

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



Trabajo Final de Grado

Ingeniería Agronómica

“Evaluación de alternativas de nutrición del cultivo de soja (*Glycine max*) en la
Cuenca del Salado”

Aguirre Jones, Bernardo

Director: García, Federico Augusto

Codirector: García Stepien, Luis Ezequiel

Lomas de Zamora, 2024

“Las opiniones expresadas por el autor de este Trabajo no representan necesariamente los criterios de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Lomas de Zamora”

AGRADECIMIENTOS

El culminar esta carrera de grado es un reflejo del apoyo y del esfuerzo de muchas personas que, directa o indirectamente, estuvieron presentes y fueron parte de este camino. En palabras que nunca serán suficientes, quiero expresarles mi gratitud.

Primero, a Dios, porque es mi fuente de fuerza, paz y esperanza. Reconozco en su guía el haber iniciado estos estudios, y no hubo momento en el que su provisión no estuviera presente.

A mi esposa, Damaris, que me apoya cada día, me hace feliz y me inspira a cumplir mis metas.

A mi familia, quienes estuvieron desde el primer día, soportando y acompañando en las buenas y en las malas, ayudándome siempre a juntar las “plantitas y bichitos” y permitiendo que hoy esté terminando esta hermosa carrera.

A mis amigos y compañeros, con los cuales compartimos infinidad de momentos dentro y fuera de las paredes de la facultad. Los que terminaron, los que siguen y los que no, todos dejaron una marca en esta casa de estudios y en mi corazón.

A mi director, el Ing. Agr. Federico García, y codirector, el Dr. M.Sc. Ing. Agr. Ezequiel García Stepien, quienes pusieron a disposición su tiempo y conocimientos para guiarme en esta última etapa, acompañando y esperando cuando era necesario, pero también motivándome cuando lo necesitaba.

Finalmente, a todos los profesores de la Facultad de Ciencias Agrarias, que con tanta vocación dedican su tiempo a formar nuevos profesionales con excelencia. En especial, a la Cátedra de Botánica Morfológica, de la cual tengo orgullo de formar parte, y que brindó su apoyo y puso su confianza en mí desde que inicié este camino.

CONTENIDO

Índice de figuras.....	5
Índice de tablas	6
Índice de abreviaciones	6
Resumen	8
Abstract:.....	9
1. Introducción.....	10
1.1. El cultivo de soja en Argentina.....	10
1.2. Requerimientos de la planta de soja	11
1.3. La problemática de los fertilizantes.....	14
1.4. Fertilizantes en base a nanopartículas	16
1.5. Características de la Cuenca del Salado.....	19
2. Objetivos	21
2.1. Objetivo general.....	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. Hipótesis.....	22
3.1. Hipótesis general	22
3.2. Hipótesis específicas	22
4. Materiales y métodos	22
4.1. Caracterización del área de estudio	22

4.2.	Características edafoclimáticas	23
4.2.1.	Clima	23
4.2.2.	Suelo	26
4.3.	Material genético utilizado	28
4.4.	Diseño experimental y tratamientos	30
4.4.1.	Control de malezas:	32
4.4.2.	Control de enfermedades:.....	33
4.5.	Determinaciones en el cultivo	33
4.6.	Análisis económico	34
4.7.	Análisis estadístico	35
5.	Resultados y discusión	36
5.1.	Número de granos por planta.....	36
5.2.	Número de granos por m ²	37
5.3.	Peso de 1000 granos.....	38
5.4.	Rendimiento.....	39
5.5.	Análisis económico	41
6.	Conclusiones	44
7.	Bibliografía	45
	Anexos.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la superficie sembrada en la Argentina con los principales cultivos de grano.....	11
Figura 2. Destino de los fertilizantes aplicados al suelo.....	16
Figura 3. Mecanismo de acción de los nanofertilizantes de liberación controlada (CRF, por sus siglas en inglés) de nutrientes en el campo.	18
Figura 4. Toposecuencia típica de la Cuenca del Salado.	20
Figura 5. Plano de la ubicación del ensayo.....	23
Figura 6. Distribución de las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) durante la campaña 2021/2022 para General Belgrano.	24
Figura 7. Precipitaciones mensuales (mm) durante los meses de noviembre de 2021 a abril de 2022.	25
Figura 8. Plano del ensayo (rectángulo de color rojo) solapado con la carta de suelos.	26
Figura 9. Fenología del cultivo de soja, modelo correspondiente al cultivar DM40R16, sembrado el día 16/11, en el departamento de General Belgrano.	30
Figura 10. Número granos por planta de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.	36
Figura 11. N° granos por metro cuadrado (granos m^{-2}) de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.	38
Figura 12. Peso de 1000 granos (g) de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.	39
Figura 13. Rendimiento de cada tratamiento en el cultivo de soja.	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Estadios vegetativos y reproductivos de acuerdo con la escala fenológica propuesta por Fehr <i>et al.</i> (1971).....	12
Tabla II. Composición del complejo de suelos Tuyutí.	27
Tabla III. Composición de la asociación de suelos Saladillo 5.	27
Tabla IV. Características químicas del suelo del ensayo en los primeros 20cm de profundidad.	28
Tabla V. Descripción de los tratamientos del ensayo.....	31
Tabla VI. Productos herbicidas aplicados en el ensayo, dosis y momento de aplicación.....	32
Tabla VII. Análisis de Margen Bruto de los diferentes tratamientos en el cultivo de soja.	41

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

°C: grado Celsius.
 Ca: Calcio. Elemento químico.
 cc: centímetro cúbico.
 CE: conductividad eléctrica.
 cm: centímetro.
 CRF: controlled release fertilizer (fertilizante de liberación controlada).
 DCBA: diseño en bloques completamente aleatorizados.
 DMS: diferencias mínimas significativas.
 dS: deciSiemens.
 FBN: fijación biológica de Nitrógeno.
 gr: gramo.
 H°: humedad.
 ha: hectárea.
 INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
 K: Potasio. Elemento químico.
 kg: kilogramo.
 km: kilómetro.
 l: litro.

m: metro.
m²: metro cuadrado.
MAP: fosfato monoamónico.
meq: miliequivalente.
Mg: Magnesio. Elemento químico.
mg: miligramo
mm: milímetro.
Mmhos: milimhos.
MO: materia orgánica.
N: Nitrógeno. Elemento químico.
Na: Sodio. Elemento químico.
NMs: nanomateriales.
NO₃: nitrato.
NPs: nanopartículas.
P: Fósforo. Elemento químico.
pl: planta.
ppm: partes por millón.
S: Azufre. Elemento químico.
tn: tonelada.
US\$: dólares estadounidenses.

RESUMEN

La utilización de fertilizantes en la agricultura ha permitido satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial, logrando aumentar la producción sin incrementar la superficie cultivada. Sin embargo, su uso inadecuado y su baja eficiencia, suponen una amenaza para el ambiente con un incremento en los costos de producción. La aparición de fertilizantes formulados en base a nanopartículas responde a esta necesidad de aumentar la producción, de forma más eficiente y con menor impacto negativo en el ambiente que los fertilizantes convencionales. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de fertilizantes de nanopartículas sobre el rendimiento del cultivo de soja en la región de la Cuenca del Salado de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El ensayo se llevó a cabo en un campo experimental ubicado en el partido de General Belgrano, durante la campaña 2021-2022. Se realizaron 4 tratamientos: T1 (testigo sin fertilizar); T2 (120 kg ha⁻¹ MAP); T3 (3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T5 (Mist VL[®] + 60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]). Se evaluaron las variables de producción: número de granos por planta, número de granos por unidad de superficie, peso de 1000 semillas y rendimiento en grano. Se realizó un análisis estadístico para encontrar diferencias significativas entre tratamientos. Finalmente, se realizó un análisis económico mediante un margen bruto y rendimiento de indiferencia, entre tratamientos, con el fin de observar las diferencias entre los costos y beneficios entre ellos. El uso de fertilizantes de nanopartículas demostró rendimientos similares a los productos convencionales, pero con beneficios económicos superiores. Esto sugiere que son alternativas prácticas y rentables, reduciendo riesgos y siendo una opción más amigable con el ambiente.

Palabras clave: Soja, fertilización, nanopartículas, rendimiento, margen bruto.

ABSTRACT:

The use of fertilizers in agriculture has allowed meeting the growing demand for food worldwide, increasing production without necessarily needing to expand cultivated land. However, their improper use and low efficiency pose a threat due to the environmental impact they cause, in addition to increasing production costs. The emergence of fertilizers formulated on a nanoparticles basis address this need to increase global agricultural production with a more efficient use and less negative impact on the environment than conventional fertilizers. The objective of this study was to evaluate the effect of nanoparticle fertilizers on soybean yield in the Salado basin region of Buenos Aires province. The trial was conducted in an experimental field located in General Belgrano, Buenos Aires, during the 2021-2022 summer season. Four treatments were applied: T1 (untreated control); T2 (120 kg ha⁻¹ MAP); T3 (3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®); T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®); T5 (Mist VL® + 60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®). Number of grains per plant, number of grains per unit area, 1000-seed weight, and grain yield were evaluated as production variables. Statistical analysis was performed to find significant differences between treatments. Finally, an economic analysis was conducted using gross margin and indifference yield, comparing each treatment to observe differences in costs and benefits. The use of nanoparticles fertilizers demonstrated similar yields to conventional products, but with superior economic benefits. This suggests that they are practical and cost-effective alternatives, reducing risks and being a more environmentally friendly option.

Key words: Soybean, fertilization, nanoparticles, yield, gross margin.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El cultivo de soja en Argentina

La producción de soja es una de las actividades más relevantes para el sector agropecuario argentino desde hace más de 30 años (*Glycine max* (L.) Merrill). Introducida en el país a mediados de los años '70, donde comenzó a tener escala comercial, entre 1980 y 2022 la superficie implantada con este cultivo pasó de 2 a 16 millones de hectáreas, proceso que se conoce como "sojización". Tal fue su crecimiento que, actualmente es el principal complejo exportador del país, teniendo en el año 2022 un estimado de US\$ 24.868 millones (un 28,1 % del total de exportaciones), correspondientes a la comercialización del grano, harina, pellets, aceite, biodiésel y otras exportaciones de soja (INDEC, 2023). Esta expansión tiene su origen en "revolución verde", que supone un cambio de paradigma en las prácticas agrícolas en numerosas zonas del mundo. Entre los cambios productivos se puede mencionar la introducción de nuevas tecnologías, el uso de ciertas maquinarias y la aplicación de fertilizantes y agroquímicos. Este fenómeno se inicia con la aparición de variedades de trigo de elevados rendimientos (germoplasma mexicano) y de ciclos más cortos (germoplasma japonés), lo que permitió la introducción de dos cosechas anuales, una de invierno y otra de verano (Reboratti, 2010). Es así como la soja apareció como la opción más adecuada para cultivo de segunda pudiendo ser sembrada luego de la cosecha de trigo. El contexto que atravesaba la región pampeana para fines de la década de los '80 fue muy favorable para el desarrollo de este cultivo, tanto desde el punto de vista climatológico (se encontraba en un ciclo húmedo) como por los altos precios internacionales y la demanda creciente de China como principal consumidor.

La explosión del cultivo de soja en los años '90 llegó de la mano de la adopción, por parte de los productores agrícolas de la región, de nuevas tecnologías: la utilización de semillas transgénicas, complementado por el uso de herbicidas efectivos y baratos, la siembra directa y labranza cero, que se popularizaron con la soja y le dieron un aspecto conservacionista del suelo, el desarrollo de maquinaria agrícola con nuevas tecnologías. La trama productiva se consolidó e incluyó la actividad primaria, la industria y los servicios, bajo condiciones favorables de precios relativos (Reboratti, 2010; Strada Rodríguez y Vila, 2015). Posteriormente, la introducción del mercado de biocombustibles como potencial destino de la soja, la aparición de nuevos métodos de retención del grano en el campo como el silo bolsa, y de una nueva red de puertos privados en cercanía de las áreas productoras, afianzaron este cultivo en nuestro país. En la Figura 1, se observa la evolución de la superficie sembrada de diferentes cultivos, entre el año 1970 y el 2020. Se aprecia el sostenido crecimiento del cultivo de soja, y su explosión a fines de los años '90.

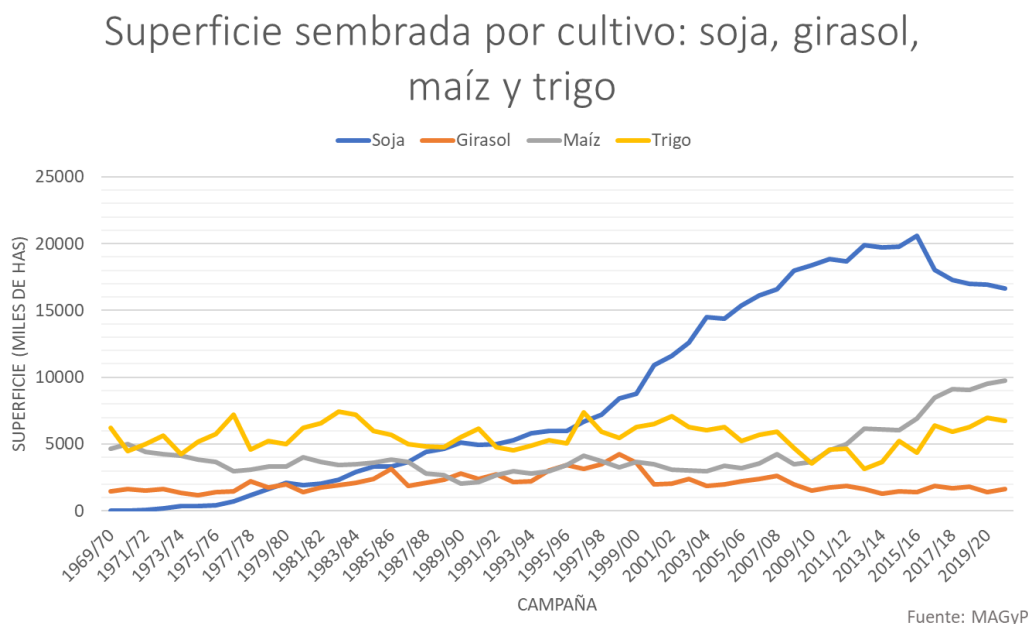


Figura 1. Evolución de la superficie sembrada en la Argentina con los principales cultivos de grano.

