

Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los balances de N de maní en Argentina

Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires,

Área Ciencias del Suelo

Francisco Palmero

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Córdoba – 2019

Lugar de trabajo:

Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba

Estación Experimental Agropecuaria INTA Manfredi

Kansas State University, Manhattan, Kansas, EE. UU.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa de la tesis: 21 de noviembre 2023

COMITÉ CONSEJERO

Director

Fernando Salvagiotti

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)

Magíster (Universidad de Buenos Aires)

Doctor (University of Nebraska)

Codirector

Ricardo Javier Haro

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)

Doctor (Universidad de Buenos Aires)

Consejero

Fernando Oscar García

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magíster (Kansas State University)

Doctor (Kansas State University)

JURADO DE TESIS

Jurado

Gustavo N. Ferraris

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Rosario)

Magíster (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Mariana Noemí Quinteros

Bióloga (Universidad Nacional de Córdoba)

Doctora (Universidad Nacional de Córdoba)

Jurado

César Eugenio Quinteros

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Magíster (Universidad de Buenos Aires)

Doctor (Universidad de la Coruña)

AGRADECIMIENTOS

A mi familia toda.

A mis padres, Javier y Mónica, por brindarme la oportunidad de estar recorriendo este camino.

A la cuasi ingeniera Caro, mi compañera de vida, por todo su apoyo y paciencia durante mi formación.

A Ignacio Ciampitti, por sus aportes a este trabajo.

A mi comité consejero, Fernando Salvagiotti, Ricardo Haro y Fernando García, por su tiempo, dedicación y paciencia que brindaron para mi formación.

DEDICATORIA

Para tulipa, chango, buena, vos decís que no, negra.

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en esta tesis es original producto de mi propio trabajo y que a este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.”



Ing. Agr. Francisco Palmero

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Palmero, F., Fernandez, J.A., Garcia, F.O., Haro, R.J., Prasad, P.V.V., Salvagiotti, F., Ciampitti, I.A., 2022. A quantitative review into the contributions of biological nitrogen fixation to agricultural systems by grain legumes. *European Journal of Agronomy*. 136: 126514. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126514>

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los ecosistemas terrestres.....	2
1.2. <i>El proceso de fijación biológica de nitrógeno en cultivos de leguminosas</i>	3
1.3. <i>Fijación biológica de nitrógeno y balance de nitrógeno en las leguminosas de producción de granos</i>	4
1.4. <i>Producción de maní en Argentina y en el mundo</i>	4
1.5. <i>Objetivos</i>	6
1.5.3. <i>Hipótesis</i>	6
CAPÍTULO 2: Revisión cuantitativa de las contribuciones de la fijación biológica de nitrógeno por parte de las leguminosas de producción de granos a los sistemas agrícolas	8
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. METODOLOGÍA	11
2.3. RESULTADOS.....	18
2.4. DISCUSIÓN	30
2.5. CONCLUSIÓN	35
CAPÍTULO 3: Fijación biológica de nitrógeno en maní en Argentina: relación con variables asociadas a la dinámica del nitrógeno en el cultivo	37
3.1. INTRODUCCIÓN	38
3.2. METODOLOGÍA	40
3.3. RESULTADOS.....	51
3.4. DISCUSIÓN	59
3.6. CONCLUSIÓN	64
CAPÍTULO 4: Discusión final.....	66
4.1. Discusión general	67
4.2. Futuras investigaciones	72
5. BIBLIOGRAFÍA	73
6. ANEXO.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Estadísticas descriptivas de las variables en la base de datos meta de leguminosas de grano cultivadas en campo en relación con la biomasa total aérea, el N total aéreo y la contribución de N de la fijación del N como porcentaje del N total aéreo (FBN%) y en términos absolutos (N fijado aéreo). Todas las variables se midieron cerca de la madurez de cada cultivo de leguminosas.	20
Tabla 2. 2. Estadísticas descriptivas de las variables de la base de datos de leguminosas de grano cultivadas a campo en relación con el índice de cosecha de nitrógeno (ICN), la concentración de N total aéreo, la concentración de N del rastrojo y el N del rastrojo.	21
Tabla 2. 3. Estadísticas descriptivas de las variables de la base de datos de las leguminosas de grano cultivadas a campo en relación con el rendimiento en grano (en condiciones secas), el índice de cosecha (IC), la concentración de N en las semillas y balance parcial de N.	22
Tabla 2. 4. Parámetros (n = observaciones, pendiente, intersección, intervalos de confianza (IC ₉₅) y coeficiente de determinación) de regresiones lineales que describen la relación entre el N fijado aéreo (y) y el N total aéreo (x) en diferentes leguminosas.	25
Tabla 2. 5. Parámetros de las regresiones lineales que describen la relación entre el balance parcial de N (PNB, por sus siglas en inglés) y el rendimiento en grano, la concentración de N en grano, el índice de cosecha de N (ICN), la proporción de N proveniente de la FBN (FBN%) y la concentración N del rastrojo. Las regresiones generales y de cada especie se informaron solamente cuando fueron significativas.	28
Tabla 3. 1. Detalles de la ubicación, genotipo, y prácticas de manejo empleadas en cada uno de los ensayos utilizados en para el estudio de la fijación biológica en el cultivo de maní en la provincia de Córdoba, Argentina, en la campaña 2019/2020.	44
Tabla 3. 2. Detalles de la fecha de siembra (FS), temperatura, precipitaciones y variables edáficas en cada uno de los ensayos utilizados en para el estudio de la fijación biológica en el cultivo de maní en la provincia de Córdoba, Argentina, en la campaña 2019/2020.	45
Tabla 3. 3. Estadística descriptiva las variables asociadas a la producción, absorción de N y a la fijación biológica de N en el cultivo de maní en Argentina.	53
Tabla Anexo 1. 1. Parámetros de las regresiones lineales que describen la relación entre el balance parcial de N (PNB, por sus siglas en inglés) y la biomasa total aérea, la biomasa de rastrojo, el índice de cosecha (IC) y el N total aéreo. Las regresiones generales y de cada especie se informaron solamente cuando fueron significativas.	83
Tabla Anexo 1. 2. N del cultivo debajo de la superficie del suelo (N subsuperficial) como porcentaje del N total (parte aérea + raíces), y el promedio del factor raíz de acuerdo a cada método empleado para medir el N y como promedio de todos los métodos. $Factor\ raíz = 1 + \frac{N\ en\ raíces}{N\ total\ aéreo}$. El N total (parte aérea + raíces) se obtiene multiplicando el N total aéreo por el factor raíz.	84
Tabla Anexo 1. 3. Balance de N incluyendo al N del cultivo debajo de la superficie del suelo (N subsuperficial) a través de métodos con N marcado (¹⁵ N), balance de N incluyendo la contribución de N por parte de las raíces medida por recuperación física, y balance de N considerando al N del cultivo debajo de la superficie del suelo como un promedio de los métodos de N marcado (¹⁵ N) y recuperación física.	87

