mejor explica las variaciones en la productividad del cultivo, cercano al 80% de la variación en el rendimiento está explicado por la modificación del número de granos, y alrededor del 30% por la variación del peso de granos (Toledo, 2018). En este ensayo, el 67% de la variabilidad del rendimiento se explicó por su asociación lineal con el número de granos.

Al comparar las características de las cinco líneas experimentales de soja que alcanzaron los rendimientos más elevados en este ensayo (Tabla 6) se puede observar que cada una de ellas alcanza elevado rendimiento a través de una combinación particular de atributos. Para la línea 23, la cual alcanzó el mayor rendimiento, se destaca el mayor número de vainas y peso de granos, respecto al promedio de todas las líneas. Por otro lado, la línea 25 tuvo ciclo más largo, más ramas y vainas, pero menor peso de grano (Tabla 6). La combinación de estos atributos podría ser de utilidad como marcadores fisiológicos para asistir al mejoramiento vegetal, junto con herramientas moleculares (Hall y Sadras, 2009; Tester y Langridge, 2010; Lopez et al., 2021).

TABLA 6. Comparación de atributos en las líneas de soja de mayor rendimiento evaluadas en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Las flechas y el signo igual indican valores mayores, menores o iguales al promedio de las líneas

Línea	23	9	13	6	25
Grupo de madurez	VII	VI	VI	VI	VII
Días a R1	35	35	35	40	50
Días a R8		Entre 95 a 105			115
Cobertura a R5		>80%			90
Ramas por planta		5-6			9
Vainas por m ²	↑	=	=	↓	↑
Granos por m ²	=	↑	↑	=	=
Granos/vaina	=	=	↑	↑	=
Peso de 100 granos	↑	=	↓	↑	↓

Rendimiento en aceite y proteína

A pesar de la diferencia de la variabilidad en los rendimientos, la concentración de aceite y proteína del grano resultó muy similar entre cultivares. La concentración de aceite tuvo valores entre 22,6 y 24,0 %, dentro de rango esperado en líneas de soja. En cambio, la concentración de proteína en los granos obtuvo valores muy bajos para una leguminosa, entre 26,1 y 27,8 %. Generalmente los valores de proteína en Paraguay son muy superiores (39,3% de proteína en el grano) para niveles de rendimiento en grano de 3000 kg/Ha (Benavides et al., 2007). En cambio, la soja producida en Argentina se caracteriza por tener alto contenido de aceite y baja proteína (Bosaz et al., 2019; Rodríguez Zurro y Terré, 2021). El contenido de proteína en soja de primera en una buena campaña (2016/2017) en Argentina fue de 36 % y en la de segunda de 37,5 %. En general,

TABLA 5. Coeficientes de correlación (r) entre el rendimiento en grano y sus componentes numéricos en 25 líneas experimentales y 6 variedades comerciales de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). En negrita se indica la relación significativa (P<0,05)

	Número de vainas por m ²	Número de granos por m ²	Peso de 100 granos (g)
Rendimiento en grano (g/m ²)	0,14	0,82	0,34

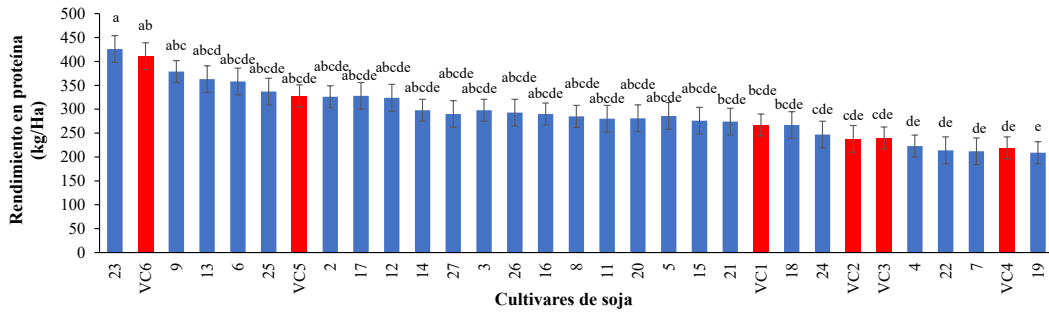


Figura 10. Rendimiento en proteína (kg de proteína/Ha) en 25 líneas experimentales (en color azul) y 6 variedades comerciales (VC, en color rojo) de soja evaluados en Loma Plata, Boquerón (Chaco paraguayo). Los cultivares están ordenados como en la Figura 3. Cada barra es el promedio de 3 repeticiones. Los segmentos indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey con 5% de significancia

cuando los factores ambientales son favorables y se establece un elevado rendimiento en grano, la concentración de proteína en los granos disminuye (efecto de dilución) y aumenta la concentración de aceite en los granos (Cuniberti, 2017). La elección del genotipo y la fertilización nitrogenada surgen como herramientas para incrementar el porcentaje de proteína en los granos de soja (Di Mauro et al., 2023).