Fuente: datos extraídos de MAGyP, gráfico de elaboración propia.

1.2. Requerimientos de la planta de soja

La soja es una especie perteneciente a la familia *Fabaceae* (ex Leguminosas), originaria de Asia. Es un cultivo anual, de ciclo estival, cuyo órgano de mayor interés comercial es la semilla o grano. Esta se encuentra dentro de un fruto tipo legumbre o vaina, que puede alojar entre una y cinco semillas, siendo lo más usual dos o tres semillas por vaina en los cultivares más comunes (Kato *et al.*, 1954), y varía de 2 a 7 cm de longitud en algunos cultivares (Carlson y Lersten, 2004). El número de vainas varía entre 2 a más de 20 por inflorescencia. Los estadios fenológicos en soja según la escala desarrollada por Fehr *et al.* (1971) pueden separarse en vegetativos y reproductivos, y se detallan en la Tabla I.

Estados vegetativos		Estados reproductivos	
Estado	Denominación	Estado	Denominación
VE	Emergencia	R1	Comienzo de floración
VC	Cotiledón	R2	Plena floración
V1	Primer nudo	R3	Comienzo fructificación
V2	Segundo nudo	R4	Plena fructificación
V3	Tercer nudo	R5	Comienzo de llenado de granos
V4	Cuarto nudo	R6	Máximo tamaño de grano
V5	Quinto nudo	R7	Comienzo de madurez
V(n)	Nudo n	R8	Plena madurez

Tabla I. Estadios vegetativos y reproductivos de acuerdo con la escala fenológica propuesta por Fehr *et al.* (1971).

El período crítico de este cultivo está dentro de su estadio reproductivo, en el cual se definen los componentes de rendimiento. Según la escala fenológica desarrollada por Fehr *et al.* (1971), el estadio reproductivo comienza en R1, con el inicio de floración, y finaliza en R8, con la madurez completa. La variabilidad en el rendimiento en planta se atribuye principalmente al número de granos, ya que es el factor que primero se determina y, por lo tanto, experimenta variaciones significativas en respuesta a las condiciones ambientales durante el desarrollo del cultivo. El peso del grano se define después, y puede ajustarse a cambios en el ambiente una vez que el número de granos está determinado, por lo tanto, cambia menos que este último

(Gutiérrez Boem *et al.*, 1998). El número de granos por unidad de superficie queda determinado durante el período entre R2 y R5 (floración completa a inicio de llenado de granos), y puede ser compensado solo de forma parcial por el aumento en el peso unitario de los granos (Baigorri, 1997). Según este último autor, el período crítico comienza luego de R4, y finaliza entre 10 a 12 días después de R5.

Los requerimientos nutricionales del cultivo de soja por tonelada de grano producido son de aproximadamente 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N), 8 kg ha⁻¹ de fósforo (P), 33 kg ha⁻¹ de potasio (K), 7 kg ha⁻¹ de Azufre (S), y 16 kg ha⁻¹ de calcio (Ca) (García, 2000). Es decir que, para un cultivo con un rendimiento en grano de 4.000 kg ha⁻¹, los requerimientos serían de 320 kg ha⁻¹ de N, 32 kg ha⁻¹ de P, 132 kg ha⁻¹ de K, 28 kg ha⁻¹ de S, y 64 kg ha⁻¹ de Ca. Si bien, debido a la intensificación de la agricultura, se pueden hallar deficiencias de varios nutrientes para el cultivo, N, P y S son generalmente los más deficientes en las zonas sojeras de Argentina (García, 2000).

En cuanto al N, si bien la soja presenta requerimientos muy elevados, una gran parte de este requerimiento es cubierto mediante la fijación biológica de N (FBN) a través de una simbiosis en la soja y una bacteria (*Bradyrhizobium*) (García, 2000). En la región pampeana, se han determinado aportes de N por vía FBN de entre 30 y 70 % de las necesidades totales de N del cultivo, dependiendo este porcentaje del nivel de fertilidad nitrogenada del suelo y de las características climáticas de la estación de crecimiento (González, 1996). El N forma parte de todos los aminoácidos, los cuales son la base de proteínas, ácidos nucleicos y la clorofila. Investigaciones han demostrado que la FBN no ocurre eficientemente si se aplican grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados al cultivo. Sin embargo, se observó que aplicaciones en bajos niveles de N como iniciador, puede ser de ayuda para suplir las necesidades de este

nutriente en la germinación, mejorando la formación temprana de raíces y hojas, lo cual subsecuentemente estimula la formación de nódulos y la FBN (Rao y Reddy, 2010).

Respecto al P, la respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosfatada depende del nivel del nutriente que esté disponible en el suelo, hallándose respuestas rentables cuando el contenido de P Bray es menor de 13-14 mg kg⁻¹ (García, 2000). Las recomendaciones de fertilización se basan en esta variable y el rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998).

El alto contenido de aceite y proteína en la semilla de soja tiene un alto costo energético para la planta, por lo que el nivel de P del suelo, donde existen respuestas ante la fertilización, es menor que para otros cultivos. Esto la hace más sensible a deficiencias de P en el suelo, por lo que es importante que el productor aplique una estrategia de fertilización para obtener mejores rendimientos (García, 2000).

En cuanto al S, la respuesta a la fertilización azufrada en soja ha ido en aumento en los últimos años en la región pampeana, principalmente en suelos degradados y que han tenido años de agricultura continua. El S es componente de proteínas y enzimas reguladoras de la fotosíntesis y tiene intervención en la FBN. Como citan García Lamothe *et al.* (2017), el S “participa en la estructura proteica a través de puentes S-S, lo que está aparentemente relacionado con la tolerancia a la falta de agua y al daño por heladas (Levitt, 1980)”.

1.3. La problemática de los fertilizantes

De acuerdo con las proyecciones del Banco Mundial, la población mundial aumentaría de 6.000 millones de personas en 1999 a 7.000 millones de personas en 2020. La estimación demostró ser inferior a la cifra real observada para ese año, que llegó a ser de 7.821 millones de personas (Banco Mundial, 2024). Esto tiene implicaciones significativas en relación con la necesidad de alimentos. Una población real mayor de lo estimado implica una mayor

demanda de alimentos para satisfacer las necesidades nutricionales y calóricas de esa población adicional. Debido a la limitación en la disponibilidad de tierras aptas para la agricultura, hasta el 90 % de este aumento necesario de la producción de alimentos tendrá que provenir de tierras ya cultivadas (FAO, 2002), es decir, aumentando la productividad y no la superficie cultivada.

Ante esta necesidad de aumentar la producción de alimentos, se incrementó el empleo de fertilizantes inorgánicos, ya que se adicionan nutrientes esenciales que mejoran la productividad agrícola. Es difícil estimar exactamente la contribución de los fertilizantes inorgánicos de la producción agrícola en los últimos años, debido a la interacción de muchos otros factores que inciden sobre los mismos. Sin embargo, se estima que aproximadamente un 40 % del suministro de proteína de la dieta mundial a mediados de los años 90' tuvo origen en el amoníaco sintetizado por el proceso de Haber – Bosch para producción de fertilizantes (Smil, 1999).

No obstante, el uso inadecuado de los fertilizantes convencionales ha tenido un impacto negativo sobre los ecosistemas. Además, la eficiencia del uso de los nutrientes aplicados a través de fertilizantes (especialmente el N), por las plantas es muy bajo, con pérdidas de entre un 30-50 % (DeRosa, 2010). Otros autores como Preetha *et al.* (2017) plantean eficiencias de uso en fertilizantes convencionales de entre 30-35 % para N, 18-20 % para P, y 35-40 % para K. En este sentido, gran parte de lo que se aplica se pierde por lixiviación y no llega a ser utilizado por la planta, lo que trae aparejado consecuencias económicas y ambientales. Cantidades significativas del P y N aplicados son transportadas a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, disruptiendo con los ecosistemas acuáticos y amenazando la

salud humana y la vida acuática, causando eutrofización y salinización de suelos. En la Figura 2, se plantean los posibles destinos de los fertilizantes al ser aplicados al suelo.

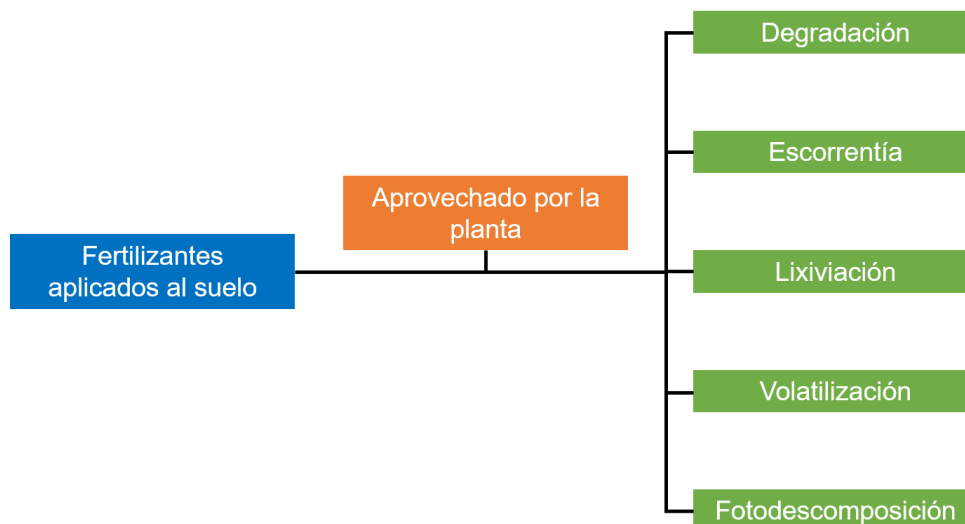


Figura 2. Destino de los fertilizantes aplicados al suelo.

Fuente: adaptado de Yadav *et al.* (2023).

El agregado de fertilizantes al cultivo de soja es significativamente menor que en otros cultivos en Argentina. En la campaña 2021- 2022, solo un 8 % de los fertilizantes consumidos correspondieron con aplicaciones en cultivos de soja, mientras que el trigo recibió un 30 % y el maíz un 39 % del total. De los 16 millones de hectáreas sembradas de soja, solo en un 44 % se usó fertilizantes, siendo este dato de un 95 % para el trigo y un 89 % para el maíz (Fertilizar AC, 2022). La dosis promedio de fertilizantes en soja es de 63 kg ha⁻¹, de los cuales un 97 % son fosforados.

1.4. Fertilizantes en base a nanopartículas

Los nanomateriales (NMs) son materiales de una unidad simple de entre 1 y 100 nanómetros de tamaño (Liu y Lal, 2015). Los nanofertilizantes, pueden ser NMs que aporten uno o más nutrientes a la planta o pueden ser aquellos que, sin proveer directamente de nutrientes al

cultivo, mejoren el funcionamiento de los fertilizantes convencionales. En este estudio se trabajó con la primera definición.

Los nanofertilizantes además de aumentar el crecimiento y rendimiento del cultivo, mejoran la eficiencia del uso del fertilizante por una mayor concentración de nutrientes y su liberación controlada, reducen la pérdida de nutrientes, tienen un menor impacto negativo sobre el ambiente y permiten reducir los costos del productor, en comparación con los fertilizantes convencionales (Liu y Lal, 2015; Yadav *et al.*, 2023). Con respecto al mecanismo de absorción de los nanofertilizantes por parte de las plantas, es posible que las nanopartículas (NPs) entren directamente a las células de la planta a través de la pared celular, si el tamaño de las partículas es menor que el de los poros de la pared (5 a 20 nm) (Nair *et al.*, 2010). El camino que siguen las NPs a través de la membrana celular, las interacciones con el citoplasma, y la utilización de los nutrientes que transportan, son complejos, especialmente por la falta de investigación en el tema. Sin embargo, ningún estudio ha excluido este mecanismo como una de las principales formas en que las raíces absorben los nutrientes de las NPs en la solución del suelo. Las NPs se disuelven en solución y liberan los nutrientes como iones solubles. En la Figura 3, se representa de forma gráfica el mecanismo de acción que tienen los nanofertilizantes de liberación controlada (CRF, por sus siglas en inglés) en el suelo. La planta absorbe los iones de nutrientes solubles provenientes de NPs como de fertilizantes convencionales disueltos indiscriminadamente. La diferencia está en que, la tasa de disolución y el alcance de las NPs en la solución del suelo es mayor debido al menor tamaño de partículas y la mayor superficie específica. En cuanto a la absorción foliar, al ser aplicados en la superficie de las hojas, las NPs pueden ingresar a través de los estomas o la base de los tricomas, y ser traslocados a diversos tejidos (Fernández y Eichert, 2009; Uzu *et al.*, 2010; Eichert *et al.*, 2008).