Tabla Anexo 2. 1. Número de estudios, país, especies de leguminosas, año de experimentación, métodos de medición de la FBN, diseño experimental y características para cada experimento de leguminosas que fue incluido en la base de datos.....90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Distribución geográfica de los experimentos realizados en el período 1982-2020 incluidos en esta revisión..... 14

Figura 2. 2. Relación entre el rendimiento en grano (en condiciones secas) y el N total aéreo (A) y el N fijado aéreo (B) considerando todas las leguminosas juntas. La línea sólida en (A) representa el mejor ajuste de los datos a través del método de eje mayor estandarizado con una pendiente de 0,016 Mg de granos kg de N⁻¹ ($r^2 = 0,85$; $n = 889$). La línea sólida en (B) es el mejor ajuste de los datos a través del método de eje mayor estandarizado con una pendiente de 0,024 Mg de granos kg N⁻¹ de N fijado aéreo ($r^2 = 0,77$; $n = 889$). En (A) y (B). las líneas discontinuas muestran las regresiones de los cuantiles 0,95 (superior) y 0,05 (inferior). En los paneles (C) y (D), los círculos muestran las pendientes, y las líneas representan sus respectivos intervalos de confianza del 95 % para las relaciones entre el rendimiento en grano frente al N total aéreo y el rendimiento en grano frente al N fijado aéreo para cada leguminosa. 24

Figura 2. 3. Relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo para las leguminosas incluidas en este estudio abarcando todas las especies (panel A). La línea continua es la línea ajustada para el N fijado aéreo frente al N total aéreo ($y = 0,84x - 31,1$; $r^2 = 0,83$; $n = 889$) y la línea discontinua representa la línea 1:1 en la que todo el N total aéreo derivaría de la FBN. En el panel B, los círculos representan las pendientes de la línea de regresión ajustada individualmente para cada leguminosa en el cuantil 0,95 (es decir, potencial de FBN%), y los triángulos representan las pendientes del cuantil 0,5 ajustadas individualmente para cada leguminosa. En (B), las líneas sólidas (pendientes del cuantil 0,95) y las líneas discontinuas (pendientes del cuantil 0,5) representan los intervalos de confianza del 95% para las pendientes..... 26

Figura 2. 4. En el panel A, se puede ver la distribución de la frecuencia acumulada para el balance parcial de N. El balance parcial de N no considera ninguna contribución de N por parte de las raíces. En el panel B, se puede ver la distribución de la frecuencia acumulada para el balance de N. El balance de N se calculó teniendo en cuenta la contribución de N del cultivo debajo de la superficie del suelo para cada especie. Las contribuciones de N del cultivo debajo de la superficie del suelo se estimaron a través de un promedio de los diferentes métodos (recuperación física y ¹⁵N). 30

Figura 3. 1. Ubicación geográfica de los sitios estudiados en la campaña 2019/2020 en la zona de producción de maní de la provincia de Córdoba. La intensidad del sombreado indica la superficie anual promedio sembrada en cada de departamento entre los años 2011 y 2021 (MAGyP, 2022)..... 42

Figura 3. 2. Relación entre el rendimiento en grano en maní y el N total aéreo (A) y el N fijado aéreo (B) para Argentina (azul) y para la base de datos global (verde). Las líneas sólidas en A representan el mejor ajuste para el set de datos de Argentina (azul; pendiente = 0.015 Mg kg N total aéreo; $R^2 = 0,98$; $n = 19$), y para la base de datos global (verde; pendiente = 0.010 Mg kg N total aéreo; $R^2 = 0,71$; $n = 138$). En A las líneas rayadas muestran el mejor ajuste para los cuantiles 0.95 (superiores) y 0.05 (inferiores) para cada set de datos. Las líneas sólidas en B representan el mejor ajuste para el set de datos de Argentina (azul; pendiente = 0.006 Mg kg N fijado aéreo; $n = 19$), y para la base de datos global (verde; pendiente = 0.012 Mg kg N fijado aéreo; $n = 138$). Los parámetros de las funciones de las líneas sólidas en A y en B fueron estimados mediante *bootstrapping*. Los paneles C y D muestran las distribuciones empíricas

de las diferencias entre las pendientes (líneas sólidas) presentadas en A y en B respectivamente. En C y D las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha).55

Figura 3. 3. Relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo (A) y la biomasa total (B) para el cultivo de maní. La línea sólida en A representa el mejor ajuste promedio para la combinación del set de datos de Argentina y para la base de datos global (pendiente = 0,61 kg N fijado kg N total⁻¹; n=157). En A la línea discontinua es la relación 1:1 (indica que todo el N total aéreo provendría de la FBN). La línea sólida en B representa el mejor ajuste promedio para la combinación del set de datos de Argentina y la base de datos global (pendiente = 14.6 kg N fijado Mg biomasa total⁻¹; n=148). Los parámetros de las funciones de las líneas sólidas en A y en B fueron estimados mediante *bootstrapping*. Los paneles C y D muestran las distribuciones empíricas de las diferencias entre las pendientes ajustadas separadamente para Argentina y para la base de datos global para las relaciones presentadas en A y en B respectivamente. En C y D las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha).57

Figura 3. 4. Relación entre el balance parcial de N y la proporción de N fijada (FBN%) para los datos del presente estudio (A). La línea sólida en A representa el mejor ajuste del set de datos de Argentina (n=19). Los parámetros de la función fueron estimados mediante *bootstrapping*. En B se muestra la distribución empírica del corte con el eje x para el modelo presentado en A. Las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha) (B). En C se muestra la distribución de frecuencia acumulada para el balance parcial de N para el cultivo de maní en Argentina.59

Figura Anexo 3. 1. Rendimiento del cultivo de maní en función de los años para distintos países con mayor adopción de tecnología (Argentina, Australia, Estados Unidos) y con baja adopción de tecnología (Burkina Faso, Gana, India, Kenia, Sud África, Tailandia). La línea punteada marca el rendimiento promedio de Argentina, Australia y Estados Unidos (2968 kg ha⁻¹), y la línea sólida indica el rendimiento promedio de Burkina Faso, Gana, India, Kenia, Sud África, Tailandia (1368 kg ha⁻¹). Burkina Faso, Gana, India, Kenia, Sud África y Tailandia fueron los países considerados en la base de datos de maní presentada en el Capítulo 1 de esta tesis. Los datos para la elaboración de la presente figura fueron tomados de FAOSTAT (2021)(<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>). 103