En los genotipos evaluados, los rendimientos en grano fueron bajos y también resultaron bajos los valores de concentración de proteína y aceite, indicando que el exceso de lluvias en etapas reproductivas afectó el normal crecimiento de los granos y la acumulación de reservas en ellos. Los bajos valores de peso de 100 granos alcanzados por los genotipos (Figura 9) apoyan la noción de un deficiente llenado de los granos (ya sea por acortamiento anticipado de la duración y/o por la reducción de la tasa de llenado). Los días lluviosos provocan una reducción de la radiación incidente (a causa de la nubosidad) y reducción la capacidad fotosintética del cultivo. Esto es especialmente crítico en soja, un cultivo oleaginoso que produce una biomasa energéticamente costosa (aceite y proteína de los granos) y que está limitado por fuente tanto en el periodo crítico como en el llenado de granos (Borrás et al., 2004). Además, los bajos rendimientos se pudieron deber a un efecto negativo directo del ane-

gamiento sobre la actividad nitrogenasa de los rizobios (Sanchez et al., 2011) lo cual afectaría la disponibilidad de nitrógeno en el momento de mayor demanda, que es el llenado de los granos.

A partir de la concentración de proteína de los granos y de los valores de rendimiento en grano, se calculó el rendimiento en proteína (kg de proteína por hectárea) expresados al 13,5% de humedad (Figura 10). Estos valores copiaron la curva de rendimiento en grano (Figura 3) y sólo los cultivares VC6 y 23 superaron los 400 kg de proteína por Ha, asociado a sus altos niveles de rendimiento en grano.

CONCLUSIONES

Las líneas experimentales de soja 23, 9, 13, 6 y 25 son promisorias para el Chaco central paraguayo, con rendimientos competitivos respecto a las mejores variedades comerciales. Estos resultados preliminares deberán confirmarse en un mayor número de años y localidades del Chaco central paraguayo.

Si bien los rendimientos fueron bajos, para el sistema de producción chaqueño puede generar una cierta ganancia, ya que el costo de producción es muy bajo. Además, son opciones para rotación de cultivos o pasturas en una ecorregión tan dinámica como el Chaco central. La rusticidad frente a diferentes situaciones tan extremas,

como lo son el exceso o déficit hídricos, es una característica deseable para líneas y variedades que quieren posicionarse comercialmente en esta región.

El crecimiento vegetativo fue una característica para resaltar de estas líneas, la mayoría de las cuales tuvieron una aceptable cobertura y alto NDVI en R5 a pesar de las condiciones ambientales adversas. La intercepción de la radiación en R1 en este tipo de ambiente puede mejorar con una mayor densidad de siembra.

El aumento de cobertura entre R1 y R5 no resultó un índice asociado al rendimiento. Tampoco el NDVI en R5. Esto dificultaría la estimación indirecta de la tasa de crecimiento del cultivo en el periodo crítico de soja a través de mediciones rápidas y sencillas.

La línea 23, de mayor productividad en condiciones de excesos hídricos, con elevado número de vainas y peso de grano, podrían adaptarse a suelos con alta frecuencia de inundación (cambisoles, luvisoles). Tiene un ciclo muy acorde al que utilizan los productores de soja en la zona, fue una de las mejores en cobertura y muy competitiva frente a las variedades comerciales ya introducidas en el Chaco paraguayo. Ante las situaciones ambientales extremas de temperatura e inundación, resistió y aprovechó con eficiencia de los recursos del ambiente. Su utilidad en sistemas de rotación en los arrozales chaqueños podría ser un tema de interés para próximas investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesionales Aníbal Morrel y Claiton Rodrigues por su asistencia en el diseño del experimento; Estela Ojeda, Ariel Duarte y Arturo Penayo del Instituto de Biotecnología Agrícola, Ariel Benítez de la Cooperativa Chor-titzer, y a Jenny Dueck y Natalia Escobar, por la ayuda brindada en varias etapas de este trabajo.