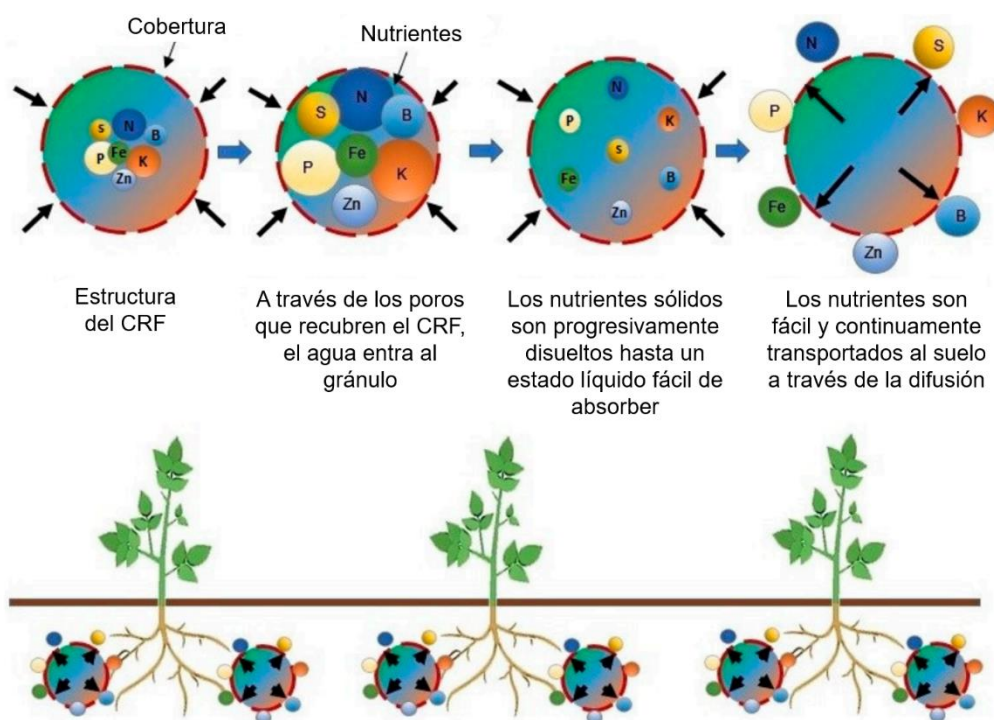


Figura 3. Mecanismo de acción de los nanofertilizantes de liberación controlada (CRF, por sus siglas en inglés) de nutrientes en el campo.

Fuente: adaptado de Yadav *et al.* (2023).

Las NPs de macronutrientes contienen uno o más elementos esenciales (N, P, K, Mg, y Ca) para las plantas. Grandes cantidades de fertilizantes convencionales de macronutrientes (principalmente N y P) son usados para incrementar la producción de alimento, fibra, y otros *commodities* esenciales. Smil (2002) estimó que los fertilizantes en base a N han contribuido a un 40% del incremento en la producción de alimento per cápita en los últimos 50 años, indicando el rol crítico de estos fertilizantes en la producción global de alimento. Como consecuencia de la baja eficiencia de uso y el alto impacto ambiental de los fertilizantes inorgánicos, el desarrollo de nanofertilizantes de macronutrientes de alta eficiencia, en reemplazo total o parcial de los fertilizantes convencionales, permite asegurar la sustentabilidad de la producción de alimentos y proteger al ambiente. El desarrollo de nanofertilizantes de macronutrientes es una prioridad en la investigación del área de

fertilizantes. Liu y Lal (2014) han reportado, aumentos en el rendimiento (20,4 %), crecimiento (18,2 %) y biomasa producida (41,2 %) en un cultivo de soja, utilizando un fertilizante en base a nanopartículas de hidroxiapatita con respecto a la fertilización con una fertilización con superfosfato.

1.5. Características de la Cuenca del Salado

El área agroecológica Cuenca del Salado incluye casi la totalidad de las cuencas de los ríos Salado y Samborombón, abarcando una extensión de aproximadamente 9 millones de hectáreas, equivalente a un 30 % de la superficie total de la provincia de Buenos Aires. Se ubica sobre el sector central de la provincia, ocupando también parte del sur de la provincia de Santa Fe y una pequeña porción de Córdoba. El río Salado de Buenos Aires desemboca al Río de la Plata en la Ensenada de Samborombón, recorriendo unos 650 km desde sus nacientes situadas al sudeste de la provincia de Santa Fe y Córdoba.

En cuanto a sus condiciones climáticas, presenta un régimen pluviométrico isohigro, con promedios de precipitaciones que van entre los 750 mm y 1000 mm en años normales. Es un clima templado cálido, con una marcada estacionalidad. Su superficie se encuentra constituida por numerosas lagunas y bañados, con regiones de abundante biodiversidad, en estrecha interacción con las tierras de producción agropecuaria. Suelen presentar inundaciones periódicas, una napa freática fluctuante cercana a la superficie y con agua de mala calidad en algunos casos, encharcamiento del suelo durante el invierno, alcalinidad y salinidad generalizada de los suelos, presencia de tosca, un horizonte arcilloso de muy baja permeabilidad y deficiencia de fósforo. Todos estos factores condicionan la aptitud de uso de estas tierras y la aplicación de modelos tecnológicos de altos insumos, considerándola marginal desde esta óptica (Cieza, 2006).

La actividad predominante en esta región se basa en la ganadería, siendo la principal zona de cría vacuna del país (Maresca, 2018), debido a la predominancia de pastizales naturales como base productiva. Los suelos con mayores aptitudes, de baja proporción en la región, se utilizan principalmente para cultivar pasturas, verdeos, o cultivos de cosecha (Cieza, 2006). Las problemáticas de halomorfismo e hidromorfismo presentes en los suelos son las mayores condicionantes para la producción agrícola.

Dentro de la marcada heterogeneidad de ambientes y comunidades botánicas en el ecosistema de pastizal en esta región, las diferencias en la vegetación se han agruparon en cuatro comunidades reconocibles a nivel de potrero (Fernández Greco y Rossi, 1997). Estas comunidades se modelan de acuerdo a la posición topográfica, a la influencia del contenido de sales en el suelo y al anegamiento, y han sido denominadas como A (loma), B (media loma), C (bajo dulce) y D (bajo salino) (León, 1975; León *et al.*, 1979; Fernández Greco, 1999) (Figura 4).



Figura 4. Toposecuencia típica de la Cuenca del Salado.
Adaptado de Batista *et al.* (2005).

La adopción y expansión de los sistemas de labranza cero y la mayor rentabilidad de los negocios basados en cultivos de grano frente a los de producción ganadera permitieron que

la producción agrícola de cultivos sobre mayor importancia y reemplace producciones ganaderas en esta región, principalmente cultivos de soja, maíz y trigo (Díaz Zorita *et al.*, 2002; Paruelo *et al.*, 2005). Dicha transformación redujo el consumo de agua del sistema y elevó el nivel freático, teniendo esto una influencia positiva sobre el rendimiento de los cultivos durante la última década (Nosetto *et al.*, 2012; Alsina *et al.*, 2020). Sin embargo, la extracción de nutrientes afectó la materia orgánica del suelo y la capacidad de ciclado de nutrientes (Wyngaard *et al.*, 2022; Larrea *et al.*, 2023). Este proceso se ha asociado también con una mayor respuesta a la fertilización con N, P y S por parte de los cultivos en la Pampa Interior (Ciampitti y Vyn, 2011; Torres Duggan *et al.*, 2012; Correndo, 2018; Carciochi *et al.*, 2020). Por lo tanto, por las oportunidades y amenazas expuestas en cuando a los planteos agrícolas en esta región, se ha desarrollado el siguiente trabajo, a fin de evaluar alternativas con las ventajas que la tecnología de nanopartículas ofrece en el cultivo de soja.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del uso de diferentes alternativas de fertilización sobre el rendimiento y beneficio económico en el cultivo de soja en la Cuenca del Salado.

2.2. Objetivos específicos

- I. Estudiar los efectos de diferentes estrategias de fertilización, con fertilizantes convencionales y nanofertilizantes, sobre el rendimiento y sus componentes en el cultivo de soja en condiciones de campo.
- II. Comparar costos y beneficios entre las diferentes alternativas de fertilización en el cultivo de soja a través del margen bruto y el rendimiento de indiferencia.

3. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis general

El uso de diferentes alternativas de fertilización afecta el rendimiento y beneficio económico en el cultivo de soja en la Cuenca del Salado.

3.2. Hipótesis específicas

- I. La utilización de una estrategia de fertilización con nanofertilizantes en el cultivo de soja en condiciones de campo produce un incremento en el rendimiento y sus componentes frente a una estrategia de fertilización convencional.
- II. La utilización de una estrategia de fertilización basada en nano fertilizantes promueve un mayor beneficio económico y un menor rendimiento de indiferencia en un cultivo de soja.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Caracterización del área de estudio

El ensayo se llevó a cabo en el establecimiento “El Chulengo” (35° 54’30” Sur; 58°40’26” Oeste), dentro de la localidad de Newton, ubicada en el partido de General Belgrano, Buenos Aires, durante la campaña 2021-2022 (Figura 5). La actividad económica principal del partido de General Belgrano es la producción primaria, principalmente la ganadería (cría vacuna), y, en menor medida, la agricultura (Conti, 2007). Este partido se encuentra dentro de la Depresión del Salado, que ocupa el sector centro-este de la provincia de Buenos Aires. El establecimiento donde se llevó a cabo el ensayo puede ubicarse en la región sojera III “Pampeana Sur”, dentro de la subregión III-2 “Sudeste de Bs. As.” (INTA, 1997).

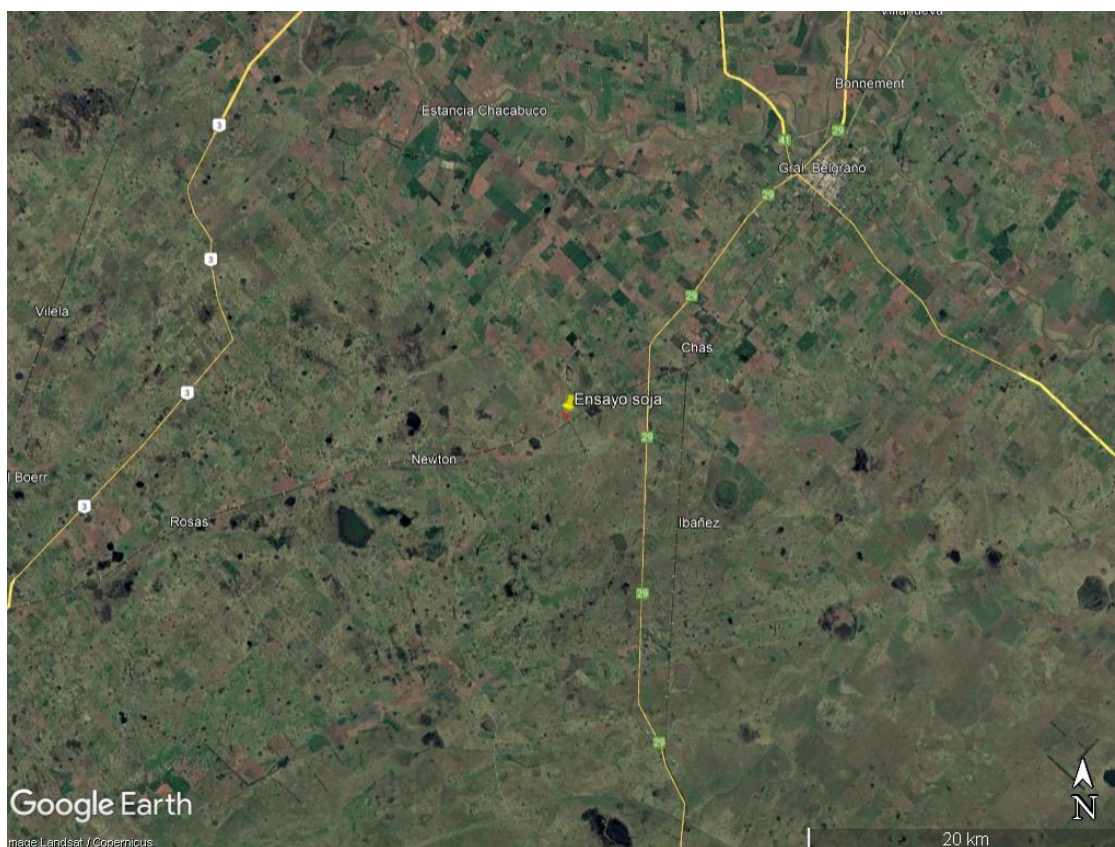


Figura 5. Plano de la ubicación del ensayo.

Fuente: Google Earth 2023.

4.2. Características edafoclimáticas

4.2.1. Clima

La región tiene un régimen térmico templado y húmedo, con una temperatura media anual de 15,4°C. Los meses más cálidos son diciembre, enero y febrero, con temperaturas medias de 22°C y máximas promedio de 30°C, y junio, julio y agosto los más fríos, con temperaturas medias de 8°C y mínimas promedio de 4°C. El régimen hídrico es isohigro, ya que las precipitaciones se distribuyen de forma más o menos uniforme a lo largo del año, con una leve concentración de lluvias en primavera y otoño. Las precipitaciones medias anuales son de 1.028 mm. La media normal para el mes de julio es de 51,64 mm, mientras que en diciembre son de 111,55 mm.

El viento es cálido y seco en verano, con dirección predominante de Oeste a Noroeste. En invierno, los vientos predominantes son fríos y secos si provienen del Sur, y húmedos si provienen del Sureste.

Para la caracterización meteorológica de la campaña 2021-2022, se utilizaron datos provenientes de la estación meteorológica del INTA Castelar. Para el período de tiempo entre el 16/11/2021 y el 28/04/2022, la temperatura media promedio fue de 21,7°C, con una máxima media de 28,0°C y una mínima media de 15,5°C. La temperatura máxima, de 42,3°C, se registró el día 14/01/2022, mientras que la mínima de 2,7°C se registró el día 31/03/2022 (Figura 6).