Figura Anexo 3. 2. Distribución empírica de los valores estimados para las pendientes de la relación entre (A) el rendimiento y el N total aéreo, (B) el rendimiento y el N fijado aéreo, (C) el N fijado aéreo y el N total aéreo, (D) el N fijado aéreo y la biomasa total para la base de datos del maní producido en Argentina (azul) y el maní producido en otros países (verde). En (E), distribución empírica de los valores estimados para las pendientes de relación entre el balance parcial de N y la proporción de N fijada (FBN%) para el cultivo de maní producido en Argentina. En (A), (B), (C), (D) y (E), las líneas rayadas verticales indican los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha) para el maní producido en Argentina, mientras que las líneas verticales sólidas lo indican para el maní producido en otros países. 104

Figura Anexo 3. 3. Distribución empírica de la diferencia de los cortes con el eje x entre los modelos ajustados para el balance parcial de N (y) (sin considerar el aporte de N por raíces) y el balance de N (y) (considerando el aporte de N por raíces) con la proporción de N fijada (FBN%)(x). Las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha). 105

RESUMEN

Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los balances de N de maní en Argentina

Las leguminosas satisfacen una fracción de sus requerimientos de nitrógeno (N) mediante el proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN). Las especies de esta familia desempeñan un papel fundamental en la intensificación sostenible de los sistemas agrícolas, en la mejora de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. El maní (*Arachis hypogaea* L.) es la segunda leguminosa con mayor superficie sembrada en el mundo y en Argentina después de la soja (*Glycine max* L. Merrill). Sin embargo, a pesar de la importancia del maní en Argentina, aún no se ha evaluado la contribución de la FBN de este cultivo a los balances de N de los sistemas de producción de este país. El **objetivo general** de esta tesis fue contextualizar a escala global la contribución de la FBN del maní a la nutrición nitrogenada del cultivo, en relación con otras leguminosas productoras de granos, y cuantificar esta contribución en cultivos de maní en Argentina a escala local. Los **objetivos específicos** fueron los siguientes: Objetivo 1: realizar un análisis de síntesis a escala global sobre la contribución de la FBN y la estimación de los balances de N del maní en relación con otras leguminosas de grano; Objetivo 2: estimar la contribución de la FBN en el cultivo de maní en lotes de producción del centro-sur de Córdoba y su relación con el rendimiento y variables asociadas a la dinámica del N en el cultivo; Objetivo 3: calcular los balances parciales de N y su relación con la FBN en las condiciones descritas anteriormente. Para complementar el Objetivo 1 (Capítulo 2) se realizó un análisis de síntesis en nueve leguminosas de producción de granos incluyendo al maní. La proporción de N fijada (FBN%) por el maní no se diferenció de la del resto de las leguminosas (0,84 kg de N fijado aéreo kg N⁻¹ total aéreo), excepto de la del poroto (0,57 kg de N fijado aéreo kg N⁻¹ total aéreo). Además, el maní, junto con el poroto, mostraron la mayor brecha entre la fijación de N potencial y la actual. Cuando no se incluyó el aporte de N por las raíces y rizodeposiciones, el maní mostró la mayor frecuencia de casos positivos en el balance de N (~90%) (aporte neto de N al sistema). Para alcanzar los Objetivos 2 y 3 (Capítulo 3) se evaluó la FBN en 19 combinaciones de ubicación geográfica x genotipo x práctica de manejo en la

campana 2019-2020 en la provincia de Córdoba, Argentina. El maní mostró una eficiencia en el uso del N de 15 kg granos kg N total aéreo⁻¹. Además, se obtuvo un valor medio de FBN% de 53% (rango intercuartílico 43%—64%) y una eficiencia de FBN de 14,4 kg N t biomasa total⁻¹ (sin incluir raíces). La cantidad media de N fijada fue de 154 kg ha⁻¹ (rango intercuartílico 119 kg ha⁻¹—188 kg ha⁻¹). Los rendimientos en grano obtenidos variaron entre 3290 kg ha⁻¹ y 5930 kg ha⁻¹, con una concentración media de N en granos de 4,45%. Esto condujo a una gran cantidad de N contenida en los granos por lo que se observaron balances de N positivos (ingreso neto de N al suelo) solamente en el 15% de las observaciones. Los resultados del presente proyecto de investigación resumidos en esta tesis aportan nuevos conocimientos con respecto a: (i) la comparación cuantitativa de diferentes especies de leguminosas a escala global en cuanto a su eficiencia en el uso del N y su habilidad de fijar N (FBN%) y el rol que juegan en el mantenimiento de la fertilidad de los suelos en los sistemas de, y (ii) la cuantificación de la eficiencia en el uso del N, de la capacidad de fijar N (FBN) y de los balances de N del cultivo de maní bajo las condiciones particulares de producción de Argentina.

ABSTRACT

Contribution of biological nitrogen fixation to peanut N balances in Argentina

Legumes satisfy a fraction of their nitrogen (N) requirements through the process of biological nitrogen fixation (BNF). Species of this family play a fundamental role in the sustainable intensification of agricultural systems, in the improvement of biodiversity, and ecosystem services. Peanut (*Arachis hypogaea* L.) is the second legume with the largest planted area in the world and in Argentina after soybean (*Glycine max* L. Merrill). However, despite the importance of peanut in Argentina, the contribution of BNF of this crop to the N balances of agricultural systems in this country has not yet been evaluated. The general objective of this thesis was to contextualize on a global scale the contribution of peanut BNF to crop nitrogen nutrition, in relation to other grain-producing legumes, and to quantify this contribution in peanut

crops in Argentina on a local scale. The specific objectives were: Objective 1: to perform a global scale synthesis analysis on the contribution of BNF and the estimation of peanut N balances in relation to other grain legumes; Objective 2: to estimate the contribution of BNF in peanut crop in production fields in south-central Córdoba and its relationship with yield and variables associated with N dynamics in the crop; Objective 3: to calculate the partial N balances and their relationship with the FBN under the conditions described above. To fulfill Objective 1 (Chapter 2), a synthesis analysis was carried out on nine grain-producing legumes including peanut. The proportion of N fixed (FBN%) by peanut did not differ from that of the rest of the legumes (0.84 kg N fixed aerial kg N⁻¹ total aerial), except for common bean (0.57 kg N fixed aerial kg N⁻¹ total aerial). In addition, peanut, along with common bean, showed the largest gap between potential and actual N fixation. When the contribution of N by roots and rhizodepositions was not included, peanut showed the highest frequency of positive cases in the N balance (~90%) (net N input to the system). To achieve Objectives 2 and 3 (Chapter 3), BNF was evaluated in 19 combinations of geographic location x genotype x management practice in the 2019-2020 season in the province of Córdoba, Argentina. Peanut showed an N use efficiency of 15 kg grains kg total aerial N⁻¹. In addition, a mean FBN% value of 53% (interquartile range 43%—64%) and a FBN efficiency of 14.4 kg N t total biomass⁻¹ (excluding roots) were obtained. The mean amount of N fixed was 154 kg ha⁻¹ (interquartile range 119 kg ha⁻¹—188 kg ha⁻¹). Grain yields ranged from 3290 kg ha⁻¹ to 5930 kg ha⁻¹, with a mean grain N concentration of 4.45%. This led to a large amount of N contained in the grains so that positive N balances (net N input to the soil) were observed in only 15% of the observations. The results of the present research project summarized in this thesis provide new knowledge regarding: (i) the quantitative comparison of different legume species on a global scale in terms of their N use efficiency and N-fixing ability (FBN%) and the role they play in maintaining soil fertility in production systems, and (ii) the quantification of N use efficiency, N-fixing ability (FBN) and N balances of the peanut crop under the particular production conditions of Argentina.

