

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/391271959>

Applying the science of pollination to soybean production

Technical Report · February 2025

CITATIONS

0

READS

11

1 author:



Pablo Cavigliasso

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

38 PUBLICATIONS 1,172 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Aplicando la ciencia de la polinización en la producción de soja



Abstract

Biotic pollination is of fundamental importance to food production, yet its role in extensive agricultural systems such as soybean production is often underestimated. This study evaluated the impact of biotic pollination on soybean yield and grain quality in a plot with honey bee hives. The study compared biotic pollination treatments with self-pollination, and also evaluated pollinator activity at different distances from the hives.

The results obtained demonstrated a 34% increase in fruit formation and a 27% increase in total seed weight per unit area in plants that had been biotically pollinated. Furthermore, seed quality was found to have improved slightly, with a 1.47% increase in oil content in seeds that had been subjected to this particular pollination method. The presence of managed hives had a significant effect on pollination activity within 150 metres, with a 72% reduction in visits observed beyond 300 metres. These findings indicate that biotic pollination not only increases soybean productivity, but also compensates for the limitations of self-pollination under adverse environmental conditions.

Economic evaluations highlight the feasibility of integrating pollination services into agricultural practices, consistent with sustainability goals. Biotic pollination generated an increase comparable to the 35-year cumulative genetic gain in some productive regions, showing the complementary potential of both approaches to maximize yields.

The present study emphasises the necessity of formulating adapted agricultural strategies that prioritise pollinator health and activity, particularly in the context of environmental change. To ensure the optimal benefits of biotic pollination and the long-term sustainability and profitability of soybean production systems, it is imperative to enhance collaboration between researchers, farmers and beekeepers.

Keywords: Soybean; Pollination; *Apis mellifera*; Beekeepers; Economic value.

Resumen

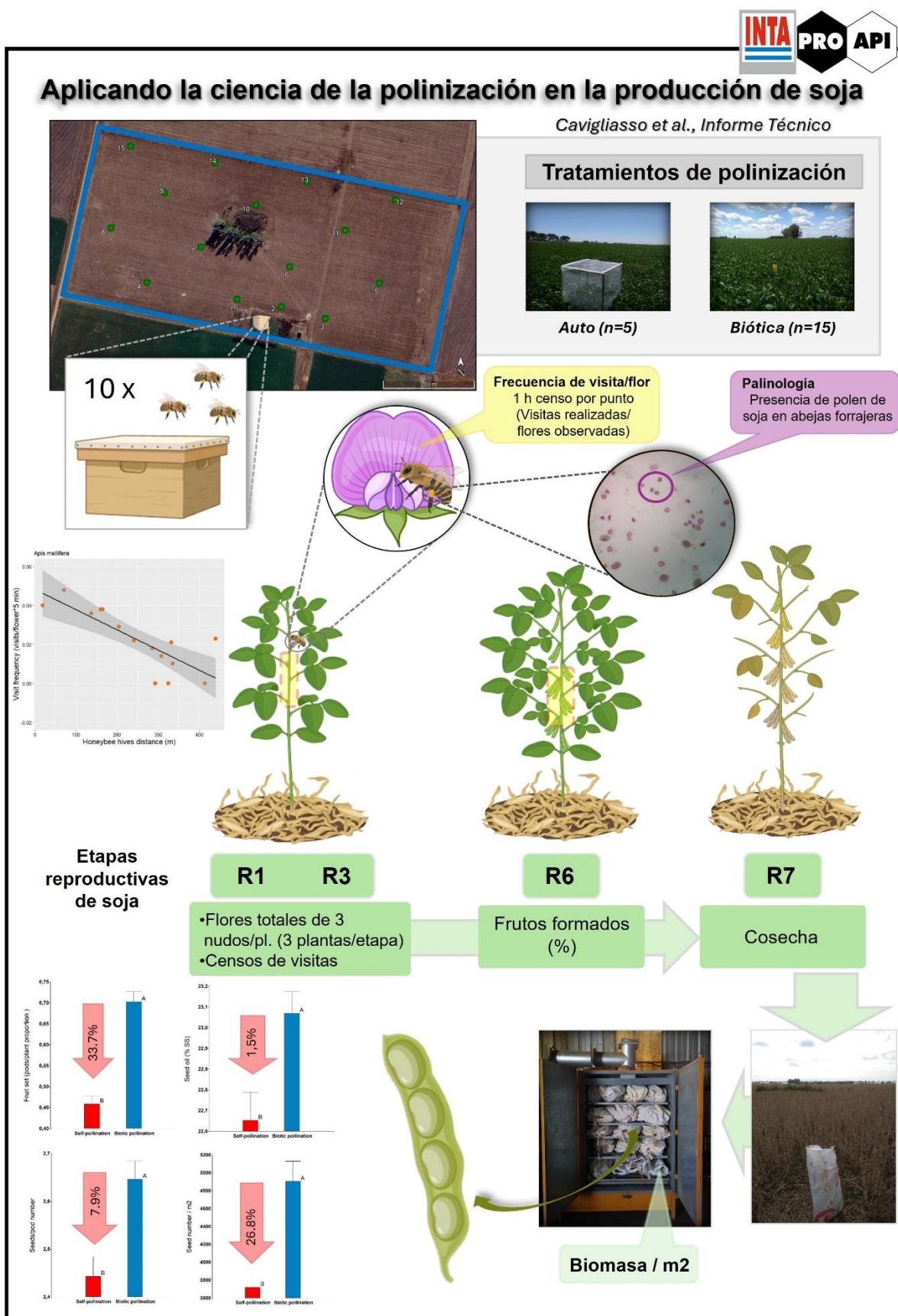
La polinización biótica es fundamental para la producción de alimentos, aunque sigue siendo subestimada en sistemas agrícolas extensivos como el de producción de soja. Nuestro estudio evaluó el impacto de la polinización biótica en el rendimiento y la calidad del grano de soja en un lote con colmenas de abejas melíferas. Se compararon tratamientos de polinización biótica frente a autopolinización, y también se evaluó la actividad de los polinizadores a diferentes distancias respecto a las colmenas.

Los resultados mostraron un aumento del 34 % en la formación de frutos y un 27 % más de peso total de semillas por unidad de superficie en plantas polinizadas bióticamente. La calidad de las semillas mejoró ligeramente, con un aumento del 1,47 % en el contenido de aceite en las semillas sometidas a esta polinización. Las colmenas manejadas incrementaron significativamente la actividad de polinización dentro de un radio de 150 metros, con una reducción del 72 % en las visitas observadas más allá de los 300 metros. Estos hallazgos indican que la polinización biótica no solo aumenta la productividad de la soja, sino que también compensa las limitaciones de la autopolinización en condiciones ambientales adversas.

Las evaluaciones económicas ponen de manifiesto la viabilidad de integrar servicios de polinización en las prácticas agrícolas, en consonancia con los objetivos de sostenibilidad. La polinización biótica generó un incremento comparable a la ganancia genética acumulada de 35 años en algunas regiones productivas, lo que muestra el potencial complementario de ambos enfoques para maximizar los rendimientos.

Nuestro estudio subraya la importancia de diseñar estrategias agrícolas adaptadas que favorezcan la salud y la actividad de los polinizadores, especialmente en un contexto de cambios ambientales. Para maximizar los beneficios de la polinización biótica y garantizar la sostenibilidad y rentabilidad de los sistemas de producción de soja a largo plazo, es crucial fortalecer la colaboración entre investigadores, agricultores y apicultores.

Palabras claves: Soja; Polinización; *Apis mellifera*; Apicultores; Valor económico.

Diagrama resumen.

1. INTRODUCCION

La polinización es uno de los servicios ecosistémicos más estudiados a nivel mundial (**Dainese et al., 2019; Gazzea et al., 2023**), ya que dependen de este proceso el 80% de las plantas con flores y mejora la producción en el 75% de los cultivos de importancia económica del mundo (**Breeze et al., 2016**). La disminución de los polinizadores en términos de abundancia y riqueza de especies se ha destacado como un problema importante debido al riesgo de una disminución en la polinización de los cultivos y, por ende, su producción (**Potts et al., 2010; Dicks et al., 2016; IPBES, 2016**).

La conservación de hábitats seminaturales cerca de áreas de producción intensiva es necesaria porque pueden proporcionar hábitats adecuados a los polinizadores y otros insectos (por ejemplo, **Tscharntke et al., 2005; Kremen et al., 2007; Ricketts et al., 2008; Garibaldi et al., 2016; Cavigliasso et al., 2021**), manteniendo los servicios ecosistémicos en los agroecosistemas y generando efectos positivos en el rendimiento de los cultivos (por ejemplo, **Gagic et al., 2019; González et al., 2020; Mazzei et al., 2021; Levenson et al., 2022**). Sin embargo, aunque la polinización por insectos es un servicio ecosistémico importante para muchos cultivos (por ejemplo, **Klein et al., 2007; Giannini et al., 2015; Siopa et al., 2023**), se comprende poco hasta qué punto los polinizadores limitan a los cultivos actualmente, particularmente en áreas de producción extensiva (**Reilly et al., 2020**).