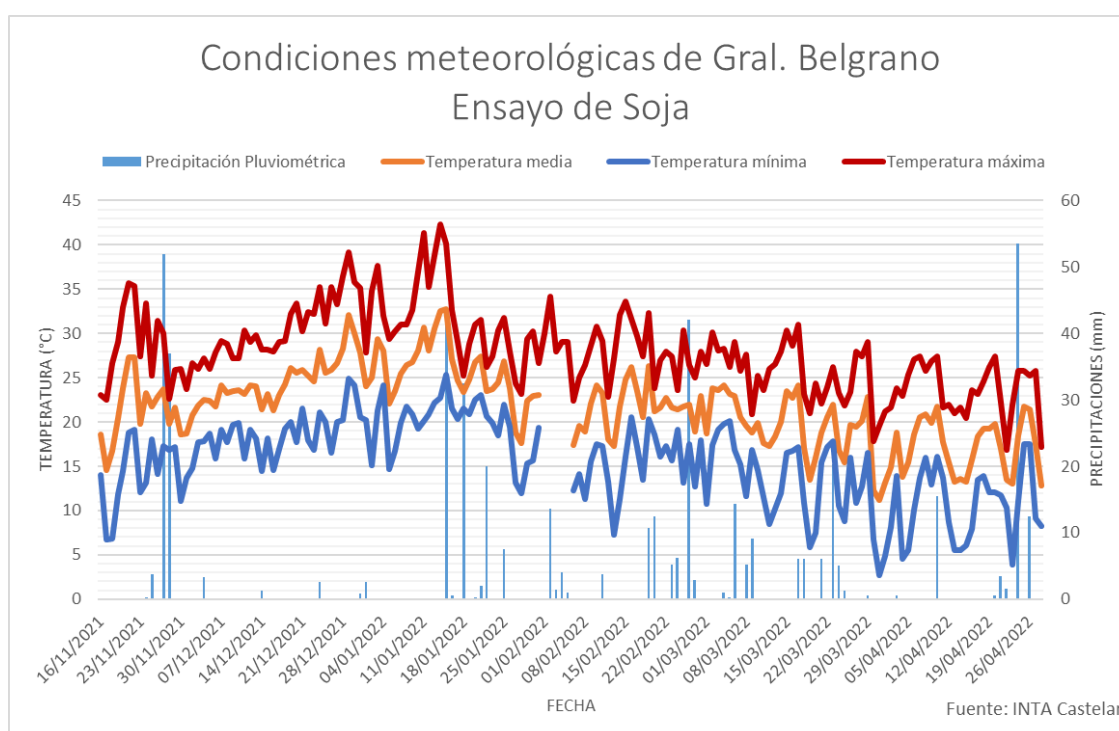


Figura 6. Distribución de las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) durante la campaña 2021/2022 para General Belgrano.

Fuente: INTA Castelar (<https://siga.inta.gob.ar/#/data>). Gráfico de elaboración propia.

Las precipitaciones acumuladas desde la siembra a la cosecha del cultivo fueron de 476 mm, y desde la siembra a la plena madurez del cultivo se registraron 405 mm. Durante el período

crítico del cultivo, ubicado entre el 2 de febrero y el 10 de marzo, se acumularon precipitaciones de 133 mm (Figura 7).

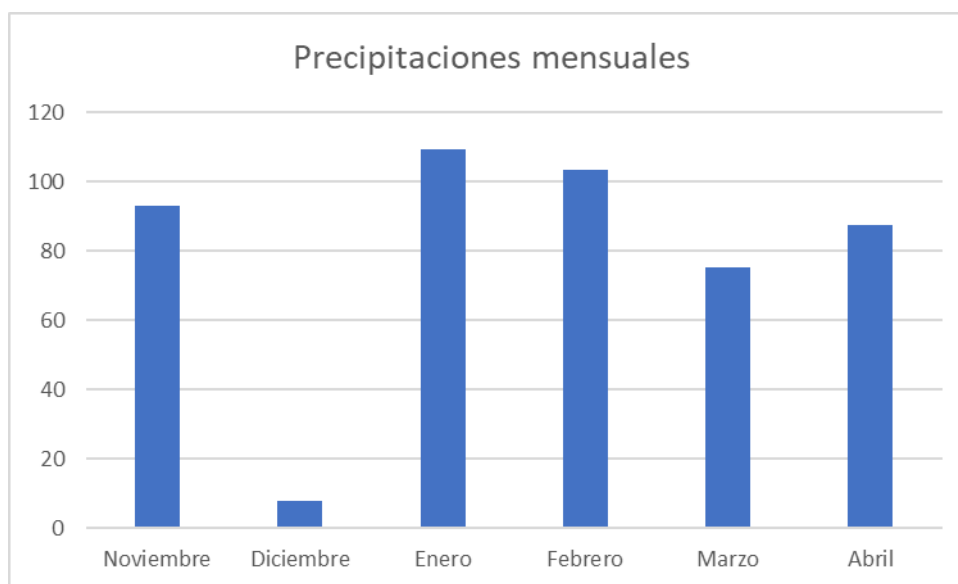


Figura 7. Precipitaciones mensuales (mm) durante los meses de noviembre de 2021 a abril de 2022.

Fuente: INTA Castelar. Gráfico de elaboración propia.

Cabe destacar que la campaña 2021-2022 se desarrolló bajo el fenómeno climático “La Niña”, presentando limitaciones hídricas importantes (Guerra, 2021), siendo la segunda Niña consecutiva. La distribución de las precipitaciones para esta campaña fue muy irregular, con valores muy por debajo de lo normal en noviembre y especialmente diciembre, alcanzando ese mes apenas 8 mm. En enero y febrero, sin embargo, las precipitaciones se recuperaron parcialmente, permitiendo llegar en mejores condiciones al período crítico del cultivo, y alcanzando buenos resultados a la cosecha. Así y todo, los niveles de precipitaciones registrados estuvieron un 20 % por debajo de los promedios históricos. En Buenos Aires, este fenómeno está relacionado con niveles bajos de rendimientos, principalmente en cultivos de verano como maíz y soja. En campañas clasificadas como segunda La Niña consecutiva, se destaca una particular frecuencia relativa de rendimientos extremadamente bajos o muy bajos del 41 % (Cabrini *et al.*, 2022).

La probabilidad de ocurrencia de primeras heladas meteorológicas (0°C) es de un 80 % a partir del 28 de abril en adelante, siendo el 12 mayo la fecha media de primera helada, y el 14 de abril el extremo más temprano. En cuanto a la fecha de última helada, un 80 % de las veces ocurre antes del 13 de octubre, la fecha media es el 22 de septiembre, y la extrema el 15 de noviembre (INTA Las Flores, 2012).

4.2.2. Suelo

El establecimiento se ubica en la carta de suelos N° 3560-36-4 CHAS (Figura 8).

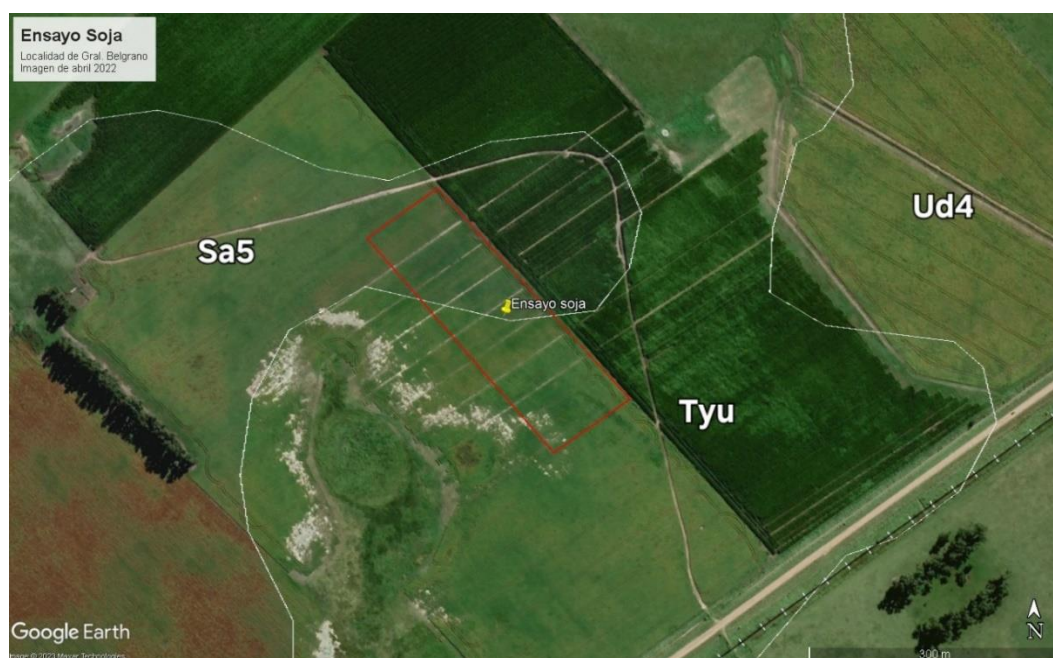


Figura 8. Plano del ensayo (rectángulo de color rojo) solapado con la carta de suelos.

Fuente: Carta de suelos 3560-34-4 CHAS, INTA. Escala 1:50.000. Google Earth 2023.

En la Tabla II y Tabla III, se describen las unidades cartográficas halladas en el ensayo a partir de las Cartas de Suelos de la Provincia de Buenos Aires del Instituto de Suelos del INTA (2023). El 54 % de la superficie (1,91 ha) corresponde al Complejo Tuyutí (Tyu), ubicado en áreas planas amplias (Tabla 2); y el 46 % de la superficie (1,62 ha), corresponde a la asociación Saladillo 5 (Sa5), ubicada en ambientes de tendidos altos con sectores deprimidos (Tabla 3).

Serie	Porcentaje	Posición	Taxonomía	Capacidad de uso
Tuyutí	60%	Tendidos altos	Natracualf típico	VII ws
Tronconi	30%	Tendidos bajos	Duracuol nátrico	VI ws
Videla Dorna	10%	Cubetas	Epiaquerts típico	V w

Tabla II. Composición del complejo de suelos Tuyutí.

La serie principal de esta unidad cartográfica es Tuyutí. El suelo es grisáceo, poco profundo, de aptitud ganadera, ubicado en un paisaje de planicies bajas, en posición de bajo, es pobremente drenado, con escurrimiento muy lento, permeabilidad lenta, formado sobre sedimentos loésicos, fuertemente alcalino y salino desde la superficie, con pendientes de 0 a 0,5 %. Su capacidad de uso entra dentro de la clase VII, generalmente no apta para cultivos, apropiada para pasturas naturales, y dentro de la subclase “ws”, que se refiere a limitantes en cuanto a exceso de humedad y problemas a nivel radicular, en este caso salinidad y alcalinidad. Las limitaciones de uso relacionadas a estos suelos son el drenaje y anegamientos periódicos, horizonte fuertemente textural, alcalinidad sódica desde los 18 cm de profundidad, y salinidad superficial (CE 20 dS/m).

Serie	Porcentaje	Posición	Taxonomía	Capacidad de uso
Saladillo	50 %	Tendidos altos	Hapludol thapto árgico	II w
Saladillo fase algo pobremente drenada	30 %	Tendidos bajos	Hapludol thapto árgico	II w
Monte	20 %	Tendidos bajos	Natrudol típico	IV ws

Tabla III. Composición de la asociación de suelos Saladillo 5.

La serie principal de esta unidad es Saladillo. Un suelo muy oscuro, de aptitud agrícola, ubicado en paisajes ondulados a suavemente ondulados, ocupando la media loma baja. Moderadamente bien drenado, escurrimiento medio, poligenético, desarrollado sobre materiales originarios de dos ciclos de sedimentación eólica, no alcalino, no salino, pendientes de 0,5-1 %. Su capacidad de uso se clasifica como II, es decir, con ligeras limitaciones para el

uso agrícola, y con la subclase “w”, lo que significa que el tipo de limitante está relacionada al exceso de humedad. La limitación de uso que pueden tener estos suelos es el drenaje. En las zonas de tendidos bajos, encontramos fases algo pobremente drenadas, que afectarían la productividad de los cultivos agrícolas.

Análisis de suelo:

Se realizó un análisis de suelo sobre el sitio del ensayo, mediante la tecnología SoilOptix®, de la empresa Glimax. Utilizando la radiación gamma del suelo para modelizar los nutrientes presentes, se realizó un mapeo de los mismos en alta definición, gracias a la toma de más de 1000 datos de cada nutriente por ha. Los valores promedio obtenidos para el suelo utilizado en el ensayo se observan en la Tabla IV.

Variable	Unidad	Valor
Profundidad	cm	20
pH	pH	6,04
Conductividad	dS/m	0,11
MO	%	4,95
P	ppm	11,71
N Total	%	0,25
N-NO3	ppm	8,24
S	ppm	21,38
K	meq 100 gr ⁻¹	0,89
Ca	meq 100 gr ⁻¹	5,97
Mg	meq 100 gr ⁻¹	1,32
Na	meq 100 gr ⁻¹	0,36
CIC	meq 100 gr ⁻¹	12,28

Tabla IV. Características químicas del suelo del ensayo en los primeros 20cm de profundidad.

Estos datos coinciden con la descripción del perfil típico de la serie Saladillo, sin presentar problemas evidentes de salinidad ni sodicidad en esta profundidad.