CAPÍTULO 1: Introducción

1. CAPÍTULO 1: Introducción

1.1. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los ecosistemas terrestres

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más críticos para la vida en nuestro planeta debido a la importancia que tiene para el crecimiento de las plantas y la producción de alimentos (Hawkesford et al., 2012; Sinclair y Ruffy, 2012). Sin embargo, la mayor parte del N presente en la Tierra (~78%) está como N diatómico (N_2), el cual no está disponible para la mayoría de los organismos vivos debido a la alta estabilidad de su triple enlace. A lo largo de la historia evolutiva de los organismos vivos en nuestro planeta, un pequeño número de especies de bacterias y arqueas desarrollaron la capacidad de convertir el N_2 en N reactivo mediante la presencia de la enzima nitrogenasa (Galloway et al, 2004; Bellenger et al., 2020). Esta habilidad desarrollada por ciertos microorganismos se denomina “fijación biológica de N” (FBN) y es un proceso que afecta el ciclo global del este elemento (Herridge et al., 2008). La FBN puede ser realizada por organismos de vida libre (Reed et al., 2011) o por organismos que forman relaciones simbióticas con vegetales, como es el caso de la relación entre *Rizobium* y Leguminosas (Granhall, 1981). A escala global, la asociación simbiótica entre *Rizobium* y Leguminosas representa entre el 58—66% del N fijado biológicamente por año, mientras que la fijación de N llevada a cabo por microorganismos asociativos y de vida libre representa entre el 34—42% del mismo (Herridge et al., 2008).

En los sistemas agrícolas, las dos principales fuentes de ingreso de N son los fertilizantes que contienen a este nutriente y la FBN (Billen et al., 2014; Angus y Grace, 2017). La principal fuente de ingreso de N a través de la FBN es la asociación simbiótica de cultivos y pasturas de la familia Leguminosas con bacterias del género *Rhizobium* o *Bradyrhizobium* (Herridge et al., 2008). En particular para las especies productoras de granos, Herridge et al. (2022) estimaron un aporte de 35,5 millones de toneladas de N a nivel mundial. En consecuencia, el estudio del aporte de N a través de la FBN en especies de leguminosas es de gran importancia

para conocer la importancia relativa de esta fuente de N en el ciclo de N en los sistemas agrícolas.

1.2. El proceso de fijación biológica de nitrógeno en cultivos de leguminosas

Los eventos de comunicación entre el rizobio y la planta hospedante (leguminosa) comienzan temprano en el ciclo del cultivo. Los procesos de infección y formación de los nódulos implican varios pasos, los más importantes son: en primera instancia la liberación de moléculas de flavonoides por parte de las raíces de la leguminosa hospedante que induce a la expresión de genes de nodulación en el rizobio (genes *nod* y *nol*). Luego, el segundo paso es la síntesis de lipopolisacáridos por parte de la bacteria que inducen reacciones en la planta como la deformación de los pelos radicales, el inicio del meristema del nódulo y, finalmente, la formación del nódulo (Schultze et al., 1994). Luego de una fase *lag*, en la cual el cultivo depende del N del suelo ya que el sistema nodular no está fuertemente desarrollado, comienza una fase con altas tasas de FBN que se prolonga hasta las etapas del llenado de granos (Zapata et al., 1987; Jensen 1987; Imsande, 1989), a partir del cual la tasa de FBN comienza a disminuir (Hansen et al., 1993; Becher et al., 1997).

Parsons et al. (1993) sugirieron que los nódulos radicales de las leguminosas son regulados por un sistema de retroalimentación de N (*N feedback*). Estos autores propusieron que los nódulos radicales son capaces de sensor la concentración de compuestos con N reducido en el floema, lo cual conlleva a que el crecimiento y actividad de los nódulos se ajuste de acuerdo con dicha concentración. Siguiendo este razonamiento, Divito y Sadras (2014) propusieron que un estrés nutricional de P, K o S en los cultivos de leguminosas afectaría la FBN tanto de manera directa, sobre el tamaño, número y actividad de los nódulos, como indirecta, a través del crecimiento de las plantas. Por otro lado, el proceso de la FBN puede ser afectado por numerosos factores ambientales como: el pH y la temperatura del suelo (Alexandre y Oliveira, 2013; Aquino Alves et al., 2021), el contenido de agua en el suelo (Munjonji et al., 2018), la disponibilidad de nutrientes (Divito y Sadras et al., 2014) y el mayor

o menor contenido de N mineral en el suelo (Salvagiotti et al., 2009; Torabian et al., 2019). Al ser la FBN afectada por tantos factores, este proceso es altamente variable cuando se lo estudia en diferentes ambientes de producción (Anglade et al., 2015).

1.3. Fijación biológica de nitrógeno y balance de nitrógeno en las leguminosas de producción de granos

Una forma de evaluar el rol de las leguminosas en los sistemas de producción es a través de la estimación del balance parcial de N, i.e. balance parcial de N = N-FBN – N-grano. Valores positivos o negativos indican si la cantidad de N proveniente de la atmósfera es superior o inferior a la removida del sistema a través de los granos (Blesh y Drinkwater, 2013). Se ha observado una relación positiva entre la proporción de N fijada (FBN%) y el balance de N en leguminosas (Evans et al., 2001; Walley et al., 2007; Ciampitti y Salvagiotti, 2018). En general existen aportes de N al sistema cuando la proporción de la FBN es superior al índice de cosecha de N del cultivo (proporción del N exportado con los granos), que es variable según la leguminosa bajo estudio. Peoples et al. (2009) mostraron que la contribución neta del N fijado a los sistemas agrícolas puede ser escasa. Sin embargo, debido a la variabilidad en la contribución de la FBN en los sistemas de producción, se puede arribar a resultados y conclusiones imprecisas acerca de los aportes de N por parte de la FBN a los sistemas agrícolas cuando dicho estudio se realiza a gran escala (Collino et al., 2015). Por lo tanto, es necesario contar con información a nivel local con respecto a la FBN y a los balances parciales de N con el objetivo de aumentar la precisión de las estimaciones.