Si bien los polinizadores son parte integral de los agroecosistemas, y es reconocido su rol en la producción de alimentos, las estimaciones sobre su contribución en la productividad y las ganancias de los agricultores son escasas (aunque ver para Latinoamérica, **Basualdo et al., 2022; Argentina, Basualdo & Cavigliasso, 2023; y Brazil, Giannini et al., 2015**). Generalmente, los paquetes tecnológicos que se utilizan en agricultura no incluyen a la polinización entomófila como un factor de importancia productiva. En este sentido, se cuantifican las pérdidas provocadas por un mal manejo integral, como el raleo, la poda, aspectos nutricionales, control de plagas y manejo del riego, pero no se consideran las pérdidas causadas por una polinización deficiente.

La soja es el cultivo que domina los sistemas extensivos de producción en Argentina, superando las 15.8 millones de hectáreas cosechadas anualmente (<https://www.fao.org/faostat/en/#data>), siendo el foco en los últimos años de numerosos estudios que evalúan las contribuciones de los polinizadores sobre la producción de granos (**Monasterolo et al., 2015; Bletter et al., 2018; Huais et al., 2020; Garibaldi et al., 2021; Santone et al., 2022; da Cunha et al., 2023; Chacoff et al., 2024**).

Aunque la soja es esencialmente una especie autógama (**Carlson & Lersten, 1987; Ahrent & Caviness, 1994**), también es polinizada de forma cruzada principalmente por insectos. **Huais et al. (2020)** compararon las cargas de polen estigmático en flores de soja excluidas de polinizadores frente a flores expuestas a polinizadores, encontrando que los estigmas de las flores excluidas de polinizadores recibieron, en promedio, aproximadamente la mitad de los granos de polen que los de las flores expuestas a polinizadores. Además, el polen estuvo ausente solo en ~6% de los estigmas cuando los polinizadores pudieron visitar las flores, pero esta proporción aumentó a ~30% cuando los polinizadores fueron excluidos. Esta evidencia muestra que, a pesar de la extensa autopolinización autónoma y la producción autógama de semillas en la soja, los visitantes de flores pueden desempeñar un papel relevante en la polinización de la soja, ya sea transfiriendo polen autogamo dentro de las flores, entre flores dentro de las plantas o polen cruzado entre plantas.

La síntesis de 28 estudios independientes dentro de Argentina donde se evaluó cómo impacta sobre la producción de soja la ausencia de polinizadores a escala productiva reporta que, en promedio, se reduce el 30% de la cantidad de vainas, granos y/o rendimiento total (entre 10-50% en todos los casos) (**da Cunha et al., 2023; Chacoff et al., 2024**). De esta forma se ha demostrado que existe una gran variación en la dependencia a los polinizadores en el caso de la soja, contradiciendo el pensamiento popular dentro de la industria agrícola de que la soja se autopoliniza predominantemente y produce semillas principalmente autógamas (**Delaplane y Mayer, 2000**). Se resalta que la dependencia de los polinizadores en la soja disminuye latitudinalmente, de forma más abrupta en latitudes extratropicales. Por lo tanto, estos hallazgos sugieren que las plantas de soja que se desarrollan en temperaturas más cálidas y fotoperiodos más cortos tienen más probabilidades de beneficiarse de mayores servicios de polinización, mientras que las plantas que crecen en temperaturas más frías y fotoperiodos más largos tienen más probabilidades de depender de la autofecundación.

La soja es una especie caracterizada por un sistema reproductivo mixto determinado por la producción de flores chasmógamas (abiertas) y cleistógamas (cerradas) (**Khan et al., 2008; Benítez et al., 2010; Jiang et al., 2011; Strelin et al., 2023**). Además, esta característica varía en respuesta a los cambios en la proporción de individuos/inflorescencias androestériles resultantes de la esterilidad masculina citoplasmática-nuclear (**Ortiz-Pérez et al., 2006a; 2006b**). La cleistogamia reducida y la androesterilidad aumentada promoverán el cruzamiento.

Estos cambios florales pueden ser inducidos por factores ambientales como altas temperaturas, sequía y deficiencia de nutrientes (**Blettler et al., 2018; Strelin et al., 2023**). Por lo tanto, la forma de apareamiento varía según el ambiente, siendo que las plantas serán más autofecundadas con flores

cleistógamas y/o más exógamas (polinizada por vectores) con flores casmógamas o androesterilidad. Estos mecanismos, vinculados a la temperatura y otros factores ambientales, explican la variación latitudinal en la dependencia de los polinizadores. Por lo tanto, a pesar del mejoramiento genético intensivo y el uso de insumos externos (**Chemeris et al., 2022**), la soja parece mantener su capacidad de respuesta plástica al entorno.

Las abejas melíferas visitan las flores de soja con mayor abundancia y frecuencia que otros insectos (**Delaplane y Mayer, 2000; Milfont et al., 2013; Santos et al., 2013; Monasterolo et al., 2015; Fagúndez et al., 2016**). Estudios palinológicos han demostrado que la soja es un recurso nectarífero importante para la producción de miel, incluso produciendo mieles monofloras (**Gallez et al., 2005; Fagúndez, 2016**). También se ha informado que la soja es la fuente principal de polen para las colonias de abejas durante el pico de floración del cultivo (**Fagúndez & Caccavari, 2003**). Esto es especialmente relevante en Argentina, donde el 70% del área cultivada es soja (**SIIA, 2020**). Se ha estimado que el valor económico de los polinizadores en las exportaciones anuales de soja de Argentina alcanza los 3330 millones US\$, valor equivalente a más de 10.6 millones de toneladas exportadas (**Basualdo & Cavigliasso et al., 2023**).

A pesar de la importancia económica de la soja, el conocimiento sobre el efecto de la polinización entomológica en el rendimiento es escaso. Esto podría ser crítico, ya que la densidad y diversidad de polinizadores silvestres ha disminuido (**Garibaldi et al., 2013**), junto a la reducción de los hábitats que proporcionan recursos de anidación y forrajeo fuera del período de floración del cultivo (**Aizen et al., 2009; Garibaldi et al., 2011**). En este contexto, las abejas melíferas manejadas pueden ser una alternativa valiosa para el reemplazo de polinizadores silvestres y para mejorar los rendimientos de la soja (**Bletter et al., 2018; Gazzoni & Barateiro, 2024; Gazzoni et al., 2024**).

Dentro de la literatura hay pocas experiencias que evalúan la incorporación de colmenas desde un punto de vista integrado a la gestión del lote, agregando este servicio dentro de los costos de producción. **Milfont et al. (2013)** han evaluado la contribución diferencial de los polinizadores silvestres y la incorporación de colmenas de abejas en los campos de producción, demostrando un aumento del 6.3 % del rendimiento de la soja en áreas donde los polinizadores silvestres tenían libre acceso a las flores. Sumado a que, la introducción de colonias de abejas aumentó aún más el rendimiento, un 18.1 %. Por lo tanto, se demuestra que, si bien la soja es autógama, permitir la polinización por polinizadores silvestres conduce a mayores rendimientos, y que agregar abejas melíferas mitiga los déficits de polinización y mejora el rendimiento en comparación con las prácticas actuales.

Frente a este marco conceptual, la contribución de la polinización biótica a la producción de soja podría ser muy importante dado que aumenta la deposición de polen, además de diversos parámetros productivos. Por lo tanto, nuestros objetivos son: a) estimar el efecto de la polinización biótica sobre la cantidad y calidad de poroto de soja, b) determinar la contribución de *Apis mellifera* y de sus interacciones con las flores de soja en lotes productivos, y c) evaluar la rentabilidad de un servicio profesional de polinización.

2. METODOLOGIA

2.1. Zona de estudio.

Argentina es uno de los principales productores y exportadores de soja a nivel mundial. La superficie destinada a la plantación de soja en el país varía, pero generalmente está entre 15 y 18 millones de hectáreas. El sudeste de la provincia de Córdoba es una de las principales regiones productoras de soja en Argentina, la cual incluye al departamento Marcos Juárez. La superficie destinada a la plantación de soja en esta región ha variado a lo largo de los años, pero generalmente se encuentra entre 1 y 1.5 millones de hectáreas (<https://www.fao.org/faostat/en/#data>).

El rendimiento promedio de la soja en esta región puede variar significativamente de un año a otro debido a factores como las condiciones climáticas, prácticas de manejo agrícola y la calidad del suelo. Sin embargo, en general, los rendimientos de soja en el sudeste de Córdoba suelen estar entre 3 y 4 toneladas por hectárea en años favorables. En condiciones óptimas, algunos campos pueden alcanzar rendimientos superiores a 4 toneladas por hectárea.