4.3. Material genético utilizado

La variedad de soja utilizada fue la 40R16 STS de la empresa Don Mario. La misma corresponde a un grupo de madurez IV corto, tiene un hábito de crecimiento indeterminado, una duración

de ciclo de 142 días desde emergencia a R8 (tomando como referencia la Zona Norte de Buenos Aires), tiene un alto potencial de ramificación, no tiene susceptibilidad al vuelco, y se adapta perfectamente a la región de la Cuenca del Salado (Don Mario, 2021). A esta latitud, este grupo de madurez se comporta como un ciclo medio. La inducción a floración en este grupo se produce con más horas de luz (son menos sensibles a este factor) que grupos de madurez más altos, y la duración de la fase vegetativa responde principalmente a la acumulación térmica. Este material cuenta con resistencia al cancro del tallo (*Diaporthe phaseolorum*), resistencia a varias razas del patógeno responsable de la podredumbre de raíz y base del tallo (*Phytophthora sojae*) y es moderadamente susceptible a la mancha ojo de rana (*Cercospora sojina*). Es tolerante al glifosato.

En la Figura 9, se muestra un modelo de la evolución de la fenología del cultivo de soja, correspondiente al cultivar, fecha de siembra y ubicación del ensayo. Se pueden apreciar los distintos estadios fenológicos y las fechas estimadas en las que se llega a los mismos. El recuadro rojo corresponde a la duración del período crítico en un sentido amplio, comenzando en R3 y hasta R6, correspondiente al lapso entre el 2 de febrero y el 10 de marzo. El software utilizado es el Modelo Cronosojá© AR (FAUBA, 2019).

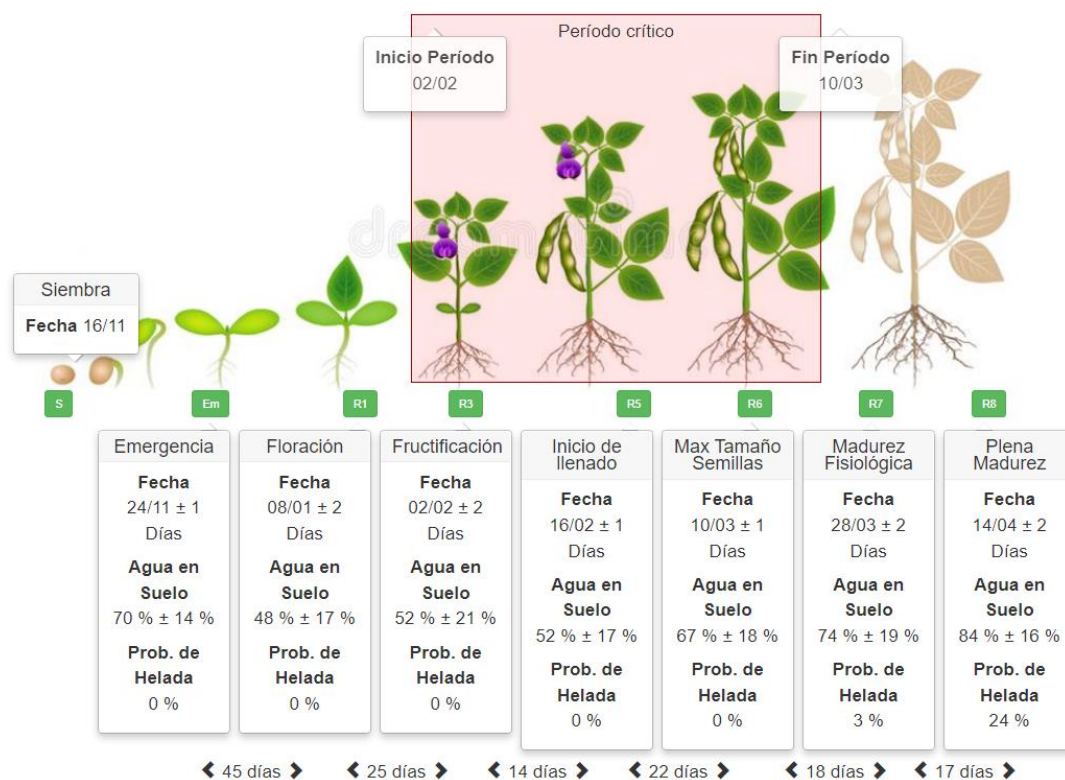


Figura 9. Fenología del cultivo de soja, modelo correspondiente al cultivar DM40R16, sembrado el día 16/11, en el departamento de General Belgrano.

Fuente: FAUBA | Modelo CRONOS.

4.4. Diseño experimental y tratamientos

La siembra se llevó a cabo el 16 de noviembre de 2021, con una densidad de siembra de 80 kg ha⁻¹, con una distancia entre surcos de 35 cm. La densidad final de plantas en promedio fue de 298.571 pl ha⁻¹. El ensayo fue sembrado a máquina en franjas de cultivo de un ancho de 36 m y largo variable, cortando la pendiente. Para realizar los submuestreos, se tomaron 4 m lineales dentro de cada franja. El Diseño fue en Bloques Completamente Aleatorizados (DBCA), con cinco tratamientos (Tabla V), con distintas alternativas de fertilizantes convencionales y nanofertilizantes, y 2 repeticiones.

Identificación	Tratamientos
T1	Testigo
T2	MAP (120 kg ha ⁻¹)
T3	Mist P [®] (3 l ha ⁻¹) + Mist BLC [®] (2 l ha ⁻¹)
T4	MAP (60 kg ha ⁻¹) + Mist P [®] (3 l ha ⁻¹) + Mist BLC [®] (2 l ha ⁻¹)
T5	Mist VL [®] (0,37 l ha ⁻¹) + MAP (60 kg ha ⁻¹) + Mist P [®] (3 l ha ⁻¹) + Mist BLC [®] (2 l ha ⁻¹)

Tabla V. Descripción de los tratamientos del ensayo.

Referencias: MAP (Fosfato Monoamónico); Mist P[®] (nanofertilizante en base a P); Mist BLC[®] (nanofertilizante en base a un conjunto de macro y micro nutrientes); Mist VL[®] (nanofertilizante vivificante de semillas).

Productos utilizados:

- MAP (Fosfato Monoamónico): N (11 %) y P (52 %). Es un fertilizante granulado, con un contenido de P mayor que los fertilizantes sólidos comunes. Es soluble en agua, se disuelve rápidamente en el suelo con la humedad adecuada. Al diluirse, se separan sus dos componentes principales, liberando amonio (NH_4^+) y ortofosfato (H_2PO_4^-), siendo ambos nutrientes importantes para el crecimiento vegetal (IPNI, s/f).
- Mist P[®]: P (9,8 %), Ca (19,0 %), S (8,9 %), Si (4,2 %). Es una dispersión de nanopartículas minerales. Incorpora P de alta eficiencia, mejorando el desarrollo radical de la planta, y la presencia de Ca aumenta la absorción de nutrientes. Se recomienda la aplicación en pre siembra o siembra, mediante pulverización.
- Mist VL[®]: Si (284 mg kg⁻¹), Mo (112 mg kg⁻¹), Mn (120 mg kg⁻¹), Co (150 mg kg⁻¹) y Bo (60 mg kg⁻¹). Es un nanofertilizante. Los minerales presentes colaboran con un buen porcentaje de germinación de la semilla, la rizósfera rica en nutrientes, mejoran la nodulación y el desarrollo de la plántula. Se aplica a la semilla, preferentemente junto con el inoculante.
- Mist BLC[®]: Ca (7,0 %), S (5,5 %), N (3,9 %), Mg (1,5 %), P (0,7 %), K (2,2 %), Si (0,4 %) y Bo (0,1 %). Es una dispersión de nanopartículas minerales, que posee una adecuada concentración de elementos principales, secundarios y micronutrientes esenciales para el crecimiento, desarrollo y formación de nódulos en la planta. Se recomienda la aplicación entre V4 y V10, y entre R1 y R4, con aplicación foliar por pulverización.

El momento de aplicación de cada producto fue definido en base a lograr el mayor aprovechamiento por parte del cultivo, y respetando los protocolos de aplicación del fabricante. El MAP se incorporó a la siembra, Mist VL® con el inoculante, el Mist P® en pre emergencia del cultivo y el Mist BLC® en V6 y otra en R2, con pulverizadora.

Para las determinaciones de rendimiento (kg ha^{-1}), el día 28 de abril de 2022 se realizaron cosechas manuales de 4 m lineales de cada parcela. Luego, las muestras fueron trilladas mediante una trilladora experimental y de forma manual. Se determinó el valor de humedad (H°) mediante humedímetro y se corrigió el rendimiento a un valor de 14 % H° aplicando un coeficiente de merma en aquellos tratamientos que superaran este valor.

4.4.1. Control de malezas:

Previo a la realización del barbecho químico, Yuyo colorado (*Amaranthus quitensis*); Gramón (*Cynodon dactylon*); Pasto cuaresma (*Digitaria sanguinalis*) y Rama negra (*Conyza bonariensis*) fueron las principales malezas que se encontraron en el predio del ensayo. Los herbicidas aplicados, su dosis y momento de aplicación se detallan en la Tabla VI.

Producto	Dosis	Momento de aplicación
Glifosato 79,2 % WG	$2 \text{ l ha}^{-1} + 5,5 \text{ l ha}^{-1}$	Barbecho, post emergencia
Metsulfuron metil 12,5 % + clorsulfuron 62,5 % WG	0,015 cc/ha	Barbecho
2,4-D 30 % ME	$2,5 \text{ l ha}^{-1}$	Barbecho
Dicamba 57,8 % SL	$0,15 \text{ l ha}^{-1}$	Barbecho
Cletodim 24 % EC	$0,58 \text{ l ha}^{-1}$	Post emergencia
Imazetapir 10,6 % SL	1 l ha^{-1}	Post emergencia

Tabla VI. Productos herbicidas aplicados en el ensayo, dosis y momento de aplicación.

Para el barbecho químico se utilizó 2 l ha^{-1} de Glifosato, $0,015 \text{ cc ha}^{-1}$ de Metsulfurón + Clorsulfurón, $2,5 \text{ l ha}^{-1}$ de 2,4-D, y $0,15 \text{ l ha}^{-1}$ de Dicamba. Se aplicó 1 l ha^{-1} de Imazetapir en post emergencia del cultivo para control de yuyo colorado (*Amaranthus quitensis*). Post

emergencia se aplicó 5,5 l ha⁻¹ de Glifosato, y 0,58 l ha⁻¹ de Cletodim para control de gramíneas.

4.4.2. Control de enfermedades:

Se aplicó Amistar Xtra Gold® en una dosis de 0,25 l ha⁻¹. Es un fungicida sistémico y de contacto para control de enfermedades foliares (complejo de enfermedades de fin de ciclo en soja, mancha foliar por *Phyllosticta* y roya de la soja), compuesto por una Azoxistrobina 20 g (estrobilurinas) + Cyproconazole 8 g (triazoles), en formulación de dispersión oleosa (OD). Aplicación en R2, junto con Mist BLC®. Su compatibilidad en mezcla en tanque con los productos Mist® está comprobada por el fabricante del fertilizante.

4.5. Determinaciones en el cultivo

En el cultivo se determinó el número de granos por planta (N° granos pl⁻¹), número de granos por m² (N° granos m⁻²), el peso de 1000 semillas (P1000) y el rendimiento en grano (R).

N° granos pl⁻¹: Se tomaron 5 plantas dentro de cada repetición, de las cuales se realizó el recuento de granos, para así obtener un promedio de cada tratamiento.

N° granos m⁻²: A partir del cálculo del producto entre el número de granos por planta promedio de cada repetición y la densidad de plantas en m², obtenida mediante un recuento de plantas en 4 m lineales dividido por 0,35 (espacio entre líneas en metros), se obtuvo el número de granos por m² de cada tratamiento.

P1000: Con las semillas obtenidas de la trilla, se realizaron 4 pesadas de 100 semillas por repetición, calculando el promedio de los pesos y multiplicando por 10 en cada tratamiento.

R: Se cosecharon y trillaron 4 m lineales de plantas. Se pesaron y se determinó el rendimiento mediante la siguiente ecuación:

$$R \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Rendimiento trilla (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{merma}$$

También se determinó la diferencia de rendimiento, referida a la diferencia entre el rendimiento del testigo frente al rendimiento de cada tratamiento estudiado, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta R \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = R \text{ testigo (kg ha}^{-1}\text{)} - R \text{ tratamiento (kg ha}^{-1}\text{)}$$

4.6. Análisis económico

En cada tratamiento se determinó el Margen Bruto (MB) y el rendimiento de indiferencia (RI)

MB: Con el fin de enriquecer la comparativa entre diferentes alternativas de fertilización en este trabajo, se llevó a cabo un análisis económico de cada tratamiento, utilizando la metodología de Margen Bruto. La ventaja de este análisis es la facilidad para individualizar y comparar las distintas alternativas que, al ser realizadas en el mismo momento y lugar, solo deben sus diferencias a los costos de los insumos y rendimientos obtenidos bajo cada tratamiento. La ecuación simplificada sin tener en cuenta las amortizaciones directas, es la siguiente:

$$\text{Margen bruto (US\$ ha}^{-1}\text{)} = \text{Ingresos (US\$ ha}^{-1}\text{)} - \text{Costos directos (US\$ ha}^{-1}\text{)}$$

Se confeccionó un MB para el análisis económico ex post, tomando los datos de costos fijos directos de insumos y labores proporcionados por la empresa. Los ingresos brutos surgen a partir del precio del grano de soja y del rendimiento obtenido. Los costos variables de comercialización se estimaron como un porcentaje del precio a partir de datos de la revista Márgenes Agropecuarios (Arbolave, 2022), y los costos de cosecha se tomaron como un valor fijo por unidad de superficie, según los costos informados por el productor.