1.4. Producción de maní en Argentina y en el mundo

El maní (*Arachis hypogaea* L.) es la segunda leguminosa de mayor producción a nivel mundial después de la soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (FAOSTAT, 2021; Peoples et al., 2021). A nivel mundial en el período 2010–2020 se produjeron ~42 millones de toneladas, con un rendimiento medio de 1619 kg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2021). El maní produce un grano con abundante contenido de aceite (45—50%), proteínas (27—30%) y fibras (Unkovich et al.,

2010a; Sinclair y Vadez, 2012; Suchoszek-Lukaniuk et al., 2011) con múltiples beneficios para la salud humana (Arya et al., 2015; Bonku y Yu, 2019). La comercialización del maní se hace como aceite, harina o pellets, granos salados (como colación), granos azucarados (garrapiñada, turrónes), golosinas (tabletas, barras de chocolate) o como pasta.

Argentina es el séptimo productor y el primer exportador de maní a nivel mundial (FAOSTAT, 2022). En el país, la producción media de maní en los últimos diez años (2011—2021) fue de 145.355 Mg año⁻¹, este valor ubica al maní como el octavo cultivo de mayor producción después de la soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (3.363.575 Mg año⁻¹), el maíz (*Zea mays* L.) (2.742.270 Mg año⁻¹), el trigo (*Triticum aestivum* L.) (1.181.763 Mg año⁻¹), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) (604.232 Mg año⁻¹), el girasol (*Helianthus annuus* L.) (359.077 Mg año⁻¹), el arroz (*Oryza sativa* L.) (290.666 Mg año⁻¹) y el sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (254.120 Mg año⁻¹). Además, se ubica como la segunda leguminosa de mayor producción después de la soja, y es seguido por el poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) (73.176 Mg año⁻¹), la arveja (*Pisum sativum* L.) (40.455 Mg año⁻¹), el garbanzo (*Cicer arietinum* L.) (18.065 Mg año⁻¹) y la lenteja (*Lens culinaris* Medik) (6.161 Mg año⁻¹) (MAGyP, 2022). El complejo agroindustrial manisero argentino posicionó a Argentina entre los tres primeros países con mayores volúmenes y valores de exportación a nivel internacional en el período 2010–2020 (FAOSTAT, 2021). La cadena agroalimentaria del maní se considera una economía regional, ya que el 95% de las industrias elaboradoras se localizan en la región centro-sur de la provincia de Córdoba. Sin embargo, por los volúmenes y valores de exportación, esta cadena cumple un rol fundamental dentro de la matriz productiva nacional. Teniendo en cuenta la composición química del grano de maní y la importancia productiva del cultivo en la región, reviste importancia determinar el rol del maní en la dinámica del N de los sistemas de producción donde está incluido. Bajo ese contexto, es esencial conocer la contribución de la FBN de esta especie e identificar estrategias de manejo que maximicen la contribución de esta fuente de N y aporten a la sustentabilidad ecológica y económica regional y nacional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis fue contextualizar a escala global la contribución de la FBN del maní a la nutrición nitrogenada del cultivo, en relación con otras leguminosas productoras de granos y cuantificar esta contribución en cultivos de maní en Argentina a escala local.

1.5.2. Objetivos específicos

1.5.2.1. Realizar un análisis de síntesis a escala global sobre la contribución de la FBN y la estimación de los balances de N del maní en relación con otras leguminosas de grano. Este objetivo es abordado en el Capítulo 2 de esta tesis.

1.5.2.2. Estimar la contribución de la FBN en el cultivo de maní en lotes de producción del centro-sur de Córdoba y su relación con el rendimiento y variables asociadas a la dinámica del N en el cultivo. Este objetivo y el siguiente son abordados en el Capítulo 3 de esta tesis.

1.5.2.3. Calcular los balances parciales de N y su relación con la FBN% en las condiciones descriptas anteriormente.

1.5.3. Hipótesis

1.5.3.1. A escala global y en términos relativos, los balances parciales de N del maní son menores (en todo el rango de la variable aleatoria balance parcial de N) que en otras leguminosas de grano (excluyendo soja) debido a la alta exportación de N en este cultivo, en mayor medida por un rendimiento superior que por una mayor concentración de N en los granos.

1.5.3.2. Aún en condiciones ambientales que generen un mayor crecimiento del cultivo de maní y una mayor cantidad de N fijado, este aporte no es suficiente para

que los balances de N sean positivos debido a la alta exportación de este nutriente con los granos.

**CAPÍTULO 2: Revisión cuantitativa de las contribuciones de la fijación
biológica de nitrógeno por parte de las leguminosas de producción de granos
a los sistemas agrícolas¹**

¹El contenido de este capítulo fue publicado en Palmero, F., Fernandez, J.A., Garcia, F.O., Haro, R.J., Prasad, P.V.V., Salvagiotti, F., Ciampitti, I.A., 2022. A quantitative review into the contributions of biological nitrogen fixation to agricultural systems by grain legumes. *European Journal of Agronomy*. 136: 126514. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126514>

CAPÍTULO 2. Revisión cuantitativa de las contribuciones de la fijación biológica de nitrógeno por parte de las leguminosas de producción de granos a los sistemas agrícolas

2.1. INTRODUCCIÓN

Las leguminosas desempeñan un papel clave en la intensificación agrícola sostenible, ya que son una fuente de proteína para los seres humanos y el ganado, lo que convierte a esta familia en la segunda más cultivada en todo el mundo después de los cereales (Peoples et al., 2014). Sin embargo, en las últimas cuatro décadas, la superficie cosechada de soja (*Glycine max* L. Merrill) aumentó intensamente en todo el mundo, pasando a sistemas escasamente diversificados que consisten principalmente en rotaciones de cereales y soja (Stagnari et al., 2017; FAOSTAT 2021). Por lo tanto, la introducción de diferentes especies de leguminosas en los sistemas de cultivo es de especial importancia para: i) estabilizar la producción de alimentos en el tiempo (Renard y Tilman, 2019), ii) contribuir con nitrógeno (N) a partir de la fijación biológica de N (FBN) (Peoples et al., 2009; Jensen et al., 2020) y así reducir la huella ambiental de la práctica de fertilización con N (Jensen et al., 2012), iii) ayudar con el control de plagas y enfermedades (Voisin et al., 2014), y iv) mejorar la rentabilidad agrícola (MacWilliam et al., 2014).