APORTES DE LOS AUTORES

O. Paredes y D. Rondanini idearon las hipótesis, diseñaron el experimento, analizaron los datos. O. Paredes ejecutó el experimento y recolectó los datos. D. Rondanini escribió el manuscrito.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen intereses contrapuestos para declarar que sean relevantes para el contenido de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAPO. (2016). *Adaptación regional avanzada de 16 líneas y variedades de soja*. Disponible en <https://www.anapobolivia.org/publicaciones.php?op=1&tipo=5&id=852>.
- Andrade, F., Sala, R., Pontaroli, A., y León, A. (2009). Chapter 11. Integration of biotechnology, plant breeding and crop physiology. Dealing with complex interactions from a physiological perspective. En: V. Sadras y D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier.
- Andrade, F. (2021). *Los desafíos de la agricultura global*. [Archivo PDF] Disponible en: <https://intainforma.inta.gob.ar/los-desafios-de-la-agricultura-global/>
- Arce, L., Herken Krauer, J.C. y Ovando, F. (2011). La Economía del Paraguay entre 1940-2008: Crecimiento, Convergencia Regional e Incertidumbres. *Centro de Análisis y Difusión de la Economía Paraguaya*. Asunción. Disponible en: <http://www.cadep.org.py/2011/02/proyecto-bicentenario-la-economia-de-paraguay-entre-1940-y-2008/>
- Baranski, D. (2021). *Paraguay, optimizando el monitoreo del cultivo de soja*. Campaña 2020/21. Disponible en: https://site.geoagro.com/casos_de_uso/validacion-a-campo-de-indices-verdes/

- Barboza, F., Hoffmann, R. y Netto, A. (1998). Tomo III Documentación Suelos. En: Proyecto Sistema ambiental del Chaco. *Cooperación Técnica Paraguayo-Alemana*. San Lorenzo. [Archivo PDF] Disponible en <http://www.geologiadelparaguay.com.py/PSAC-TomoII.PDF>.
- Benavides, R., Gonzalez, E., Fresoli, D., Santos, D. y Soro, M. (2007). Evolución del contenido de proteína y aceite en grano de soja en Argentina entre las campañas 1999-2000 y 2005-2006. Prosoja. *Revista Agromensajes*, UNR. [Archivo PDF] Disponible en: <https://prosoja.org.ar/pdf/5PROSOJAPROTEINA.PDF>.
- Berdén Prates, J.E. y Rabery Cáceres, S.H. (2008). Espaciamiento entre hileras para variedades de soja de ciclo precoz. *Investigación Agraria*, 10(1), 53-58.
- Board, J., Wier, A. y Boethel, D. (1995). Source strength influence on soybean yield formation during early and late reproductive development. *Crop Science*, 35, 1104-1110.
- Borrás, L., Slafer, G. y Otegui, M.E. (2004). Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86, 161-146.
- Bosaz, L.B. Gerde, J.A., Borrás L., Cipriotti, P.A., Ascheri, L., Campos, M., Gallo, S. y Rotundo, J.L. (2019). Management and environmental factors explaining soybean seed protein variability in central Argentina. *Field Crops Research*, 240, 34-43.
- CAPECO. (2023). Área de siembra, producción y rendimiento de soja. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>
- CEPAL. (2014). *La Economía del Cambio Climático en el Paraguay*. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37101-la-economia-cambio-climatico-paraguay>.
- Cober, E.R., Curtis, D.F., Stewart, D.W. y Morrison, M.J. (2014). Quantifying the effects of photoperiod, temperature and daily irradiance on flowering time of soybean isolines. *Plants (Basel)*, 3, 476-497.
- Crusiol, L., Neiverth, W., Rio, A., Sibaldelli, R., Ferreira, L., Carvalho, J., Nepomuceno, A., Neumaier, N. y Farias, J. (2013). *NDVI de estádios de desenvolvimento da soja BRS 284 em condições de campo*. Embrapa. [Archivo PDF] Disponible en: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/964365/1/NDVIdeestadiosdedesenvolvementodasoja-BRS284emcondicoesdecampo.pdf>
- Cuniberti, M. (2017). *La soja 2017 tuvo alto contenido de aceite y bajo de proteína*. Disponible en: <https://www.infocampo.com.ar/la-soja-2017-tuvo-alto-contenido-de-aceite-y-bajo-de-proteina/>
- Di Mauro, G., Schwalbert, R., Alvarez Prado, S., Saks, M.G., Ramírez, H., Costanzi, J. y Parra, G. (2023). Exploring practical nutrition options for maximizing seed yield and protein concentration in soybean. *European Journal of Agronomy*, 146, 126794.
- DMH. (2019). Información meteorológica. Disponible en: <http://www.meteorologia.gov.py/publicaciones/>
- EAAOC. (2019). *Soja en el NOA 2019*. Disponible en <https://www.eaac.gob.ar/?publicacion=soja-en-el-noa-2019>.
- Egli, D. y Zhen-Wen, Y. (1991). Crop growth rate and seeds per unit area in soybeans. *Crop Science*, 31, 439-442.
- Egli, D. y Bruening, W. (2006). Temporal profiles of pod production and pod set in soybean. *European Journal of Agronomy*, 24, 11-18.
- Fehr, W. y Caviness, C. (1977). Stages of soybean development. Ames, IA: Agriculture and Home Economics Experiment Station and Cooperative Extension Service, Iowa State University, EE.UU. Special Report 80.
- Fuentes, F.H. (2018). *Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Soja (RECSO) Campaña 2018-2019*. Disponible en: [54 ● ● ●](https://agro-</p></div><div data-bbox=)