RI: Este indicador señala el R que cubre los costos de implantación y protección. Es decir que, obteniendo el rendimiento de indiferencia, se cubrirían todos los costos, sin obtener ganancias ni pérdidas. Es un buen indicador del riesgo económico relativo que conlleva cada alternativa. Mientras menor sea el RI, los costos de esa alternativa son cubiertos con menores rendimientos, a partir de los cuales genera ganancias. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$RI (tn\ ha^{-1}) = Costos\ Directos\ (US\$\ ha^{-1}) / Precio\ Neto\ (US\$\ tn^{-1})$$

donde *Costos Directos* es la sumatoria de costos de implantación y protección, expresado en US\$ ha⁻¹, y *Precio Neto* es el precio del cereal, expresado en US\$ tn⁻¹, descontados los gastos de comercialización y cosecha.

4.7. Análisis estadístico

Los datos generados en este ensayo fueron analizados utilizando el software estadístico InfoStat 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020). Utilizando las variables N° granos planta⁻¹, N° granos m⁻², P1000, R, MB y RI y se llevó a cabo un análisis de la varianza para determinar diferencias significativas entre tratamientos al 1 % y al 5 %. Posteriormente, con el objetivo de detectar grupos homogéneos, se realizó un test de comparación de medias de Diferencias Mínimas Significativas (DMS o LSD en inglés) sobre las variables donde se encontraron diferencias significativas. También se analizó la correlación entre variables mediante los coeficientes de correlación de Pearson, con un nivel de significancia del 5 %.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Número de granos por planta

Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos al 1% ($p < 0,01$) para esta variable. Siendo que N° granos pl^{-1} es proporcional a la disponibilidad de recursos por individuo, los altos niveles de densidad con una menor disponibilidad de nutrientes producen una disminución en las semillas por planta y un marcado aumento de aborto de flores y vainas (Valentinuz *et al.*, 1996; Andrade y Sadras, 2000). La soja es una especie con una alta plasticidad reproductiva, ya que ajusta el número de unidades reproductivas frente a la disponibilidad de fotoasimilados (Jiang y Egli, 1993; Board y Tan, 1995; Andrade *et al.*, 2005). Por lo tanto, en situaciones de niveles altos de recursos, la planta puede fijar más vainas y granos. T5 y T4 tuvieron un mayor N° granos pl^{-1} , seguidos por el T2 y T3. Todos los tratamientos superaron al testigo (Figura 10).

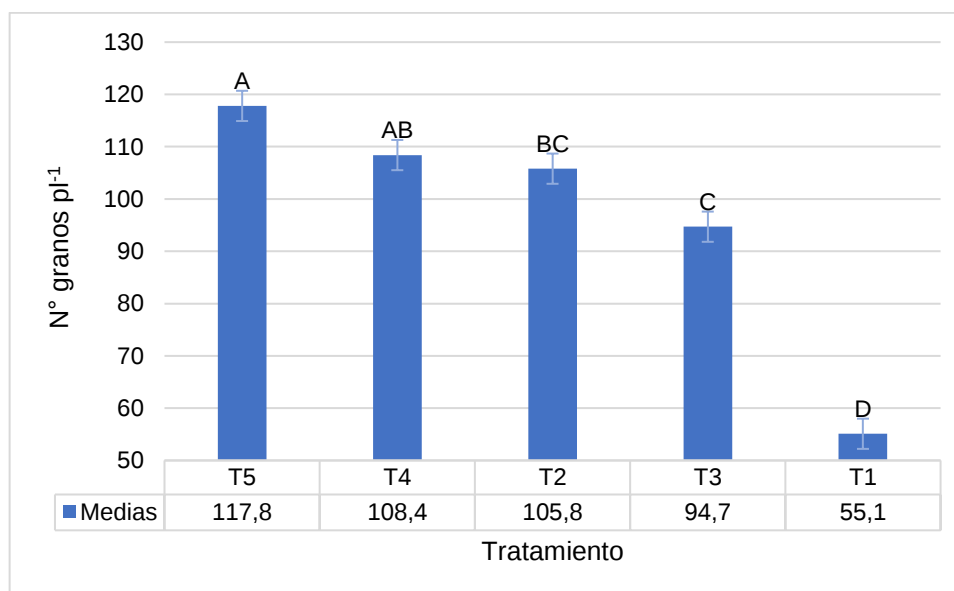


Figura 10. Número granos por planta de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.

T1 (testigo sin fertilizar); T2 (120 kg ha^{-1} MAP); T3 (3 l ha^{-1} Mist P[®] + 2 l ha^{-1} Mist BLC[®]); T4 (60 kg ha^{-1} MAP + 3 l ha^{-1} Mist P[®] + 2 l ha^{-1} Mist BLC[®]); T5 (Mist VL[®] $0,37 \text{ l ha}^{-1}$ + 60 kg ha^{-1} MAP + 3 l ha^{-1} Mist P[®] + 2 l ha^{-1} Mist BLC[®]).

Las letras sobre las barras indican grupos homogéneos según el test de LSD ($p < 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes. Las barras verticales indican la media del tratamiento $\pm$ el error estándar.

5.2. Número de granos por m²

Para esta variable, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$ o $0,01$). Sin embargo, se observó una tendencia a que los tratamientos superen al testigo. El coeficiente de correlación de Pearson entre esta variable y el rendimiento no tiene una significancia estadística ($p > 0,05$). Se observa una tendencia a una correlación positiva media, con un coeficiente de 0,48 (Tabla A.II y A.III del Anexo). Estos resultados no se condicen con la bibliografía, ya que numerosos autores (De La Fuente *et al.*, 1993; Carpenter y Board, 1997; Gutiérrez Boem *et al.*, 1998) indican que el número de granos por unidad de área (o de unidades reproductivas por unidad de superficie, si se determinaran las vainas en lugar de granos) es el componente que explica gran parte de las variaciones de rendimiento. Se cree que esta diferencia puede deberse un número bajo de muestras, lo que puede conducir a un alto error estándar y un menor intervalo de confianza (menor al 95 %). El número de granos por unidad de área se determinó a partir del número de granos por planta y la densidad, por lo que es una medida indirecta, en la que hay propagación de errores. De todas formas, la tendencia es que todos los tratamientos superan al testigo, y que el T5 coincide en ser el que presenta mayor número de granos por unidad de área y mayor rendimiento (Figura 11).

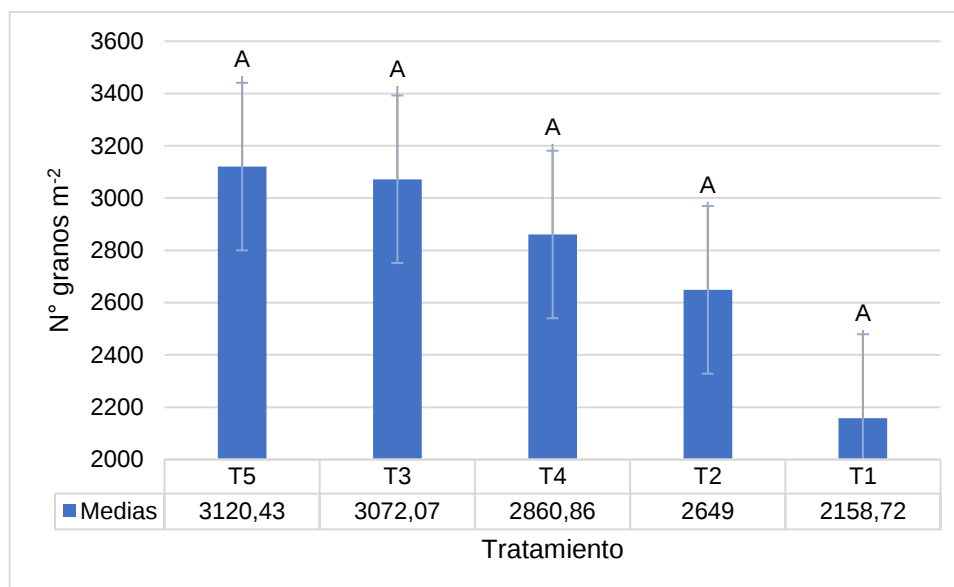


Figura 11. N° granos por metro cuadrado (granos m⁻²) de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.

T1 (testigo sin fertilizar); T2 (120 kg ha⁻¹ MAP); T3 (3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T5 (Mist VL[®] 0,37 l ha⁻¹ + 60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]). Las letras sobre las barras indican grupos homogéneos según el test de LSD ($p < 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes. Las barras verticales indican la media del tratamiento $\pm$ el error estándar.

5.3. Peso de 1000 granos

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para esta variable ($p > 0,05$ o $0,01$). La tendencia observada es que todos los tratamientos superan al testigo (Figura 12). Se observa que, excepto en el testigo, existe una relación inversa entre la variable de granos por unidad de superficie y P1000. Esto coincide con lo observado por Andrade *et al.* (2000), afirmando que una eventual disminución en el número de vainas puede ser parcialmente compensada por un aumento en el peso individual del grano.

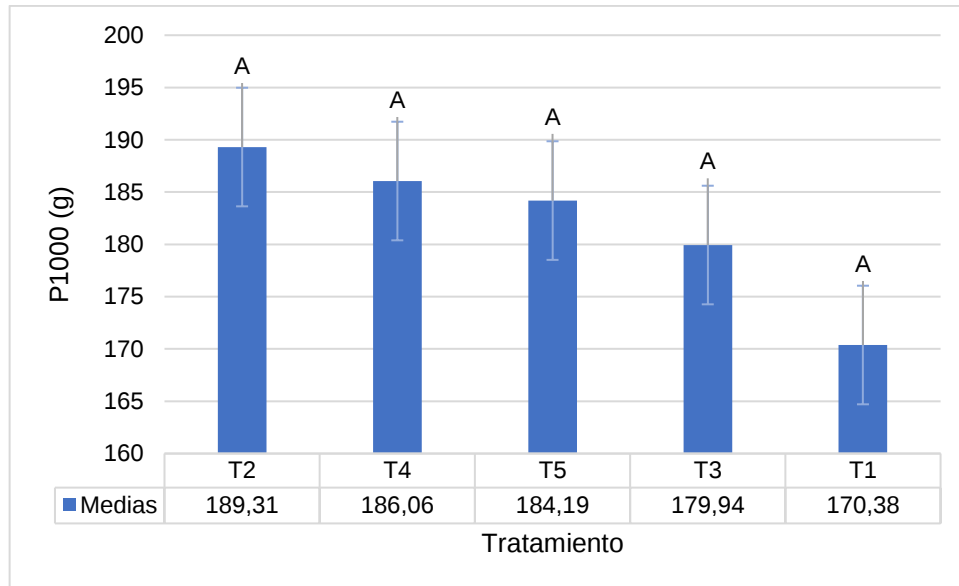


Figura 12. Peso de 1000 granos (g) de cada tratamiento de fertilización en el cultivo de soja.

T1 (testigo sin fertilizar); T2 (120 kg ha⁻¹ MAP); T3 (3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®); T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®); T5 (Mist VL® 0,37 l ha⁻¹ + 60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P® + 2 l ha⁻¹ Mist BLC®). Las letras sobre las barras indican grupos homogéneos según el test de LSD ($p < 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes. Las barras verticales indican la media del tratamiento $\pm$ el error estándar.

5.4. Rendimiento

Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos al 1 % ($p < 0,01$) en la variable rendimiento. El coeficiente de variación (CV) para esta variable fue de 3,39 %, siendo un valor de baja magnitud, lo cual indica una baja dispersión de datos y un muestreo bien realizado. El testigo se ve superado por todos los tratamientos, con una diferencia de casi 1000 kg ha⁻¹ con el rendimiento del tratamiento más próximo, y de 1400 kg con el máximo rendimiento (Figura 13).

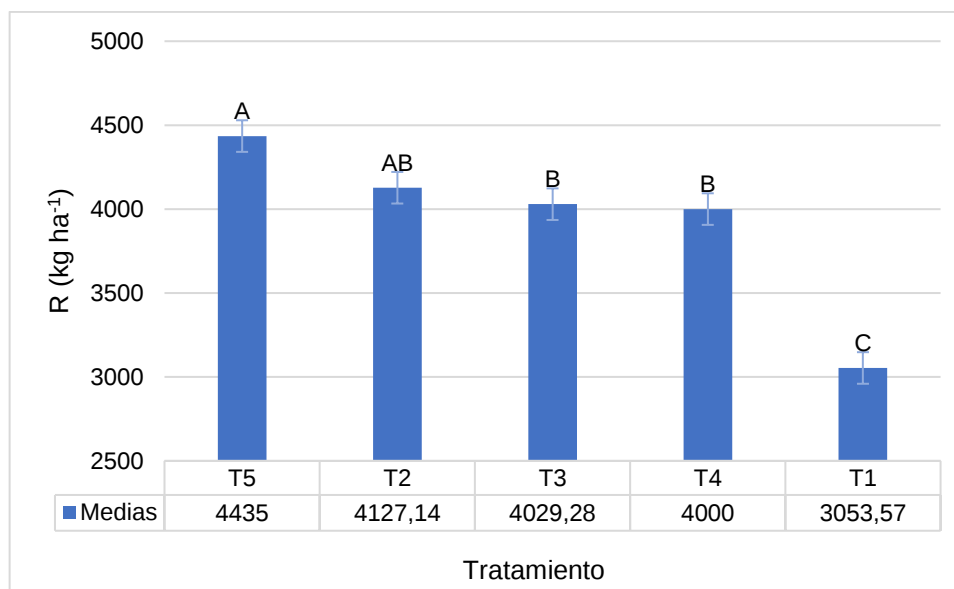


Figura 13. Rendimiento de cada tratamiento en el cultivo de soja.

T1 (testigo sin fertilizar); T2 (120 kg ha⁻¹ MAP); T3 (3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]); T5 (Mist VL[®] 0,37 l ha⁻¹ + 60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P[®] + 2 l ha⁻¹ Mist BLC[®]). Las letras sobre las barras indican grupos homogéneos según el test de LSD ($p < 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes. Las barras verticales indican la media del tratamiento $\pm$ el error estándar.