El área bajo estudio se encuentra dentro de la Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez (Lat: 32°42'48"S; Lon: 62°03'40"W) del INTA y consta de 3 secciones productivas equivalentes (de ahora en más lotes) de ~26 ha cada una. Para nuestro estudio seleccionamos el lote intermedio (denominación de catastro "L14-2") para contar con información del contexto. Además, el mismo presentaba un área natural (macizo arbóreo) de aproximadamente 1 ha en su zona central (**Fig. 1**) que nos permite aportar información sobre los efectos dados por estos componentes espaciales.

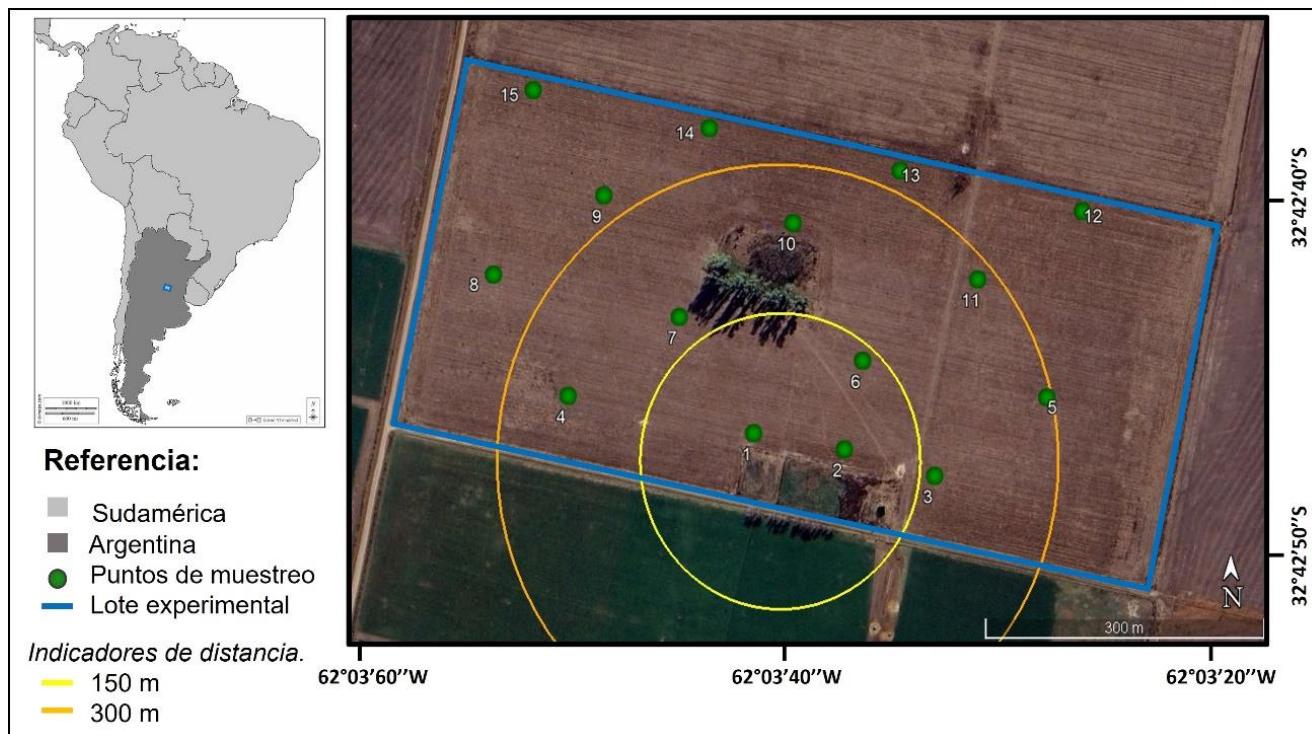


Figura 1. Ubicación del lote de estudio. Se presentan los límites definidos a la toma de datos y los puntos de muestreo designados de forma espacialmente explícita. En el centro de las áreas concéntricas fue ubicado el apíario de 10 colmenas de abejas melíferas. Las áreas concéntricas definen diferentes distancias desde las colmenas utilizada como fuente de abejas para polinización. Del punto 1 al 5 se ubicaron las jaulas de exclusión junto a las parcelas de polinización biótica.

Para la campaña 2024 en el lote bajo estudio se utilizó la variedad de soja de Don Mario “**DM 46i24 IPRO**”. Esta variedad pertenece al grupo de madurez 4.5 y es conocida por sus características destacadas en rendimiento y resistencia a enfermedades (tecnología INTACTA RR2 PRO, que ofrece resistencia a insectos lepidópteros y tolerancia a glifosato).

La fecha de siembra del lote fue a mediados de noviembre de 2023 en una densidad de siembra de 35 cm entre surcos. El 3 de enero de 2024 se constató que el cultivo estaba en R1 lo que inicio la etapa experimental. La cosecha fue realizada en R8 entre el 27 y 28 de marzo de 2024, veinte días antes de la cosecha mecánica (Cosechadora John Deere; equipo 9770 STS ALEMANO: 1CQ9770APA0090141).

2.2.Diseño experimental

El estudio se ha diseñado para contemplar la comparación de tratamientos reproductivos- productivos al mismo tiempo que se incorpora un diseño espacialmente explícito para evaluar la variabilidad de los datos frente a una serie de factores fijos (distancia a fuente de abejas melíferas, frecuencia de interacción de polinizadores).

Los tratamientos reproductivos de polinización fueron dos: *Polinización biótica* (Biotic pollination; n=15) y *Auto-polinización* (Self-pollination; n=5). Cada unidad experimental consistió en la totalidad de plantas generadas en una superficie de 1 m² y se estimó la formación de frutos (vainas formadas/flores iniciales), el llenado de las vainas (número de semillas/fruto) y la calidad de las semillas estimada mediante el peso (peso de 1000 semillas, peso / m²) y su perfil nutricional (Proteína, Aceite, PROFAT) en ambos tratamientos.

Para el tratamiento de *Auto-polinización* se realizaron jaulas de exclusión con estructura de madera de 1 pulgada y tela de tul de color blanco con una superficie de 1 x 1 m. Se utilizó este material de exclusión ya que es translúcido y tiene un porcentaje bajo de reducción de la irradiación (~ 3%) además de que no tiene filtros UV. Se distribuyeron las 5 jaulas de exclusión dentro del lote bajo estudio de forma contigua a las 5 parcelas correspondientes al tratamiento de polinización biótica de la zona sur del lote (mayor cercanía a las colmenas de abejas melíferas, ver **Fig. 1**).

Para el tratamiento de *Polinización biótica* se seleccionaron 15 parcelas con una distribución espacialmente explícita dentro del lote de modo que la ubicación de cada punto individual esté representando parte de la variabilidad del suelo y se encuentren a diferentes distancias de la fuente de polinizadores (posición de colmenas).

En el centro sur del lote, se introdujeron 10 colmenas dentro de un área acondicionada para tal fin y fueron distribuidas en grupos de 2 a lo largo de 100 m lineales. Las mismas ingresaron dentro del lote el 4 de enero y estuvieron hasta R5 (primera quincena de febrero) momento donde fueron retiradas y trasladadas a otra ubicación. Las mismas fueron gestionadas de forma convencional lo cual consiste en un manejo de colmenas en grupos centrales situados junto al campo y con un monitoreo semanal de su actividad de forrajeo. Este estilo de gestión es similar al que llevan a cabo muchos apicultores de todo el mundo.

2.3.Colección de Datos

2.3.1. Cultivo de soja:

Indistintamente del tratamiento, se seleccionaron 3 plantas dentro de cada unidad muestral (parcela), tanto en la etapa R1 y R3 del cultivo de soja. En cada planta se seleccionaron 3 nudos consecutivos del eje principal de la zona central (R1) y 3 nudos consecutivos de la zona terminal (R3). En cada parcela, se evaluó el total de flores que llegaban a formar vainas (Fruit set) en 18 nudos.

Al momento de la cosecha, el total de las plantas comprendidas dentro de cada parcela fueron cosechadas a mano y colocadas en bolsas individuales. Las bolsas correspondientes a las 20 unidades muéstrales totales fueron secadas a estufa (Estufa para secado forrajero *Tecnica Seis SA. Serie 0150*) durante el periodo de 5 días a 60 °C. Se pesó la biomasa total de cada bolsa antes de cosechar las semillas totales. Para evaluar la cantidad y calidad de los porotos de soja, en primer lugar, se separaron 100 vainas por bolsa y se cuantifico el número de semillas por vaina (1, 2, 3 o 4) y se estimó su frecuencia relativa en la muestra. Luego, se cosecho las semillas totales contenidas en cada bolsa de forma independiente usando micro trilladora de laboratorio (*Ferretti Ingenieria, Serie Mtr – 02 – MI*). Una vez cosechadas las semillas, se cuantificaron mediante contador de semillas (*JIRCAS MCA Fujiwara KC-10*) y se estimó el peso de 1000 semillas, tantas veces fuera posible por parcela (entre 3 y 6 réplicas por parcela). Además, se pesó el total de las semillas colectadas (balanza digital Adventure MAX CAP 1500 gr Serie ARA520 precisión de 0,01 g) de cada una de las muestras. Se estimó el perfil nutricional de las semillas cosechadas en cada parcela mediante Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIRS) para análisis de muestras de la industria alimenticia (FOSS DS 2500). Se cuenta con los mapas de rendimiento generados mediante monitor en cosechadora para cotejar la fiabilidad de los resultados obtenidos (**Figura S1**).