- verdad.com.ar/wp-content/uploads/2019/08/Recso1819-Completo.pdf
- Fundacao Mato Grosso. (2021). *Tecnología y producción de soja*. Disponible en: <https://www.fundacaoms.org.br/publicacoes/tecnologia-e-producao-safra/tecnologia-e-producao-soja-safra-2018-2019>.
- Glatzle, A. (2005). Sistemas Productivos en el Chaco Central Paraguayo: Características, Particularidades. [Archivo PDF] Disponible en: <http://biblioteca.mades.gov.py/wp-content/uploads/2017/11/sistemas-productivos-en-el-chaco-central-paraguayo.pdf>
- Green Chaco. (2021). Resumen de acciones Proyecto Green Chaco. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=U16wWVrSUJk>
- González Santander, A.V. (2016). *Atlas de sequías en Paraguay basado en el Análisis Regional de L-Momentos*. Disponible en <http://www.proyectoclima.com.py/>
- Gutiérrez-Soto, M., Piedra, E., Rodríguez, W. y Araya, J.M. (2011). El GreenSeeker y el estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*, 22, 397-403.
- Hall, A. y Sadras, V. (2009). Chapter 21. Whither crop physiology? En: V. Sadras and D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier.
- Hallauer, A. (2007). History, contribution, and future of quantitative genetics in plant breeding: Lessons from maize. *Crop Science*, 47: S4-S19.
- Harder, W. (2021). *Disertación en la Jornada de Semilleros y Fitosanitarios, Expo Pioneros*. Disponible en: <https://cifca.agr.una.py/unacategorized/principios-para-un-proceso-agricola-sostenible-en-el-chaco-paraguay/>
- ICASA. (2019). *Informe técnico medioambiental*. Disponible en <http://www.icasa.com.py>
- Jiang, H. y Egli, D. (1995). Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy Journal*, 87, 264-267.
- Kantolic, A. y Slafer, G. (2001). Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72,109-118.
- Kantolic, A., Giménez, P. y de la Fuente, E. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad de soja. En: *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. 2da edición. Editorial Facultad de Agronomía.
- Koester, R.P., Skoneczka, J.A., Cary, T.R., Diers, B.W. y Ainsworth, E.A. (2014). Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. *Journal of Experimental Botany*, 65, 3311-3321.
- Liang, Q., Chen, L., Yang, X. et al. (2022). Natural variation of Dt2 determines branching in soybean. *Nature Communications*, 13, 6429.
- Lopez, M. A., Freitas Moreira, F. y Rainey, K.M. (2021). Genetic relationships among physiological processes, phenology, and grain yield offer an insight into the development of new cultivars in soybean (*Glycine max* L. Merr). *Frontiers in Plant Science*, 12, 651241.
- Mariotti, J, Oyarzabal, E., Osa, J., Bulacio, A. y Almada, G. (1976). Análisis de estabilidad y adaptabilidad de genotipos de caña de azúcar. I: interacciones dentro de una localidad experimental. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 13, 105-127.
- Masino, A., Rugeroni, P., Borrás, L. y Rotundo, J. (2018). Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. *European Journal of Agronomy*, 98, 14–24.
- Monzon, J., La Menza, N., Cerrudo, A., Canepa, M., Rattalino Edreira, J., Specht, J., Andrade, F. y Grassini, P. (2021). Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. *Field Crops Research*, 261, 108016.
- Morais, O.P. (1980). Adaptabilidade, estabilidade de comportamento e correlações fenotípicas,