El T5 (Mist VL[®] + MAP + Mist P[®] + Mist BLC[®]) fue el que mayor rendimiento obtuvo, con una media de 4435 kg ha⁻¹, y 1382 kg ha⁻¹ de diferencia (ΔR) con el testigo sin fertilizar. El T2 (MAP), correspondiente a una fertilización convencional, obtuvo una media de rendimiento de 4127 kg ha⁻¹, siendo la diferencia con el testigo de 1074 kg/ha. De acuerdo al test de LSD, T5 y T2 no presentan medias con diferencias significativas (grupo homogéneo A). El T3 (Mist P[®] + Mist BLC[®]) y 4 (MAP + Mist P[®] + Mist BLC[®]) obtuvieron rendimientos medios de 4029 kg ha⁻¹ y 4000 kg ha⁻¹, respectivamente. Ambos tratamientos, junto al T2, se ubican en el grupo homogéneo B, por lo que no presentan diferencias significativas de acuerdo al test de LSD. Por último, el testigo sin fertilizar obtuvo un rendimiento medio de 3053 kg ha⁻¹, y presenta diferencias significativas con el resto de tratamientos. Estos resultados coinciden parcialmente con los observado por otros autores (Liu y Lal ,2014; Yacoub *et al.*, 2020) en

ensayos bajo condiciones controladas utilizando fertilizantes fosforados de nanopartículas en soja, donde el rendimiento bajo este tratamiento superó al testigo y a fertilizantes de P convencionales.

5.5. Análisis económico

Por último, los resultados del margen bruto para el análisis económico de los tratamientos se presentan de forma simplificada en la Tabla VII. En la Tabla A.I del Anexo se encuentra el análisis detallado. En ella, se han cargado los costos directos de cada alternativa, sus ingresos netos (ingreso bruto menos los costos de cosecha y comercialización), y el resultante margen bruto y rendimiento de indiferencia.

Soja		T1	T2	T3	T4	T5
COSTOS DIRECTOS	unidad	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha
TOTAL LABORES	US\$/ha	75	75	75	75	75
INSUMOS	US\$/ha	185	358	256	343	347
TOTAL COSTOS IMPL. Y PROT.	US\$/ha	259	433	330	417	422

RENDIMIENTOS	tn/ha	3,05	4,13	4,03	4,00	4,44
Precio	US\$/tn	389,00	389,00	389,00	389,00	389,00
INGRESO BRUTO	US\$/ha	1187,84	1605,46	1567,39	1556,00	1725,22
Gastos de Comercialización	US\$/ha	206,82	279,54	272,91	270,93	300,39
Gastos de Cosecha	US\$/ha	89,00	89,00	89,00	89,00	89,00
INGRESO NETO	US\$/ha	892,01	1236,92	1205,48	1196,07	1335,82
MARGEN BRUTO	US\$/ha	633	804	875	779	914
RENDIMIENTO DE INDIFERENCIA	tn/ha	0,89	1,44	1,10	1,40	1,40

Tabla VII. Análisis de Margen Bruto de los diferentes tratamientos en el cultivo de soja.

La diferencia en los costos entre tratamientos se debe exclusivamente a los costos totales de los fertilizantes en cada alternativa, ya que el resto de insumos y labores es el mismo en todos los casos. El MAP es la opción que menor costo unitario tiene, pero los volúmenes utilizados son muy superiores a los que se aplican con los fertilizantes de nanopartículas, por tanto el costo total es significativamente mayor. En los tratamientos con estrategias de fertilización

mixta (convencional + nanopartículas), se logra reducir algo los costos al utilizar la mitad de volumen del MAP, y la estrategia netamente de nano fertilizantes del T3 tuvo el menor costo entre los tratamientos que recibieron fertilización, siendo un 24 % menor que en el T2 y un 21% menor que en T4 y T5.

El T5 (Mist VL® + MAP + Mist P® + Mist BLC®) fue el que mejor resultado económico obtuvo, dando como resultado un MB de 914 US\$ ha⁻¹, un 44 % mayor que el del testigo, 14 % superior que el del T2, 4 % mayor que el del T3 y 17 % más alto que el del T4. Le sigue el T3 (Mist P® + Mist BLC®) con 875 US\$ ha⁻¹ de beneficio, el T2 (MAP) con 804 US\$ ha⁻¹, el T4 (MAP + Mist P® + Mist BLC®) con 779 US\$ ha⁻¹ y finalmente el T1 (testigo), con un resultado económico de 633 US\$ ha⁻¹.

Los resultados obtenidos revelan que los tratamientos que emplearon fertilizantes de nanopartículas demostraron una notable ventaja en términos económicos en comparación con los fertilizantes convencionales. Esto puede ser atribuido a varios factores. En primer lugar, como ya se mencionó, la utilización de fertilizantes de nanopartículas permitió una reducción significativa en los costos de implantación y protección. Esto se debe principalmente a la menor dosis requerida para lograr resultados comparables en términos de nutrición del cultivo que, conjugado con el precio del fertilizante, resultó en menores costos de insumos. Además, la aplicación en conjunto con otros productos fungicidas y herbicidas puede implicar una reducción en los costos asociados con maquinaria y mano de obra.

Esta reducción en los costos, en combinación con rendimientos competitivos, dan como resultado un mayor beneficio económico.

El otro indicador calculado fue el RI, donde se encontró que el testigo, al ser la alternativa con menor uso de insumos, es el que menor rendimiento requiere para cubrir todos los costos. El

T3 le sigue, con $1,10 \text{ tn ha}^{-1}$. En tercer y cuarto lugar, se encuentran los T4 y T5, ambos con un rendimiento similar (de $1,40 \text{ tn ha}^{-1}$) y el T2 fue el que requirió un mayor valor ($1,44 \text{ tn ha}^{-1}$) para alcanzar el punto de indiferencia.

Estos resultados sugieren que las alternativas de fertilización con nanopartículas conllevan un menor riesgo para el productor, ya que al ser menores sus gastos en insumos, requieren un menor rendimiento umbral para cubrir los costos y, a partir de ese punto, generan beneficios. Teniendo en cuenta ambos indicadores económicos, el T3 destaca como la opción de mejor relación entre riesgo y beneficio.

A futuro, se necesitarían investigaciones adicionales para comprender mejor los efectos a largo plazo y la sostenibilidad del uso de estas alternativas en diferentes condiciones agrícolas. Se recomendaría realizar estudios que evalúen no solo los aspectos productivos y económicos, sino también los posibles impactos en la salud humana y la biodiversidad.

6. CONCLUSIONES

La hipótesis I se rechazó parcialmente, ya que la utilización de una estrategia de fertilización con nanofertilizantes en el cultivo de soja en condiciones de campo no siempre produce un incremento en el rendimiento y sus componentes frente a una estrategia de fertilización convencional. El tratamiento T5, en base a una fertilización mixta entre productos convencionales (MAP) y nanofertilizantes, y el T2 (MAP) presentan los mayores rendimientos. Asimismo, el rendimiento en T3 (Mist P® + Mist BLC®) y el T2 tampoco presentó diferencias significativas. En cuanto al resto de los componentes del rendimiento, solo aquellos tratamientos con fertilización mixta (T4 y T5) presentan mayor valor de número de granos por planta que el resto. Estos resultados, aunque no establezcan la superioridad de una estrategia sobre la otra, permiten posicionar en forma competitiva a los fertilizantes de nanopartículas frente a los convencionales.

La hipótesis II fue aceptada, la utilización de una estrategia de fertilización basada en nano fertilizantes promueve un mayor beneficio económico y un menor rendimiento de indiferencia en un cultivo de soja. Los tratamientos en los que se utilizaron alternativas con nano fertilizantes obtienen mayores beneficios económicos y menores rendimientos de indiferencia en comparación al tratamiento convencional y el testigo. Si bien estadísticamente las estrategias con nanofertilizantes obtienen similares rendimientos que la fertilización convencional, la tendencia a aumentar levemente el rendimiento conjugado a los menores costos provoca que los resultados económicos (margen bruto y rendimiento de indiferencia) sean mejores. Se podrían considerar como alternativas viables y de menor impacto ambiental, así como mayor practicidad en la logística y métodos de aplicación, y menores riesgos económicos. Al mejorar la utilidad de la producción y permitir cubrir los costos de producción

con menores rendimientos para el agricultor, la utilización de fertilizantes de nanopartículas puede ser de interés para los productores.

Es destacable, la estabilidad y buena respuesta del cultivo fertilizado con las alternativas de nanopartículas en una campaña con precipitaciones muy por debajo del promedio histórico.

El uso de nanopartículas minerales como tecnología de fertilización en el cultivo de soja representa una alternativa prometedora y viable frente a la problemática de los fertilizantes convencionales. El alcance de este estudio es en materia de rendimiento productivo y económico, pero también de beneficios ambientales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alsina S., Nosetto M. D. y Jobbágy E. G. (2020). Database “napa”: first synthesis of the pampean water-table dynamic since 1950 to the present. *Ciencia de Suelo* 38: 262-273.
- Andrade, F. H. y Sadras, V. O. (2000). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce – FCA UNMP, 77-89.
- Andrade, F. H., Sadras, V. O., Vega, C. R. C. y Echarte, L. (2005). Physiological Determinants of Crop Growth and Yield in Maize, Sunflower and Soybean. *Journal of Crop Improvement*, 14(1-2), 51–101. doi:10.1300/j411v14n01_05
- Arbolave, M. R. (2022). Soja de 1ª: costos y márgenes. *Márgenes Agropecuarios*, Junio 2022, N° 444, p. 34.
- Baigorri, H. E. J. (1997). *Ecofisiología del cultivo*. En Giorda, L. M. y Baigorri, H. E. J., *El cultivo de soja en la Argentina*. INTA C. R. Córdoba. Agro 4 de Córdoba. ISSN 0329-0077. Cap. 2, p: 30-50. En: Álvarez, C. A. (2010). Rendimiento de cultivares de soja de grupo de madurez V y VI con riego complementario. Río Cuarto – Córdoba.

- Banco Mundial. (2024). *Datos Banco Mundial: Población total*. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- Batista, W. B., Taboada, M. A., Lavado, R. S., Perelman, S. B. y León, R. J. C. (2005). Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando J. C. León*. Editorial EFA. p. 113-129.
- Board, J. E. y Tan, Q. (1995). Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science* 35: 846-851.
- Cabrini, S., Fillat, F., Gattinoni, N., Ibern, D., Marino, M., Alvarez, R., Paolilli, C., Urcola, H. y Iurman, D. (2022). Variabilidad, tendencia y eventos extremos en los rendimientos agrícolas a nivel de partidos en la provincia de buenos aires. *Revista De Investigación En Modelos Financieros*, 1, 1-16. Recuperado a partir de <https://ojs.econ.uba.ar/index.php/RIMF/article/view/2342>
- Carciochi, W. D., Salvagiotti, F., Pagani, A., Reussi Calvo, N. I., Eyherabide, M., Sainz Rozas, H. R. y Ciampitti, I. A. (2020). Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *European Journal of Agronomy* 116: 126045.
- Carlson, J. B. y Lersten, N. R. (2004) Reproductive Morphology. In: *Soybeans: Improvement, Production, and Uses, Agronomy Monograph No. 16*, American Society of Agronomy, Madison, 59-95. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr16.3ed.c3>
- Carpenter, A. C. y Board, J. E. (1997). Branch Yield Components Controlling Soybean Yield Stability across Plant Populations. *Crop Science*, 37(3), 885-. doi:10.2135/cropsci1997.0011183X00370003003

- Ciampitti, I. A. y Vyn, T. J. (2011). A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research* 121: 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009>
- Cieza, R. I. (2006). *Rescatando el potencial agroecológico en la Cuenca del Salado*. Theomai, (13), 0.
- Conti, A. (2007). *Bases para un desarrollo turístico sustentable*. Municipio de General Belgrano. Comisión de investigaciones científicas de la Provincia de Buenos Aires. Laboratorio de Investigaciones del Territorio y el Ambiente.
- Correndo, A. (2018). *Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana*. MSc. Thesis, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- De La Fuente, E., Gil, A., González, E. y Lenardis, A. (1993). Componentes del rendimiento en cultivares de soja del grupo V con distinto hábito de crecimiento. *Revista Facultad de Agronomía*, 13 (2-3): 201-206, 1992. Cátedra de cultivos industriales – FAUBA.
- DeRosa, M., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R. y Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotech* 5, 91. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.2>
- Di Rienzo, J. A., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M. y Robledo, C. (2020). InfoStat. Software Estadístico. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A. y Grove, J. H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 65: 1-18.
- Don Mario. (2021). *Catálogo 2021*. Recuperado de: <https://www.donmario.com/argentina/soja/dm-40r21-sts/>

Echeverría, H. y García, F. (1998). *Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja*.

Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.

Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U. y Goldbach, H. E. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia plantarum*, 134(1), 151–160.

<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x>

FAUBA. (2019). Modelo CRONOS. Cronosojá© AR. Cátedra de Cerealicultura – Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. En: <http://cronosojá.agro.uba.ar/>

Fehr, W. R., Caviness, C. E., Burmood, D. T. y Pennington, J. S. (1971). Stage of Development Descriptions for Soybeans, Glycine Max (L.) Merrill1. *Crop Science*, 11:929-931.

<https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>

Fernández Grecco, R. (1999). *Principios de Manejo de Campo Natural. Materiales Didácticos* N° 9. 2ª Edic., CERBAS-INTA Balcarce, ISSN 0328-1280, 110 Pg. En: Pérez, R. A., Rossi, C. A., Otondo, J., Torrá, E., Bidart, A. (s/f). *Implantación de Gramíneas Subtropicales en Bajos Alcalino-Sódicos del Pastizal de la Cuenca del Salado. Primera Evaluación*. EEA INTA Cuenca del Salado, GOT Salado Norte, Chascomús, Pcia. De Bs. As.