2.3.2. Actividad de las abejas:

La frecuencia de visitas a las flores se estimó sistemáticamente en todas las parcelas con polinización biótica. Para ello, se realizaron censos visuales de polinizadores registrando el número de flores visitadas por los polinizadores durante un periodo de 5 min (es decir, nº visitas/ flor * 5 min). Cada censo incluyó un grupo diferente de flores seleccionadas al azar (alrededor de 10 unidades florales por censo), en una localización aleatoria dentro de cada parcela. Estos censos de visitas se realizaron en todas las parcelas estudiadas el mismo día entre las 9 am - 5 pm, cambiando periódicamente el horario de censo en cada parcela para cubrir todo el rango horario a lo largo de las 4 fechas de censo

distribuidas entre la etapa R1 y R4. Los censos de visitas se realizaron en días con un clima favorable para el forrajeo de las abejas, días soleados a parcialmente soleados en horas donde la temperatura es adecuada para su actividad. En total, se realizaron 180 censos de polinizadores dentro del lote, totalizando 15 horas de observación (es decir, 1 h por parcela).

2.3.3. Colmenas de abejas:

En promedio, las colmenas ingresaron con un nivel poblacional medio el cual fue creciendo a lo largo del tiempo. La actividad de forrajeo inicial promedio de las colmenas fue estimada mediante el censo del número de abejas que ingresaban a la colmena en períodos de 5 minutos. Como dato informativo, al inicio el lote presentó una actividad de forrajeo en la piquera de la colmena, en media (SD), de 15.2 (6.8) abejas/5 min. incrementando a 48.6 (34.3) abejas/5 min. en cuatro semanas.

Se realizaron análisis palinológicos de las cargas corbiculares y del cuerpo de abejas que ingresaban a las colmenas para constatar la presencia de polen de soja y su proporción en comparación con polen de otro origen. Se capturaron abejas que llegaban a las colmenas, mediante el uso de red entomológica. Esto se realizó 4 veces por semana, una vez por cada semana que dura la floración del cultivo (4 semanas).

Como técnica de muestreo se caminó dando golpes de red a medio metro frente la piquera de las colmenas. Las abejas capturadas en la red fueron sacudidas para que liberen las cargas corbiculares. Por cada pasada de red se tomó una muestra del total de las cargas corbiculares y otra de 10 abejas al azar para evaluar el contenido de polen corporal. En ambos casos, a las muestras colectadas se le agrego 5 cm³ de alcohol al 70% y se las agitó para realizar un homogéneo. Del homogéneo resultante, se extrajo una alícuota y se la tiñó con solución de Alexander (**Kearns & Inouye, 1993**) y, mediante microscopio estereoscópico, se cuantificó y caracterizó en “polen de Soja y No soja” a los primeros 100 granos de polen observados, repitiendo esta última parte del proceso hasta llegar al número final de granos estipulado.

2.4. Análisis de datos

Se utilizaron modelos generales lineales (GLM) o generalizados lineales mixtos (GLMM) para los análisis realizados (**Zuur et al., 2013**).

Dependencia de la soja de la polinización biótica.

En primer lugar, se analizó la relación entre la formación de vainas en función del tratamiento reproductivo de polinización para las flores de soja (factor fijo - FF: Auto-polinización vs. Polinización

biótica). El número de vainas formadas en cada conjunto de racimos florales estudiados se utilizó como variable de respuesta (VR), y las flores iniciales de los mismos racimos se incluyeron en el modelo como variable "offset". La estructura de factor aleatorio declarada del modelo consistió "etapa de evaluación" (R1 y R2) anidado dentro de "Parcela", con una distribución de error de tipo Binomial negativa (link=log).

Cantidad y calidad de granos de soja.

En los análisis propuestos en las secciones siguientes, las métricas utilizadas para los análisis son obtenidas mediante el promedio de las diferentes submuestras obtenidas (peso de 1000, frecuencia de visita, parámetros nutricionales) dentro de cada parcela para poder asociar las diferentes variables y factores propuestos.

El número de semillas/vaina, el peso de 1000 semillas, el peso total de semillas/m² estimado en cada parcela se utilizó como variable de respuesta y el tratamiento como factor fijo. La estructura de factor aleatorio declarada del modelo consistió en "Parcela", con una distribución de error de tipo Gamma (link=log).

Efectos de la frecuencia de visita sobre la producción de soja.

Para determinar el efecto de la frecuencia de visita/flor sobre las variables respuesta media del porcentaje de frutos formados, semillas/vaina, peso y SD de 1000 granos, peso total de semillas/m² y parámetros nutricionales (porcentaje de proteína y aceite); usamos como factor fijo la frecuencia de visita/flor promedio y de la abeja melífera (*Apis mellifera*) de forma independiente. La estructura aleatoria del modelo contuvo solo el término "Parcela". Se probaron diferentes distribuciones de error según el caso particular.

Además, se evaluó el efecto de la distancia al apiario sobre la frecuencia de visita a las flores de soja total, de *A. mellifera* y de polinizadores silvestres. Además, se hizo el mismo tratamiento a los parámetros productivos para ver como reaccionaban en los diferentes rangos de distancia. Para esto la frecuencia de visita fue utilizada como variable respuesta y la distancia en metros desde el punto más cercano del núcleo de colmenas como factor fijo. Esta variable fue considerada como continua o de forma categórica constituida por 3 rangos de distancias: < 150 m, 150-300 m y > 300 m. La estructura aleatoria del modelo consistió en "Parcela" con una distribución de error Binomial (link=logit).

Polen corbicular y corporal.

Evaluamos mediante la abundancia relativa de “polen de soja” en qué proporción las abejas melíferas se encuentran utilizando este recurso. Para esto el valor obtenido de la palinología se utilizó como variable respuesta y la variable categórica “polen corbiccular o corporal” como factor fijo. La estructura de factor aleatorio del modelo consistió en "Semana", con una distribución de error de tipo Gamma (link=log).

Selección y cálculo de modelos.

Para seleccionar la mejor estructura para los GLMM, partimos de la estructura de modelo más sencilla y lógica. Utilizamos el criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo que mejor representaba nuestra variabilidad, eligiendo el modelo no nulo con el valor AIC más bajo (**Bates et al., 2014; Bates, 2015**). Utilizamos la función *anova* del paquete "stats" para comparar modelos. Comprobamos los supuestos de los modelos presentados utilizando el paquete "performance" versión 0.10.2 (**Lüdecke et al., 2021**).

Todos los cálculos se realizaron con el software estadístico R versión 4.1.3 (**RStudio Team., 2015**). Se utilizaron las funciones *glm*, *glmer* y *glmer.nb* del paquete "lme4" versión 1.1-27.1 para determinar la significación de los modelos. Para la comparación de diferentes categorías correspondientes a un factor fijo, utilizamos la función *LSD.test* del paquete "agricolae" versión 1.3-5. Para los gráficos, utilizamos las herramientas gráficas del paquete "ggplot2" versión 3.3.5.

3. RESULTADOS

El ensamble de polinizadores de soja fue determinado por un total de 50 visitas, de las cuales el 64% fueron de *Apis mellifera*. El 36 % de las visitas restantes se reparte entre abejas nativas (22% *Augochlora spp.*, *Lassioglossum spp.*: Halictidae y *Xylocopa splendidula*: Apidae) y moscas miméticas (14%, *Toxomerus duplicatus*: Syrphidae).

La frecuencia de visita media a las flores de soja fue de 0.04 (± 0.07) visitas / flor * 5 minutos. Esto quiere decir que, durante las horas de luz, en un periodo de 2 hora cualquiera de las flores presentes en el lote al menos han recibido 1 visita.

La frecuencia de visita de *A. mellifera* se vio afectada de forma significativa por la distancia a las colmenas. Al respecto, observamos que mientras más lejos de la ubicación de la colmena hacíamos los

censos, menor era la frecuencia de visitas a las flores de soja (GLM, $\beta = -1.04E-04$, SE = 2.15E-05, $t = -4.82$, $P = 0.0003$; **Fig. 2**). Se pudo calcular una reducción del 72.59 % de la frecuencia de visita media de *A. mellifera* entre las categorías de <150 m y >300 m de distancia a las colmenas ubicadas junto al lote (**Figura S2; Tabla S1**).

Al evaluar el contenido de polen de soja presente sobre las abejas forrajeras observamos una diferencia significativa de su representación entre el polen corbiccular y corporal (GLMM, $\beta = -1.92$, SE = 0.16, $t = -11.73$, $P = <0.0001$). El polen de soja presente en el contenido corbiccular se encontró en menor proporción que en el corporal estando, en media (SE), en el 9.31 (1.62) y 63.59 (12.43) %, respectivamente.