La introducción de leguminosas puede aumentar los rendimientos de los cereales y la producción de proteína en los sistemas de producción (Angus et al., 2015; Lui et al., 2020; Guinet et al., 2020). Además de la soja, las principales leguminosas de grano cultivadas, en orden decreciente de superficie mundial cultivada, son las siguientes: maní (*Arachis hypogaea* L.), poroto (*Phaseolus vulgaris* L.), garbanzo (*Cicer arietinum* L.), arveja (*Pisum sativum* L.), caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), lentejas (*Lens culinaris* Medik), habas (*Vicia faba* L.) y lupines (*Lupinus* spp.) (FAOSTAT, 2021). En las últimas cinco décadas, el área cosechada de algunas leguminosas en regiones, como Canadá y Australia, ha aumentado, pero ha disminuido en otras como, la Unión Europea (Zander et al., 2016; FAOSTAT, 2021). Se conoce

la capacidad de las leguminosas para establecer asociaciones simbióticas con bacterias del género *Rhizobium* fijadoras de N₂, lo cual contribuye a la disponibilidad de N en el suelo a través del proceso de FBN (Zhang et al., 2020). En estudios anteriores centrados en el estudio del balance parcial de N en las leguminosas, definido como la contribución neta de N fijado (es decir, entradas de N) en comparación con la extracción por parte de los granos (es decir, salidas de N), se han informado aportes bajos de N o incluso negativos en experimentos en condiciones de campo (Kelm et al., 2008; Anglade et al., 2015; Ciampitti y Salvagiotti, 2018). Reciente revisiones mundiales de leguminosas (Cernay et al., 2016; Peoples et al., 2021) presentaron estimaciones extensas de la proporción de N proveniente de la atmósfera (FBN%) y otros atributos de los cultivos de esta familia. Sin embargo, es necesario el estudio adicional de la contribución neta del N fijado a los suelos. El balance parcial de N no considera otras entradas de N, como el N contenido en las raíces y los rizodeposiciones. Esto resulta en una subestimación de la contribución neta de N fijado por parte de las leguminosas (Crews y Peoples, 2005; Unkovich et al., 2010b; Carranca et al., 2015). Por lo tanto, el balance parcial de N merece mayor atención para entender el papel de las leguminosas en los sistemas agrícolas.

El proceso general de la FBN depende de numerosos factores ambientales que afectan la formación de nódulos, el metabolismo bacteriano (Santachiara et al., 2019) y el crecimiento de las plantas (Slattery et al., 2001; Aranjuelo et al., 2014). Además, la FBN también se ve afectada por el pH del suelo (Aquino Alves et al., 2021), la temperatura del suelo (Alexandre y Oliveira, 2013), la disponibilidad de nutrientes (Divito y Sadras, 2014), el contenido de agua del suelo (Munjonji et al., 2018) y la cantidad de N mineral en el suelo (Torabian et al., 2019). Por lo tanto, cuando se estudia el proceso de fijación de N bajo una amplia gama de condiciones climáticas y edáficas, la FBN% es altamente variable (Evans et al., 2001, Walley et al., 2007, Anglade et al., 2015). Muchos estudios de revisión abordaron la contribución relativa de la FBN al N total aéreo en las leguminosas (Unkovich y Pate, 2000; van Kessel y Hartley, 2000; Evans et al., 2001; Hardarson y Atkins, 2003; Walley et al., 2007; Herridge et

al., 2008; Peoples et al., 2009; Unkovich et al., 2010b; Liu et al., 2011; Anglade et al., 2015; Cernay et al., 2016; Jensen et al., 2020; Rodríguez et al., 2020; Peoples et al., 2021). Sin embargo, es necesario dilucidar si las especies de leguminosas de producción de granos difieren estadísticamente en su FBN%, esta última obtenida de la pendiente de la relación entre el N fijado y el N total considerando la fracción aérea de la planta.

Siguiendo esta lógica, se realizó un análisis de síntesis cuantitativo para contextualizar, a escala global, la contribución de la FBN y la estimación de los balances de N del maní en relación con otras leguminosas de grano sin considerar a la soja. Para esto, se plantearon los siguientes objetivos:

2.1.1. Objetivos

- i) Cuantificar el aporte de N a través de la FBN y variables asociadas a la dinámica del N en leguminosas de grano.
- ii) Estimar los balances parciales de N en estas leguminosas.

2.1.2. Hipótesis

A escala global y en términos relativos, los balances parciales de N del maní son menores (en todo el rango de la variable aleatoria balance parcial de N) que en otras leguminosas de grano (excluyendo soja) debido a la alta exportación de N en este cultivo en mayor medida por un rendimiento superior que por una mayor concentración de N en los granos.

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1. Recolección de datos

Los datos se recogieron de artículos publicados revisados por pares sobre la FBN en garbanzo, poroto, caupí, haba, arveja, maní, lenteja y lupino. Los artículos fueron recuperados de Scopus®, Science Direct®, Springer Link® y Google Scholar® utilizando las siguientes

palabras clave: “yield”, “nitrogen fixation”, “N fixation”, “nitrogen from the atmosphere”, “Ndfa”, “nitrogen uptake”, “N uptake”, “seed nitrogen”, “nitrogen harvest index”, “NHI”, además de los nombres de los cultivos. El 31 de diciembre de 2020 fue seleccionado como la fecha límite, tras la cual ya no se realizaron búsquedas de bibliografía. No hubo una fecha de corte inicial.

Inicialmente, como requisito principal para la selección de artículos, los estudios tenían que incluir experimentos realizados en condiciones de campo e informar los valores de rendimiento en grano, de N total aéreo y de la FBN (FBN% o N fijado en kg ha^{-1}) como variables mínimas requeridas. Se recolectó un total de 134 artículos que luego se examinaron con base en los siguientes criterios para la inclusión de los valores con el fin de preservar la calidad de nuestra base de datos: i) los cultivos no tenían que haber sido afectados por un estrés severo (sequía, heladas, malezas, enfermedades, insectos, inundaciones, etc.); ii) puesto que la mayoría de los trabajos no informan la FBN para las raíces, se excluyeron aquellos artículos que informaban cualquier contribución de las raíces dentro del N total de las plantas (N de las raíces + N aéreo). Esto significa que no se incluyeron los artículos en los que no fue posible separar el N fijado en la raíz y el resto de la planta; iii) los estudios debían informar las variables mínimas requeridas cercanas a la madurez de cada cultivo para evitar valores que no sean biológicamente posibles como un índice de cosecha (IC) o un índice de cosecha de N (ICN) superiores a 100 %. Además, para evitar el sesgo en las estimaciones del balance parcial de N; iv) no se incluyeron artículos cuando los investigadores experimentaron con dosis altas de fertilizantes nitrogenados y fechas extremas (no frecuentes) de siembra, que afectaron gravemente el rendimiento de los cultivos; v) los datos recopilados de cada publicación fueron cuidadosamente inspeccionados y recalculados para asegurar la coherencia. Como resultado, cuando la FBN% (calculada como $[\text{N fijado aéreo (kg ha}^{-1})/\text{N total aéreo (kg ha}^{-1})] \times 100$) era superior al 100%, y cuando el N fijado aéreo (kg N ha^{-1}) no era igual al producto entre la FBN% y el N total aéreo, no se incluyeron estos artículos. Finalmente, vi) se incluyeron los estudios que estimaban la FBN% mediante dilución isotópica de ^{15}N , abundancia natural de ^{15}N , diferencia de N y ureido (solute de N). Los estudios que cuantificaron la FBN% mediante la

reducción de acetileno (ARA, por su sigla en inglés) no se incluyeron en el análisis porque este método no es lo suficientemente fiable para estimar la FBN% en condiciones de campo (Herridge et al., 2008; Unkovich et al., 2008).