Fernández Grecco, R. y Viviana Rossi, E. (1997). *Guía de reconocimiento de especies de campo natural. Materiales didácticos* N°13. 2º edición, CERBAS-INTA Balcarce, ISSN 0328-1280, 67 pg. En: Pérez, R. A., Rossi, C. A., Otondo, J., Torrá, E., Bidart, A. (s/f). *Implantación de Gramíneas Subtropicales en Bajos Alcalino-Sódicos del Pastizal de la Cuenca del Salado. Primera Evaluación*. EEA INTA Cuenca del Salado, GOT Salado Norte, Chascomús, Pcia. De Bs. As.

- Fernández, V. y Eichert, T. (2009). Uptake of Hydrophilic Solutes Through Plant Leaves: Current State of Knowledge and Perspectives of Foliar Fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(1-2), 36–68.
- Fertilizar Asociación Civil. (2022). *Estadísticas generales del mercado de fertilizantes en Argentina*. Recuperado de: <https://fertilizar.org.ar/estadisticas/>
- García Lamothe, A., Quincke, A. J. y Sawchik, J. (2017). Respuesta del cultivo de soja al azufre en argiudoles típicos del sudoeste de Uruguay. *Agrociencia* (Uruguay), 21(2), 44-53. Recuperado en 31 de enero de 2024, de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482017000200044&lng=es&tlng=es.
- García, F. O. (2000). *Soja: Nutrición del Cultivo y Fertilización en la Región Pampeana Argentina*. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p, 2.
- González N. (1996). Fijación de nitrógeno. En: *Curso de Actualización "Dinámica de nutrientes en suelos agrícolas"*. EEA INTA Balcarce.
- Guerra, V. I. (2021). Una campaña heterogénea y marcada por el riesgo del déficit hídrico. *IDIA21* 1 (1) diciembre 2021, 19-21. INTA, Argentina.
- Gutierrez Boem, F. H., Scheiner, J. D. y Lavado, R. S. (1998). *Fertilización en soja*. En: Gutierrez Boem, F.H., Lavado R.S., Scheiner, J.D. y S. Urricariet. *Fertilidad y Uso de Fertilizantes*. Vol. 6. Buenos Aires, Argentina. En: Cencig, G., Villar, J. (2008). *Estrés térmico durante el llenado de granos de soja: efecto sobre el rendimiento*. Recuperado de: www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/112/misc112_092.pdf.
- INDEC. (2023). Complejos exportadores año 2022. En: *Comercio exterior*, Vol. 7, n°4. Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. Ministerio de Economía Argentina.

- INTA. Las Flores. (2012). Heladas en la Argentina. CIAg – Centro de Información Agroclimática. FAUBA – UBA.
- INTA. (1997). *Guía práctica para el cultivo de soja*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos.
- INTA - Instituto de Suelos - CIRN. (2023). Cartas de Suelos República Argentina - Provincia de Buenos Aires (2.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7837681>
- IPNI. (s/f). *Fuentes de Nutrientes Específicos*. International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- Jiang, H. y Egli, D. B. (1993). Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy Journal* 85:221-225.
- Kato, I., Sakaguchim S. y Naito, Y. (1954). Development of flower parts and seed in soybean plant, *Glycine max*. M. Bull. Div. Plant Breed. Cultiv. Tokai-Kinki Natl. Agric. Exp. Stn. Bull. 1:96–114.
- Larrea, G., Wyngaard, N., Eyherabide, M., Reussi Calvo, N., Puricelli, M., Barbieri, P., Angelini, H., Salvagiotti, F. y Sainz Rosas, H. (2023). Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *CATENA* 223: 206916.
- León, R. (1975). *Las comunidades herbáceas de la Región de Castelli-Pila. Monografía 5*. CIC, La Plata, Pcia. De Bs. As. Pg. 75-107. En: Pérez, R. A., Rossi, C. A., Otondo, J., Torrá, E., Bidart, A. (s/f). *Implantación de Gramíneas Subtropicales en Bajos Alcalino-Sódicos del Pastizal de la Cuenca del Salado. Primera Evaluación*. EEA INTA Cuenca del Salado, GOT Salado Norte, Chascomús, Pcia. De Bs. As.
- León, R., Burkart, S. y Movia, C. (1979). Relevamiento Fitosociológico del Pastizal del Norte de la Depresión del Salado. La Vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica Nº 17. Sec. de Est. de Agricultura y Ganadería – INTA, 94 Pg.

- Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses*. Nueva York: Academic Press.
- Liu, R. y Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4(), –. doi:10.1038/srep05686
- Liu, R. y Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of The Total Environment*. Volume 514, 2015, Pages 131-139, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>.
- MAGyP (2019). *Agricultura - Estimaciones agrícolas*. Dirección de Estimaciones Agrícolas. Recuperado de: <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/estimaciones-agricolas>
- Maresca, S. (2018). Situación actual y perspectivas de la ganadería en Cuenca del Salado. 10.13140/RG.2.2.26369.40808.
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y. y Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Sci.* 179, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B. y Jackson, R. B. (2012). The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154: 2-11.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P. y Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15: 14-23.
- Preetha, P. S. y Balakrishnan, N. (2017). A review of nano fertilizers and their use and functions in soil. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 2017, 6, 3117–3133.
- Rao, A. S. y Reddy, K. S. (2010). Nutrient Management in Soybean. *The Soybean: Botany, Production and Uses*. Indian Institute of Soil Science, Nabi Bagh, Madhya Pradesh, India. Pp 161-190.

- Reboratti, C. (2010). Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de geografía Norte Grande*, (45), 63-76. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100005>
- Rodríguez Zurro, T., Terré, E. y Bergero, P. (2022). “La campaña 2022/23 podría dejar como saldo un récord de US\$ 42.300 millones por exportación de los principales granos y derivados”. INFORMATIVO SEMANAL. AÑO XL – N° EDICIÓN 2066
- Sistema Nacional de Información Hídrica (SSRH). (2002). *Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la república Argentina*.
- Smil, V. (1999). *Long-range Perspectives in Inorganic Fertilizers in Global Agriculture*. 1999 Travis P. Hignett Lecture, IFDC, Alabama, USA.
- Smil, V. (2002). Nitrogen and Food Production: Proteins for Human Diets. *AMBIO: A journal of the Human Environment* 31 (2), 126-131.
- Strada Rodríguez, J., Vila, I. *La producción de soja en Argentina: causas e impactos de su expansión*. Centro Cultural de la Cooperación Floreal Gorini; La Revista del CCC; 23; 12-2015; 1-11.
- Torres Duggan, M., Melgar, R. J., Rodríguez, M. B., Lavado, R. S. y Ciampitti, I. A. (2012). Sulfur fertilization technology in the Argentine Pampas region: A review. *Agronomía y Ambiente* 32: 61-73.
- Uzu, G., Sobanska, S., Sarret, G., Muñoz, M. y Dumat, C. (2010). Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts. *Environmental science & technology*, 44(3), 1036–1042. <https://doi.org/10.1021/es902190u>
- Valentinuz, O. R., Uhart, S. A., Andrade, F. H. y Vega, C. R. (1996). Número de granos en maíz, girasol y soja y radiación interceptada por planta. *Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología* (pp. 39-40). Bs. As. Argentina.

- Wyngaard, N., Crespo, C., Angelini, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Reussi Calvo, N., Carciochi, W. y Sainz Rosas, H. (2022). The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *CATENA* 212: 106126.
- Yacoub, N. M., Ismail, S. A., Raslan, M. y Khedr, M. H. (2020). The effect of using nanoparticles phosphorus and zinc on quality and quantity of soybean (*Glycine max* L). *Plant Archives*, 20(2), 8863-8876.
- Yadav, A., Yadav, K. y Abd-Elsalam, K. A. (2023). Nanofertilizers: Types, Delivery and Advantages in Agricultural Sustainability. *Agrochemicals* 2023, 2, 296–336.
<https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020019>

ANEXOS

Soja			T1		T2		T3		T4		T5	
LABORES	unidad	US\$/unid	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha
Valor UTA												
Siembra directa (c/fertilización)	US\$/ha	44,50	1	44,5	1	44,5	1	44,5	1	44,5	1	44,5
Pulverización terrestre	US\$/ha	5,00	6	30	6	30	6	30	6	30	6	30
Total Labores				75		75		75		75		75
COSTOS DIRECTOS	unidad	US\$/unid	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha	cantidad	US\$/ha
TOTAL LABORES	US\$/ha			74,50		74,50		74,50		74,50		74,50
Semilla Soja	kg/ha	0,78	73,00	56,94	73,00	56,94	73,00	56,94	73,00	56,94	73,00	56,94
HERBICIDAS												
Roundup controlmax	kg/ha	9,20	7,50	68,97	7,50	68,97	7,50	68,97	7,50	68,97	7,50	68,97
Metsulfuron metil + clorsulfuron	cc/ha	440,00	0,02	6,60	0,02	6,60	0,02	6,60	0,02	6,60	0,02	6,60
2 4 d Dedalo elite	l/ha	6,20	2,50	15,50	2,50	15,50	2,50	15,50	2,50	15,50	2,50	15,50
Dicamba	l/ha	10,43	0,15	1,56	0,15	1,56	0,15	1,56	0,15	1,56	0,15	1,56
Cletodim	l/ha	13,00	0,58	7,54	0,58	7,54	0,58	7,54	0,58	7,54	0,58	7,54
Imazetapir	l/ha	9,19	1,00	9,19	1,00	9,19	1,00	9,19	1,00	9,19	1,00	9,19
INSECTICIDAS - FUNGICIDAS												
Amistar extra gold (T+E)	l/ha	36,00	0,25	9,00	0,25	9,00	0,25	9,00	0,25	9,00	0,25	9,00
TERAPICOS												
Inoculante + fungicida	bolsa	3,70	2,50	9,25	2,50	9,25	2,50	9,25	2,50	9,25	2,50	9,25
LABORES E INSUMOS (SIN FERT.)				259,05		259,05		259,05		259,05		259,05
FERTILIZANTES												
Mist P®	l/ha	17,10	0	0	0	0	3,00	51,30	3,00	51,30	3,00	51,30
Fosfato monoamónico	kg/ha	1,45	0	0	120,00	173,76	0	0	60,00	86,88	60,00	86,88
Mist BLC®	l/ha	10,00	0	0	0	0	2,00	20,00	2,00	20,00	2,00	20,00
MIST VL®	l/ha	12,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,37	4,38
TOTAL FERTILIZANTES				0		173,76		71,30		158,18		162,56
TOTAL COSTOS IMPL. Y PROT.	US\$/ha			259		433		330		417		422
RENDIMIENTOS	tn/ha			3,05		4,13		4,03		4,00		4,44
Precio	US\$/tn			389,00		389,00		389,00		389,00		389,00
INGRESO BRUTO	US\$/ha			1.187,84		1.605,46		1.567,39		1.556,00		1.725,22
Comisión acopio	US\$/tn		2,00%	7,78	2,00%	7,78	2,00%	7,78	2,00%	7,78	2,00%	7,78
Paritaria	US\$/tn			4,00		4,00		4,00		4,00		4,00
Impuestos + Sellado	US\$/tn		1,71%	6,65	1,71%	6,65	1,71%	6,65	1,71%	6,65	1,71%	6,65
Flete Corto + Largo	US\$/tn			49,30		49,30		49,30		49,30		49,30
Gastos de Comercialización	US\$/ha			206,82		279,54		272,91		270,93		300,39
Gastos de Cosecha	US\$/ha			89,00		89,00		89,00		89,00		89,00
INGRESO NETO	US\$/ha			892,01		1.236,92		1.205,48		1.196,07		1.335,82
MARGEN BRUTO	US\$/ha			633		804		875		779		914
RENDIMIENTO DE INDIFERENCIA	tn/ha			0,89		1,44		1,10		1,40		1,40

Tabla A.I. Análisis de Margen Bruto detallado de los diferentes tratamientos de fertilización en soja.

Coeficientes de correlación

Correlación de Pearson

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
N° granos pl ⁻¹	N° granos pl ⁻¹	10	1,00	<0,0001
N° granos pl ⁻¹	N° granos m ⁻²	10	0,67	0,0355
N° granos pl ⁻¹	P1000	10	0,53	0,1162
N° granos pl ⁻¹	Rendimiento	10	0,86	0,0013
N° granos m ⁻²	N° granos pl ⁻¹	10	0,67	0,0355
N° granos m ⁻²	N° granos m ⁻²	10	1,00	<0,0001
N° granos m ⁻²	P1000	10	-0,14	0,7052
N° granos m ⁻²	Rendimiento	10	0,48	0,1572
P1000	N° granos pl ⁻¹	10	0,53	0,1162
P1000	N° granos m ⁻²	10	-0,14	0,7052
P1000	P1000	10	1,00	<0,0001
P1000	Rendimiento	10	0,71	0,0208
Rendimiento	N° granos pl ⁻¹	10	0,86	0,0013
Rendimiento	N° granos m ⁻²	10	0,48	0,1572
Rendimiento	P1000	10	0,71	0,0208
Rendimiento	Rendimiento	10	1,00	<0,0001

Tabla A.II. Coeficientes de correlación de Pearson y p-valor entre las variables analizadas.

Coeficientes de correlación

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades

	N° granos pl ⁻¹	N° granos m ⁻²	P1000	Rendimiento
N° granos pl ⁻¹	1,00	0,04	0,12	1,3E-03
N° granos m ⁻²	0,67	1,00	0,71	0,16
P1000	0,53	-0,14	1,00	0,02
Rendimiento	0,86	0,48	0,71	1,00

Tabla A.III. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables analizadas.