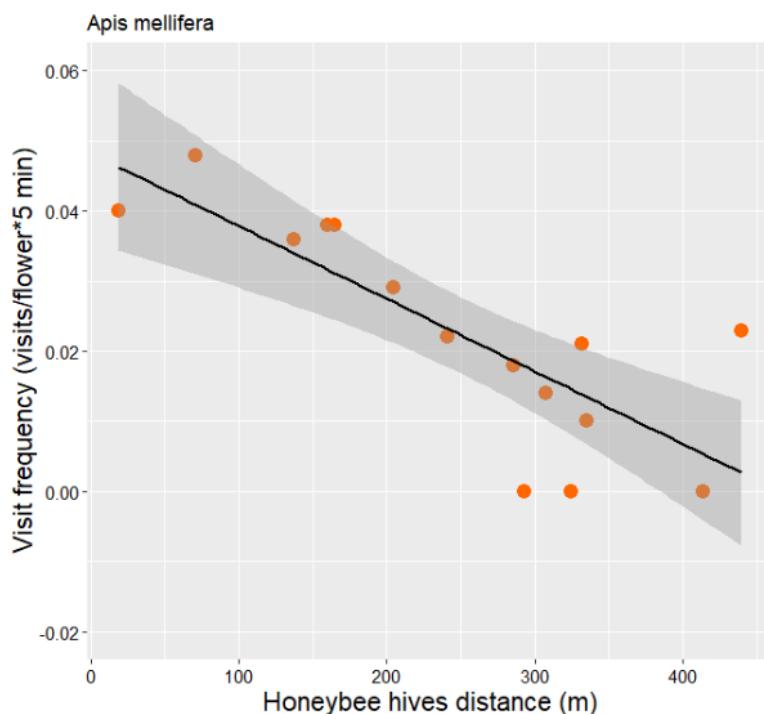


Figura 2. Visita de la abeja melífera a las flores de soja. Se presenta la relación entre la frecuencia de visita/flor de soja en función de la distancia a las colmenas.

3.1. Formación de frutos.

Las parcelas bajo polinización biótica produjeron un 34% más de frutos cuajados que las de auto-polinización (GLMM, $\beta = 0.41$, SE = 0.14, Z = 2.89, P = 0.0038). Al respecto, en media (\pm SE), el 71 (± 8) % de las flores fructificaron en el tratamiento de polinización biótica, mientras que las plantas sometidas a auto-polinización mostraron solo que el 47 (± 6) % de las flores fructificaron (Fig 3-a).

Se observa, que el aumento de la frecuencia de visita de las abejas melíferas se tradujo en un aumento de la probabilidad de que una flor se convirtiera en fruto. Esta relación fue significativamente positiva (GLMM, $\beta = 1.70$, SE = 1.68E-04, t = 10103, P < 2E-16). Esto quiere decir que a medida que aumenta la cantidad de visitas por flor aumenta el porcentaje de frutos formados (Fig 3-b). Se presentan los valores resumen de los estadísticos correspondientes a los modelos en la **Tabla S2**.

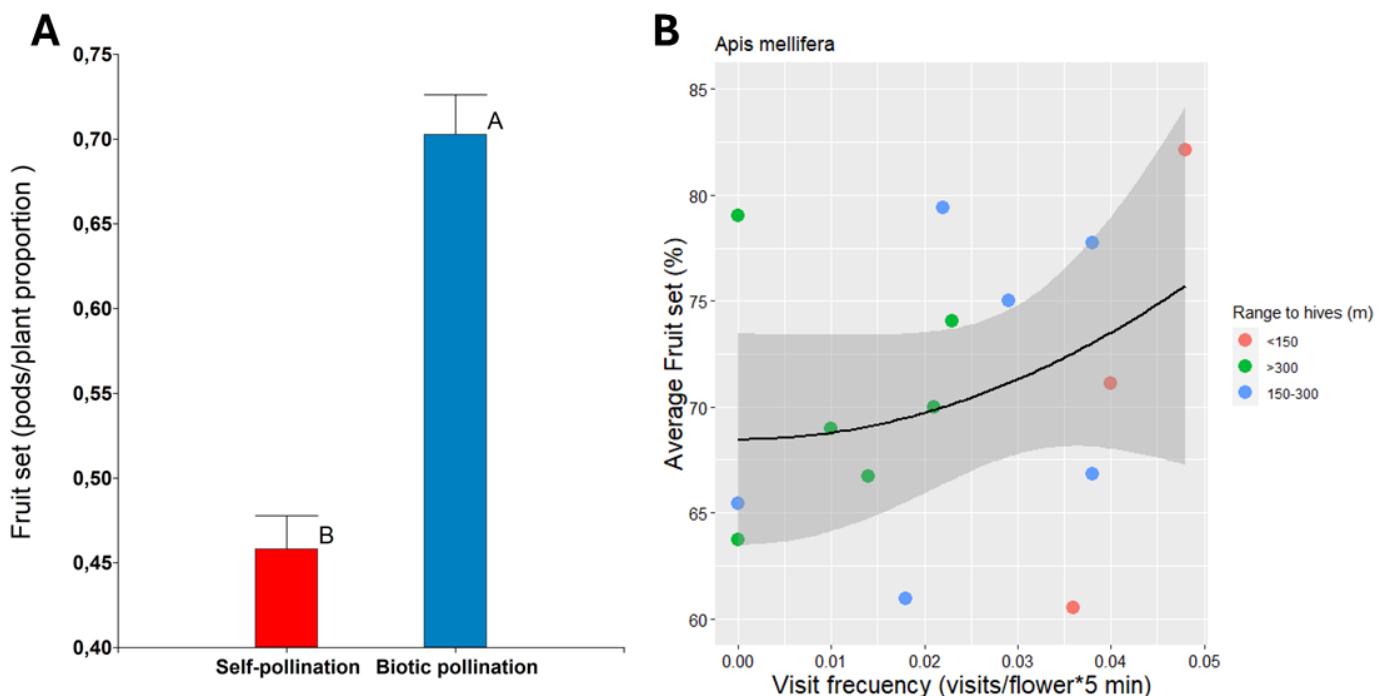


Figure 3. Formación de frutos de soja. A) Comparación de la proporción de frutos producidos en plantas Auto-polinizadas y con polinización biótica (Letras diferentes muestran diferencias significativas). B) Relación entre la frecuencia de visita de las abejas melíferas a las flores de soja y el porcentaje de frutos formados.

3.2. Producción de semillas.

Siguiendo la misma tendencia, las plantas de las parcelas bajo polinización biótica produjeron un 7.95 % más semillas por vainas que las plantas auto-polinizadas (Gamma, link=log; $\beta = 0.08$, SE = 0.01, t = 7.55, $P < 0.0001$) (Fig. 4-a). Esto se debe a que las vainas provenientes de plantas bajo polinización biótica tenían mayor probabilidad de generar 3 semillas (63.92 ± 2.70) que en plantas auto-polinizadas (47.06 ± 2.87) (Fig. 4-b; Tabla S2).

Además, el peso de 1000 semillas estimado en las plantas que han recibido polinización biótica fueron un 3.96 % más pesadas que las auto-polinizadas ($\beta = 0.04$, SE = 0.01, t = 2.87, $P = 0.0041$) (Fig. 5.a). La sumatoria de los efectos estimados sobre el peso total de las semillas obtenidas resultó en un alza del 26.75% de su media y una reducción del 15.14 % de su variabilidad en las parcelas de polinización biótica en comparación con las de auto-polinización (Media peso total: $\beta = 0.33$, SE = 0.06, t = 5.80, $P < 0.0001$; SD peso total: $\beta = -0.16$, SE = 4.3 E-03, t = -38.03, $P < 0.0001$) (Fig. 5.b, Tabla S2). A modo de control, se comparó las métricas productivas obtenidas mediante cosecha manual con lo observado en los mapas de rendimiento generados por el monitor en cosechadora, no encontrando diferencias entre ambas estimaciones (Figura S1).