Se incluyeron a la base de datos final un total de 83 artículos (n = 889 puntos de datos), publicados entre 1982 y 2020, los cuales abarcaron una amplia gama de suelos, condiciones climáticas, genotipos y prácticas de manejo de cultivos. Entre los países representados en la base de datos se encontraron Canadá (n = 226), Australia (n = 136), Ghana (n = 129), Estados Unidos (n = 42), Irán (n = 36), España (n = 30), Francia (n = 28), Nigeria (n = 23), Etiopía (n = 22), Perú (n = 22), Kenia (n = 18), Siria (n = 17), Portugal (n = 16), Austria (n = 14), Dinamarca (n = 14), Jordania (n = 12), Tailandia (n = 12), Pakistán (n = 11), Alemania (n=10), India (n = 9), Chile (n = 8), Italia (n = 8), Burkina Faso (n = 7), Brasil (n = 11), Nueva Zelanda (n = 7), Nepal (n = 6), Reino Unido (n = 3), Tanzania (n = 4), Sudáfrica (n = 3), Zimbabue (n = 3), Argentina (n = 1), y Polonia (n = 1). (Figura 2.1; Tabla Anexo 2.1).

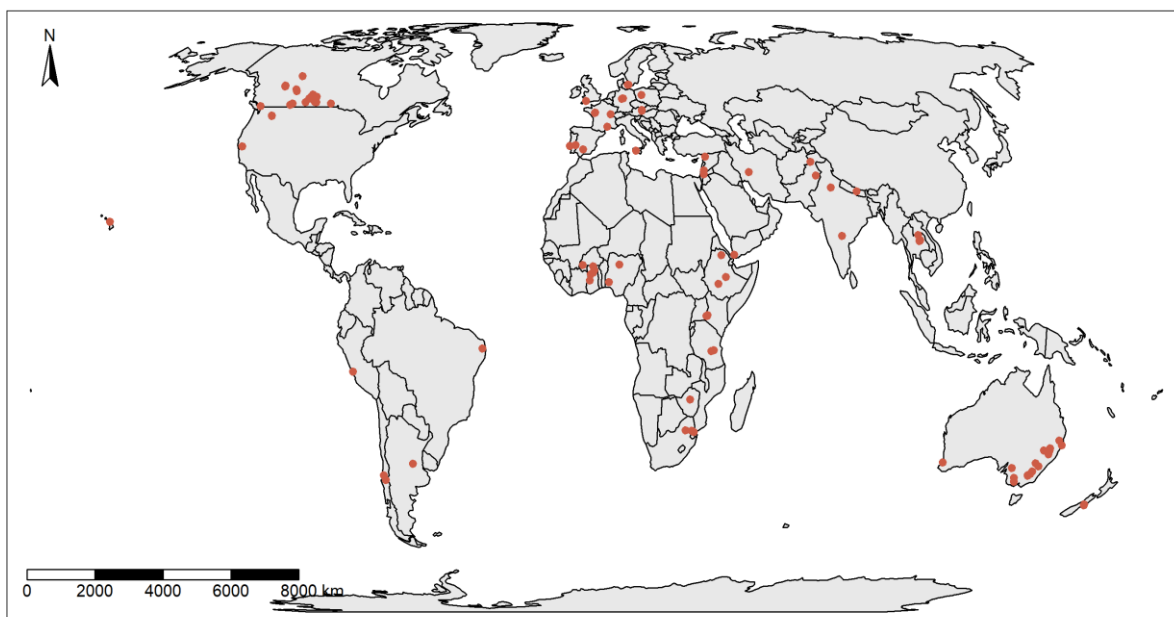


Figura 2. 1. Distribución geográfica de los experimentos realizados en el período 1982-2020 incluidos en esta revisión.

2.2.2. Descripción de la base de datos

Las variables recogidas de cada artículo fueron la biomasa vegetal aérea total ($t\ ha^{-1}$), el N aéreo total en la biomasa ($kg\ ha^{-1}$), la FBN%, el N fijado aéreo ($kg\ ha^{-1}$), el rendimiento en grano ($t\ ha^{-1}$; de ahora en más denominado “rendimiento”) y el N en grano ($kg\ ha^{-1}$). Si el rendimiento se informó con un contenido constante de humedad de la semilla, esos valores se ajustaron a base seca. Así, tanto el rendimiento en grano como la biomasa aérea total se expresaron en condiciones de materia seca. La biomasa total aérea, el N total aéreo y el N fijado aéreo se determinaron cerca de la madurez fisiológica. Estos términos excluyen cualquier contribución por parte de las raíces. El maní tiene las vainas y los granos por debajo de la superficie del suelo. Sin embargo, en el maní, los términos “biomasa total aérea”, “N total aéreo” y “N fijado aéreo” incluyen la biomasa y el contenido de N en el tallo, las hojas, las vainas y los granos. La mayoría de los datos se obtuvieron de tablas, y una pequeña proporción de figuras digitalizadas utilizando WebPlotDigitizer (Versión 4.3, Rohatgi, 2020). Cuando no se informó el N total aéreo, se calculó este valor de la siguiente manera:

$$N\ total\ aéreo\ (kg\ ha^{-1}) = biomasa\ total\ (kg\ ha^{-1}) \times \left(\frac{Concentración\ de\ N\ total\ (\%)}{100} \right) \quad (1)$$

Asimismo, cuando no se informó en el artículo original, el N fijado aéreo se calculó de la siguiente manera:

$$N \text{ fijado aéreo (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{FBN_{\%}}{100}\right) \times N \text{ total aéreo (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Además, el contenido de N del rastrojo, la concentración de N del rastrojo y la concentración de N de la semilla se calcularon de acuerdo con las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{Contenido de N en rastrojo (kg ha}^{-1}\text{)} &= N \text{ aéreo total (kg ha}^{-1}\text{)} - \\ N \text{ en granos (kg ha}^{-1}\text{)} & \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Contenido de N en rastrojo (\%)} &= \\ \left(\frac{\text{Contenido de N en rastrojo (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Biomasa total (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{Rendimiento en grano (kg ha}^{-1}\text{)}}\right) \times 100 & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Concentración de N granos (\%)} &= \\ \left(\frac{\text{Contenido de N en granos (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Rendimiento en grano (kg ha}^{-1}\text{)}}\right) \times 100 & \end{aligned} \quad (5)$$

También se calculó el índice de cosecha de N (ICN) (eq. 6), el índice de cosecha (IC) (eq. 7), y balance parcial de N (eq. 8):

$$ICN (\%) = \left(\frac{\text{Contenido de N en granos (kg ha}^{-1}\text{)}}{N \text{ total aéreo (kg ha}^{-1}\text{)}}\right) \times 100 \quad (6)$$

$$IC (\%) = \left(\frac{\text{Rendimiento en grano (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Biomasa total (kg ha}^{-1}\text{)}}\right) \times 100 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Balance parcial de N (kg ha}^{-1}\text{)} &= N \text{ fijado aéreo (kg ha}^{-1}\text{)} - \\ \text{Contenido de N en granos (kg ha}^{-1}\text{)} & \end{aligned} \quad (8)$$

Un valor positivo del balance parcial de N (eq. 8) indica una entrada neta de N al suelo, mientras que un valor negativo implica que el N fijado aéreo no compensa la salida de N del sistema en los granos.