- genotípicas e de ambiente em variedades e linhagens de arroz (*Oryza sativa* L.). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2007001100008&script=sci_arttext.
- Morel, W. (2017). *Nuevas variedades de soja*. IPTA/INBIO. Capitán Miranda. Paraguay. Disponible en <https://www.pressreader.com/paraguay/abc-color/20170315/281483571191411>.
- Morlin, F. (2018). Sensores de dossel do monitoramento da variabilidade temporal das culturas da soja e do ameindoim. Tesis de doctorado. Universidade Estadual Paulista Jaboticabal. Disponible en: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/155945/carneiro_fm_dr_jabo.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- Neufeld, E. (2019). *Integración Agrícola Ganadera*. Bahía Negra, PY. [Archivo PDF] Disponible en: <https://greencommoditiesparaguay.org/wp-content/uploads/2018/12/2.-Egon-Neufeld-Se-viene-la-soja-PNUD-2.pdf>
- Nico, M, Mantese, A.I., Miralles, D.J. y Kantolic, A.G. (2016). Soybean fruit development and set at the node level under combined photoperiod and radiation conditions. *Journal of Experimental Botany*, 67(1), 365-377.
- Passerieu, C. (2017). *La soja en el Chaco*. Disponible en <http://www.elagro.com.py/agricultura/la-soja-en-el-chaco-paraguay-puede-venir-para-quedarse-segun-experto/>
- Patrignani, A. y Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312-2320 .
- Piris da Motta Fleitas, B. (2020). Relatorio de impacto ambiental. [Archivo PDF] Disponible en: https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2020/09/2533_Moleri_RIMA_2020.pdf.
- RECSO. (2019). *Red Nacional de evaluación de cultivares de soja*. <https://inta.gob.ar/docu-mentos/red-nacional-de-evaluacion-de-cultivares-de-soja-recso-informe-tecnico-de-resultados-campana-2018-19>
- Renshaw, J. (1996). Los Indígenas del Chaco Paraguayo: *Economía y Sociedad*. Editora Asunción.
- Rizzo, F. (2000). Pautas de manejo para lograr rendimientos elevados y estables. *Revista Agromercado* Disponible en: http://www.agrobit.com.ar/Info_tecnica/agricultura/soja/AG_000039so.htm
- Rodríguez Zurro, T. y Terré, E. (2021). ¿Cuál es la situación de la calidad de la soja en Argentina en relación a sus principales competidores? Bolsa de Comercio de Rosario. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/cual-es-la>
- Salica, R.M. (2019). *Evaluación de rendimientos en distintos sistemas de siembra de soja en Formosa*. Disponible en: http://amanecerrural.com.ar/es/nota_tecnica/08371-evaluacion-de-rendimientos-en-distintos-sistemas-de-siembra-de-soja-en-formosa.
- Sánchez, C., Tortosa, G., Granados, A., Delgado, A., Bedmar, E.J. y Delgado, M.J. (2011). Involvement of *Bradyrhizobium japonicum* denitrification in symbiotic nitrogen fixation by soybean plants subjected to flooding. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 212-217.
- Tejada Rodriguez, A., Regeiro, D.B., Vicentin Masaro, J., Regúnaga, M., Jorge, N. y Trigo, E. (2022). Cultivos genéticamente modificados (GM) en la agricultura paraguaya. [Archivo PDF] Disponible en: https://www.inbio.org.py/informes/publicaciones/OGM-Paraguay_2022.pdf
- Tester, M. y Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327, 818-822.
- Toledo, R.E. (2018). *Ecofisiología, rendimiento y calidad de soja*. FCA- UNC. [Archivo PDF] Disponible en: <http://www.agro.unc.edu.ar/~wpweb/cereales/wp-content/uploads/>

sites/31/2018/07/Ecofisiologia-rendimien-
to-y-calidad-en-soja-.pdf

- Veas, R.E.A., Ergo, V.V., Vega, C.R.C., Lascano, R.H., Rondanini, D.P. y Carrera, C.S. (2021). Soybean seed growth dynamics exposed to heat and water stress during the filling period under field conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(4), 472-485.
- Zuil, S. (2017). Elección de cultivares de soja en el NEA. *Revista Voces y Ecos*, 18(38), 8-13.