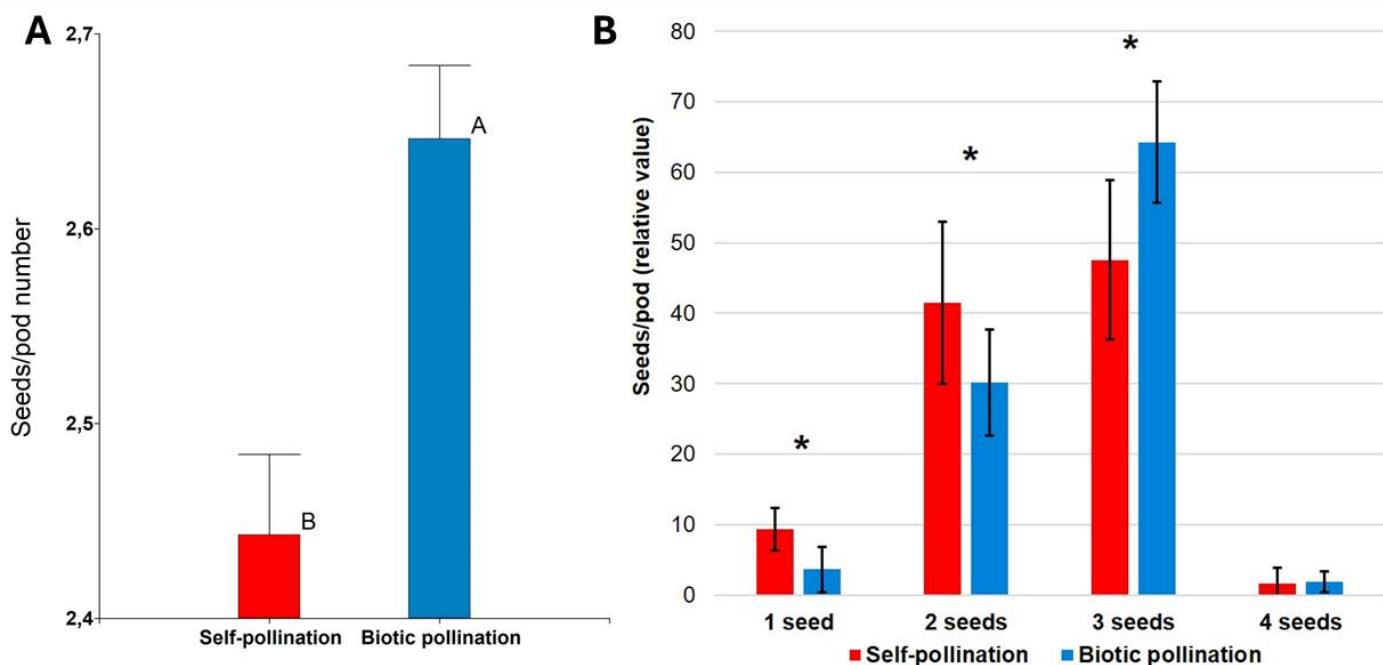


Figure 4. Formación de semillas/fruto de soja. A) Comparación del número de semillas por fruto generadas en plantas Auto-polinizadas y por Polinización biótica (Letras diferentes muestran diferencias significativas). B) Variación de porcentual de vainas con 1, 2, 3 y 4 semillas entre tratamientos (* diferencias significativas para la categoría, ver Tabla S3).

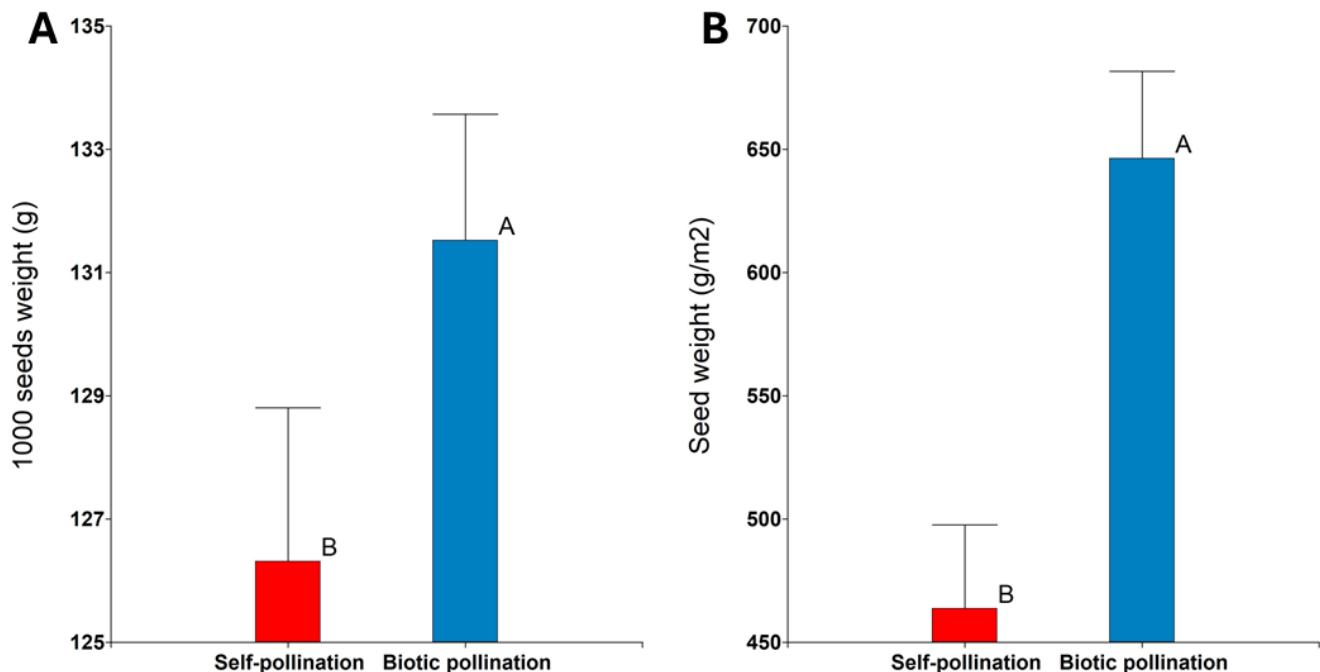


Figure 5. Producción de semillas de soja por unidad de superficie. Comparación del peso de 1000 semillas (A) y del total por m² de producción (B) generadas en plantas Auto-polinizadas y por Polinización biótica (Letras diferentes muestran diferencias significativas).

3.3. Calidad de semillas

Al comparar la calidad nutricional de las semillas de soja cosechadas en ambos tratamientos, se pudo observar que solo el contenido de aceite (%SS) en semillas mostro cambios significativos entre tratamientos, no así el porcentaje de proteína y el cálculo de PROFAT (ver **Tabla S2**). El porcentaje de aceite fue un 1.47% superior en las semillas resultantes de polinización biótica (GLMM, Gamma link=log; $\beta = 0.01$, SE = 4.9E-03, t = 2.99, P = 0.0028).

4. DISCUSION

Nuestros resultados indican que la polinización biótica tiene un impacto significativo en la cantidad y calidad de los porotos de soja. En comparación con el tratamiento de auto-polinización, las plantas expuestas a polinizadores mostraron una mayor formación de frutos (33,65 %), llenado de las vainas (7,95%), peso de las semillas por unidad de superficie (26,75 %), peso de 1000 semillas (3,96%) y el contenido de aceite de los granos (1,47%). Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han demostrado la importancia de la polinización entomológica para mejorar el rendimiento de este cultivo (**Huais et al. 2020; Monasterolo et al., 2015; da Cunha et al., 2023; Chacoff et al., 2024; Galetto et al., 2024**). Por lo que, se podría asegurar que la polinización biótica mejora la cantidad y, presuntamente, la calidad del polen transferido lo que incrementaría el número de flores fecundadas con mayor eficiencia (**Santone et al., 2022**).

Cabe destacar que nuestros resultados coinciden con lo predicho por **da Cunha et al. (2023)**, quienes reportaron incrementos similares en la producción de soja para estas latitudes. Esta asociación entre la dependencia de la polinización para la formación de frutos de soja con una variación latitudinal ha demostrado que las plantas de soja son plásticas y en regiones con temperaturas más cálidas y fotoperiodos más cortos tienden a beneficiarse más de los servicios de polinización.

La consistencia de estos hallazgos sugiere que la influencia positiva de los polinizadores en la producción de soja es particularmente relevante en estas regiones, donde las condiciones ambientales pueden favorecer una mayor dependencia a la actividad de polinización mediante el aumento de la casmogamia en el cultivo (**Strelin et al., 2023**). Esta condición de plasticidad en la proporción de flores casmógamas y cleistógamas es lo que podría estar generando la variabilidad en el efecto sobre la producción de los cultivos de soja. Por lo que conocer como los cambios de la relación de dependencia a la polinización asociados a variables ambientales en un contexto de cambio climático, es crítico para evaluar las demandas de uno de los cultivos con mayor extensión de producción en el mundo.

Además, nuestros resultados sugieren que la polinización biótica puede compensar parcialmente las limitaciones de la auto-polinización en condiciones subóptimas. En ambientes donde la auto-polinización podría no ser suficiente para asegurar altos rendimientos debido a factores ambientales o genéticos, la polinización biótica proporciona una fuente adicional de aseguramiento de la producción. Estos beneficios subrayan la necesidad de integrar prácticas que favorezcan la presencia y actividad de polinizadores en los sistemas agrícolas (**Garibaldi et al., 2021**).

La introducción de colmenas de *Apis mellifera* en el lote productivo resultó en un aumento notable en la actividad de polinización dentro del radio de los 150 m de su ubicación, reduciéndose en un 72 % su frecuencia de visita más allá de los 300 m de las colmenas. Este hallazgo apoya la idea de que las abejas melíferas manejadas pueden ser una alternativa valiosa para suplir la disminución de polinizadores silvestres y mejorar los rendimientos agrícolas (**Bletter et al. 2018; Gazzoni et al., 2024; Gazzoni & Paz Barateiro, 2024**). La capacidad de *A. mellifera* para adaptarse a diferentes entornos y su manejo relativamente sencillo la convierten en una opción viable para la polinización dirigida. Sin embargo, es importante considerar el aporte entre abejas melíferas y polinizadores nativos. La gestión adecuada de las colmenas y la conservación de hábitats naturales pueden mitigar estos efectos y promover una coexistencia beneficiosa para la biodiversidad y la agricultura.

La evaluación económica del uso de servicios profesionales de polinización muestra que la inclusión de colmenas de abejas en los costos de producción puede ser rentable, mejorando significativamente el rendimiento del cultivo y proporcionando un valor agregado a los agricultores. Frente a estos resultados, las estimaciones previas sobre el valor económico de los polinizadores en la producción de soja en Argentina (**Basualdo & Cavigliasso, 2023**) y Latinoamérica (**Basualdo et al., 2022**) han subestimado las contribuciones. Los beneficios económicos observados en nuestro estudio incluyen no solo el aumento de la producción, sino también la mejora en la calidad de los granos, lo que puede traducirse en precios diferenciales o aumentos en el volumen en mercados destinados a la producción de aceite.

En el contexto productivo actual (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>), Argentina comercializó en los últimos años 43.83 M de toneladas de poroto de soja promedio de los cuales el ~ 75 % se destina a producción de aceite de soja. Nuestro trabajo muestra que producto de la polinización biótica, los granos tuvieron un incremento del 1.47 % del contenido de aceite. Si por cada tonelada de grano se produce alrededor de 217 L de aceite (200 Kg de aceite con una densidad de 0.92 Kg/L), este incremento equivale, usando la diferencia entre los porcentajes del contenido de aceite promedio medidos en cada tratamiento, a 3.04 L cada tonelada de grano. En un volumen de 31.5 M de toneladas al año para producción de aceite de soja, el incremento alcanza los 95.76 M litros al año. Con relación al aumento de la producción por unidad de superficie, podríamos comparar el incremento en el rendimiento mediante polinización biótica con la sumatoria de la ganancia genética de los últimos 35 años, al menos en lotes del norte pampeano argentino que en promedio muestran una ganancia genética de 43 kg/ha*año para los grupos de madurez III, IV y V (**de Felipe et al., 2016; de Felipe & Alvarez Prado, 2021; Abdala et al., 2024**).

La inversión en servicios de polinización debe ser vista como una estrategia a largo plazo, donde los beneficios se extienden más allá de una sola temporada de cultivo. La creación de asociaciones que vinculen agricultores y apicultores bajo contratos formales, así como políticas que incentiven la conservación de espacios naturales que protejan los servicios brindados por especies silvestres y le aporten recursos para la sostenibilidad de sus poblaciones (**Dainese et al., 2019**), de esta forma pudiendo maximizar los beneficios y asegurar la producción de soja al mismo tiempo que se favorecen los procesos ecosistémicos que llevan a un agroecosistema saludable y funcional.

4.1. Conclusiones

Los resultados de este estudio destacan la importancia de la polinización biótica para mejorar la productividad de la soja, particularmente en sistemas extensivos como los de Argentina. La polinización biótica incrementó en un 34% la formación de frutos y en un 27% el peso total de semillas por unidad de superficie, junto con un leve aumento en el contenido de aceite. Estos hallazgos refuerzan la relevancia de incorporar estrategias que incluyan servicios de polinización como parte integral del manejo agronómico, optimizando no solo el rendimiento, sino también la calidad de la producción. La inversión en estos servicios se presenta como una herramienta clave para maximizar los beneficios económicos del cultivo.

La interacción entre *Apis mellifera* y el cultivo de soja mostró que la actividad de polinización es mayor en un radio de 150 metros alrededor de las colmenas, reduciéndose en un 72% más allá de los 300 metros. Estos resultados subrayan la importancia de ajustar la densidad de colmenas por superficie de cultivo, optimizando la cobertura de polinización y minimizando déficits en áreas distantes. Este enfoque puede guiar decisiones estratégicas en la gestión de colmenas, maximizando su impacto productivo mientras se mitiga la pérdida de polinizadores silvestres.

Estos hallazgos destacan la relevancia de adaptar prácticas agrícolas que consideren la variabilidad ambiental, fomentando la colaboración entre agricultores y apicultores. En un contexto de cambio climático y pérdida de biodiversidad, es fundamental incorporar tanto polinizadores manejados como silvestres en la planificación de los sistemas agrícolas. Los polinizadores silvestres, debido a su diversidad y adaptabilidad, actúan como un componente esencial de resiliencia del sistema, asegurando servicios de polinización incluso en condiciones adversas. Promover la conservación de hábitats naturales dentro y alrededor de los cultivos no solo beneficia a los polinizadores silvestres, sino que también potencia la estabilidad y funcionalidad del agroecosistema. Esta integración de polinizadores

manejados y silvestres asegura la sostenibilidad y rentabilidad de la producción, reforzando la salud de los sistemas agrícolas y su capacidad de respuesta a los desafíos ambientales a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece la valiosa contribución del Programa Nacional de Apicultura (PROAPI) del INTA, en particular la financiación desde su instrumento, el proyecto estructural “Aportes al Desarrollo Sostenible de la Apicultura Argentina (2023-PE-L01-I069-INTA)”, y la contribución de la cooperadora de la Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez (CR Córdoba). Además, se agradecen los servicios del laboratorio de calidad de granos (EEA Marcos Juárez), en especial a L. R. Mir y N. Yerkovich, quienes han facilitado los análisis de calidad para evaluar la polinización del cultivo de soja.

REFERENCIAS

- Abdala, L. J., Otegui, M. E., & Di Mauro, G. (2024). On-farm soybean genetic progress and yield stability during the early 21st century: A case study of a commercial breeding program in Argentina and Brazil. *Field Crops Research*, 308, 109277.
- Ahrent, D. K., & Caviness, C. E. (1994). Natural cross-pollination of twelve soybean cultivars in Arkansas. *Crop Science*, 34(2), 376-378.
- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., & Dondo, M. (2009). Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), 45-54.
- Basualdo, M., & Cavigliasso, P. (2023). Economic assessment of Biotic pollination in crops from Argentina: possible effects of the pollinator crisis in agricultura. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 82(1), 48-56.
- Basualdo, M., Cavigliasso, P., de Avila Jr, R. S., Aldea-Sánchez, P., Correa-Benítez, A., Harms, J. M., ... & Salvarrey, S. (2022). Current status and economic value of insect-pollinated dependent crops in Latin America. *Ecological Economics*, 196, 107395.
- Bates, D. (2015) Package ‘lme4’. *Convergence*. 12(2). Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/lme4.pdf>. Last accessed: June 22, 2021.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2014) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *arXiv preprint arXiv:1406.5823*.
- Benítez, E. R., Khan, N. A., Matsumura, H., Abe, J., & Takahashi, R. (2010). Varietal differences and morphology of cleistogamy in soybean. *Crop science*, 50(1), 185-190. 10.2135/cropsci2009.02.0108
- Blettler, D. C., Fagundez, G. A., & Caviglia, O. P. (2018). Contribution of honeybees to soybean yield. *Apidologie*, 49, 101-111.
- Breeze, T.D.; Gallai, N.; Garibaldi, L.A.; Li, X.S. (2016) Economic Measures of Pollination Services: Shortcomings and Future Directions. *Trends in Ecology & Evolution*, Volume 31, Issue 12, 927-939. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.09.002>.
- Carlson, J. B. (1987). Reproductive morphology. In: Wilcox, JR, ed. *Soybeans, Improvement, Production, and Uses*. 2nd ed. Madison: American Soc. Agron.: 97–134.
- Cavigliasso, P., Phifer, C. C., Knowlton, J. L., Licata, J. A., Flaspohler, D. J., Webster, C. R., & Chacoff, N. P. (2022). Influence of landscape composition on wild bee communities: Effects of functional landscape heterogeneity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340, 108150.

- Chacoff, N. P., Carrasco, J., Castillo, S. E., Garzia, A. C. M., Zarbá, L., & Aragón, R. (2024). The contribution of pollinators varies among soybean cultivar traits. *Basic and Applied Ecology*, 81, 44-52.
- Chemeris, A., Liu, Y., & Ker, A. P. (2022). Insurance subsidies, climate change, and innovation: Implications for crop yield resiliency. *Food Policy*, 108, 102232. 10.1016/j.foodpol.2022.102232
- da Cunha, N. L., Chacoff, N. P., Sáez, A., Schmucki, R., Galetto, L., Devoto, M., ... & Aizen, M. A. (2023). Soybean dependence on biotic pollination decreases with latitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108376.
- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science advances*, 5(10), eaax0121. DOI: 10.1126/sciadv.aax0121
- Delaplane, K. S., & Mayer, D. F. (2000). Crop pollination by bees. CABI publishing. p. 344.
- Dicks, L. V., Viana, B., Bommarco, R., Brosi, B., Arizmendi, M. D. C., Cunningham, S. A., ... & Potts, S. G. (2016). Ten policies for pollinators. *Science*, 354(6315), 975-976.
- Fagúndez, G. (2016). Botanical and geographical characterisation of honeys in Diamante, Entre Ríos, Argentina. *Palynology*, 40(3), 308-321.
- Fagúndez, G. A., & Caccavari, M. A. (2003). Primeros registros de mieles monofloras y cargas de polen de soja (*Glycine max* L.) en Argentina. *Boletín Apícola Trimestral*, SAGPyA, 24, 3-6.
- Fagundez, G. A., Blettler, D. C., Krumrick, C. G., Bertos, M. D. L. Á., & Trujillo, C. G. (2016). Do agrochemicals used during soybean flowering affect the visits of *Apis mellifera* L.? *Span. J. Agric. Res.*, 14: e0301.
- de Felipe, M., Gerde, J. A., & Rotundo, J. L. (2016). Soybean genetic gain in maturity groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop science*, 56(6), 3066-3077.
- de Felipe, M., & Alvarez Prado, S. (2021). Has yield plasticity already been exploited by soybean breeding programmes in Argentina?. *Journal of Experimental Botany*, 72(20), 7264-7273.
- Gagic, V., Marcora, A., & Howie, L. (2019). Additive and interactive effects of pollination and biological pest control on crop yield. *Journal of Applied Ecology*, 56(11), 2528-2535.
- Galetto, L., Palombo, N., Amarilla, L., & Maestri, D. Impact of Pollination and Agroecosystem Configuration on Oil Content and Composition in Soybean Crops. Available at SSRN 4885353. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4885353>
- Garibaldi, L. A., Carvalheiro, L. G., Vaissière, B. E., Gemmill-Herren, B., Hipólito, J., Freitas, B. M., ... & Zhang, H. (2016). Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science*, 351(6271), 388-391.
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J. M., Bommarco, R., Cunningham, S. A., ... & Klein, A. M. (2011). Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology letters*, 14(10), 1062-1072.
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., ... & Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *science*, 339(6127), 1608-1611.
- Garibaldi, L. A., Schulte, L. A., Jodar, D. N. N., Carella, D. S. G., & Kremen, C. (2021). Time to integrate pollinator science into soybean production. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(7), 573-575.
- Gazzea, E., Batáry, P., & Marini, L. (2023). Global meta-analysis shows reduced quality of food crops under inadequate animal pollination. *Nature communications*, 14(1), 4463. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40231-y>
- Gazzoni, D. L., & Paz Barateiro, J. V. G. R. (2024). Soybean yield is increased through complementary pollination by honey bees. *Journal of Apicultural Research*, 63(4), 801-812.
- Gazzoni, D. L., Barateiro, J. V. G. R. P., & da Rosa Santos, P. (2024). Supplemental bee pollination effect on the productivity of soybean grown in a low yield potential condition. *Journal of Apicultural Research*, 63(4), 788-800.
- Giannini, T.C., Cordeiro, G.D., Freitas, B.M., Saraiva, A.M., & Imperatriz-Fonseca, V.L. (2015) The Dependence of Crops for Pollinators and the Economic Value of Pollination in Brazil. *Journal Economic Entomology*, 108(3), 1-9 DOI: 10.1093/jee/tov093

- González, E., Landis, D. A., Knapp, M., & Valladares, G. (2020). Forest cover and proximity decrease herbivory and increase crop yield via enhanced natural enemies in soybean fields. *Journal of Applied Ecology*, 57(11), 2296-2306. 10.1111/1365-2664.13732
- Huais, P. Y., Grilli, G., Amarilla, L. D., Torres, C., Fernández, L., & Galetto, L. (2020). Forest fragments influence pollination and yield of soybean crops in Chaco landscapes. *Basic and Applied Ecology*, 48, 61-72.
- IPBES (2016) The Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on Pollinators, Pollination and Food Production. IPBES Secretariat, Bonn, Germany. 10.5281/ZENODO.3402857
- Jiang, Y., Wu, C., Zhang, L., Hu, P., Hou, W., Zu, W., & Han, T. (2011). Long-day effects on the terminal inflorescence development of a photoperiod-sensitive soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] variety. *Plant Science*, 180(3), 504-510. 10.1016/j.plantsci.2010.11.006
- Kearns, C. A., & Inouye, D. W. (1993). Techniques for pollination biologists (pp. xviii+-583).
- Khan, N. A., Githiri, S. M., Benitez, E. R., Abe, J., Kawasaki, S., Hayashi, T., & Takahashi, R. (2008). QTL analysis of cleistogamy in soybean. *Theoretical and Applied Genetics*, 117, 479-487. 10.1007/s00122-008-0792-5
- Klein, A. M., Vaissiere, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313. 10.1098/rspb.2006.3721
- Kremen, C., Williams, N. M., Aizen, M. A., Gemmill-Herren, B., LeBuhn, G., Minckley, R., ... & Ricketts, T. H. (2007). Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology letters*, 10(4), 299-314.
- Levenson, H. K., Sharp, A. E., & Tarpy, D. R. (2022). Evaluating the impact of increased pollinator habitat on bee visitation and yield metrics in soybean crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 331, 107901.
- Lüdecke D, Ben-Shachar M, Patil I, Waggoner P, Makowski D (2021). “performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models.” *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3139. doi:10.21105/joss.03139.
- Mazzei, M. P., Vesprini, J. L., & Galetto, L. (2021). Seminatural habitats and their proximity to the crop enhances canola (*Brassica napus*) pollination and reproductive parameters in Argentina. *Crop Science*, 61(4), 2713-2721. 10.1002/csc2.20450
- Milfont, de O. M., Rocha, E. E. M., Lima, A. O. N., & Freitas, B. M. (2013). Higher soybean production using honeybee and wild pollinators, a sustainable alternative to pesticides and autopollination. *Environmental chemistry letters*, 11, 335-341.
- Monasterolo, M., Musicante, M. L., Valladares, G. R., & Salvo, A. (2015). Soybean crops may benefit from forest pollinators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 217-222.
- Ortiz-Perez, E., Horner, H. T., Hanlin, S. J., & Palmer, R. G. (2006a). Evaluation of insect-mediated seed set among soybean lines segregating for male sterility at the ms6 locus. *Field crops research*, 97(2-3), 353-362. 10.1016/j.fcr.2005.11.007
- Ortiz-Perez, E., Horner, H. T., Hanlin, S. J., & Palmer, R. G. (2006b). Insect-mediated seed-set evaluation of 21 soybean lines segregating for male sterility at 10 different loci. *Euphytica*, 152, 351-360. 10.1007/s10681-006-9222-4
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in ecology & evolution*, 25(6), 345-353.
- Reilly, J. R., Artz, D. R., Biddinger, D., Bobiwash, K., Boyle, N. K., Brittain, C., ... & Winfree, R. (2020). Crop production in the USA is frequently limited by a lack of pollinators. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1931), 20200922.
- RStudio Team. (2015). RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>

- Ricketts, T. H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., Bogdanski, A., ... & Viana, B. F. (2008). Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?. *Ecology letters*, 11(5), 499-515. 10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x
- Santone, A., Mazzei, M. P., Vesprini, J., Torres, C., Amarilla, L. D., & Galetto, L. (2022). Pollination service and soybean yields. *Acta Oecologica*, 116, 103846.
- Santos, E., Mendoza, Y., Vera, M., Carrasco-Letelier, L., Díaz, S., & Invernizzi, C. (2013). Aumento en la producción de semillas de soja (*Glycine max*) empleando abejas melíferas (*Apis mellifera*). *Agrociencia (Uruguay)*, 17(1), 81-90.
- SIIA (2020) Ministerio de Agroindustria, Argentina: Presidencia de La Nación. <https://datos.magyp.gob.ar/dataset?tags=soja> (updated until 2020, with acces 10/7/2024)
- Siopa, C., Carvalheiro, L., Castro, H., Loureiro, J., & Castro, S. (2023). Quantifying crop pollinator dependence values—an updated compilation and discussion on methodological approaches. *Authorea Preprints*. DOI: 10.22541/au.167828466.63884414/v1
- Strelin, M. M., Diggle, P. K., & Aizen, M. A. (2023). Flower heterochrony and crop yield. *Trends in Plant Science*. 28(12), 1360-1369. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.07.013>
- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology letters*, 8(8), 857-874.
- Zuur, A. F., Hilbe, J. M., & Ieno, E. N. (2013) A Beginner's Guide to GLM and GLMM with R: A Frequentist and Bayesian Perspective for Ecologists. Highland Statistics Limited.