2.2.3. Contribución de N del cultivo por debajo de la superficie del suelo

La mayoría de los datos publicados acerca de la FBN en las leguminosas no indican la cantidad de N fijada ni la FBN% en las raíces. Esto resulta en la subestimación del papel de las leguminosas en la contribución general de la fertilidad de N del suelo en los sistemas agrícolas (Carranca et al., 2015). La fracción de N del cultivo debajo de la superficie del suelo representa tanto el contenido de N de la raíz como en las rizodeposiciones. Existen dos métodos principales para medir el N del cultivo debajo de la superficie del suelo: i) recuperación física y ii) N marcado (isótopo ^{15}N). Este último presenta seis técnicas diferentes (Fustec et al, 2010). El método de recuperación física tiende a subestimar el N del cultivo debajo de la superficie del suelo, ya que no considera a las rizodeposiciones de N y resulta difícil la recuperación de raíces delgadas y frágiles. Como un intento por evaluar el impacto de la fracción de N del cultivo debajo de la superficie del suelo en la contribución neta de N fijado al sistema, se recopilaron datos de la bibliografía tanto de estudios en invernadero como a campo. Los datos fueron recogidos a partir de estudios que utilizaron métodos de recuperación física y de ^{15}N (Tabla Anexo 1.1). Para volver a calcular el balance de N, se desarrolló un factor raíz de la siguiente manera:

$$\text{Factor raíz} = 1 + \left(\frac{N \text{ en raíces}}{N \text{ total aéreo}} \right) \quad (9)$$

En la ecuación 9, el N total aéreo y N en raíces son las proporciones de N sobre y debajo del suelo como porcentaje del N total de la planta. Este factor raíz se calculó para cada especie y se dividió por los dos métodos principales para medir el N del cultivo debajo de la superficie del suelo y para el promedio entre ellas (Tabla Anexo 1.2). A continuación, se asumieron los mismos valores de FBN% tanto en los tejidos por encima y por debajo del suelo para cada especie y se calculó de nuevo el N fijado total de la siguiente manera:

$$N \text{ fijado total } (kg \text{ ha}^{-1}) = N \text{ total aéreo } (kg \text{ ha}^{-1}) \times \left(\frac{FBN\%}{100} \right) \times \text{Factor raíz} \quad (10)$$

Por último, los balances de N nuevos fueron calculados para cada especie sustituyendo el N fijado aéreo por el N fijado total (considerando las fracciones tanto por encima como por debajo del suelo) en la ecuación 8.

2.2.4. Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos de la base de datos se realizaron utilizando el software R (R Core Team, 2020). Se utilizó una estadística descriptiva para caracterizar cada conjunto de datos (leguminosas) a través de la cantidad de observaciones (n), la media, la desviación estándar (DE), el mínimo (Mín.), el máximo (Máx.), la mediana y los cuantiles 25%-75% (25%-75%Q) para todas las variables estudiadas. Dado que no todos los estudios informaron todas las variables, la cantidad de casos para cada variable fue diferente.

Las relaciones entre las variables se evaluaron utilizando regresiones lineales de tipo II (eje mayor estandarizado; SMA) para explicar los errores en los ejes x e y . La significancia del modelo de regresión lineal se probó primero para todas las leguminosas juntas, y luego individualmente para cada leguminosa (nivel de significancia, $\alpha = 0,05$). Cuando fueron significativas, se determinaron las pendientes y sus intervalos de confianza, y se realizó una prueba de pendiente común entre las leguminosas ($\alpha = 0,05$) con el paquete *smatr* (Warton et al., 2012). El uso de ANOVA para comparar las medias entre varios niveles de un determinado factor aumenta la probabilidad de cometer un error de tipo II (β), ya que se necesita la estimación de una gran cantidad de parámetros en el modelo (Cottingham et al., 2005). En esta tesis, realizamos pruebas de pendientes en común mediante comparaciones entre modelos SMA para cada nivel del factor especie. Este análisis utiliza la razón de verosimilitud con la corrección de Barlett como estadístico para probar la hipótesis nula usando la distribución chi-cuadrado (Warton y Weber, 2002). Cuando se realizan pruebas de pendiente en común, Warton et al. (2006) demostró que la prueba de razón de verosimilitud fue útil para controlar la probabilidad de error de tipo I (α), incluso para muestras pequeñas y desbalanceadas. Es necesario tener precaución en las revisiones sistemáticas y los meta análisis con respecto a la inclusión de estudios que poseen muestras pequeñas (Lin et al., 2018). En este caso, debido a la baja cantidad de observaciones de algunos estudios, se

excluyeron los efectos aleatorios de las prácticas agronómicas y las condiciones ambientales y edáficas para evitar el sobre ajuste de los parámetros.

Los modelos de rendimiento en función del N total aéreo fueron forzados a cero para estudiar las diferencias entre pendientes (Salvagiotti et al., 2021). Las relaciones entre el rendimiento y el N total aéreo y entre el rendimiento y el N fijado aéreo se describieron mediante líneas de frontera que retratan los límites máximo y mínimo (líneas de regresión para los cuantiles 0,95 y 0,05, respectivamente) utilizando el paquete *quantreg* (Koenker, 2021). Las regresiones de cuantiles permiten el estudio de diferentes partes de la distribución de la variable dependiente y la extracción de conclusiones que no se pueden alcanzar cuando se utilizan otros métodos de regresión (Cade y Noon, 2003). La pendiente de la línea de regresión del cuantil 0,95 de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo se consideró como el potencial de la FBN% (es decir, el límite superior de la FBN%). La regresión del cuantil 0,5 representó la media actual de la FBN%, y la diferencia entre las pendientes de los cuantiles 0,95 y 0,5 se definió como la brecha de la FBN%. Este análisis se realizó para cada legumbre por separado, y se calcularon los intervalos de confianza.

La pendiente entre N fijado y el N total para la fracción aérea de la planta puede ser interpretada biológicamente como la FBN% ($FBN_{\%} = \left(\frac{N \text{ fijado aéreo (kg ha}^{-1}\text{)}}{N \text{ total aéreo (kg ha}^{-1}\text{)}} \right) \times 100$). Sin embargo, se requiere cierta precaución al interpretar los valores de la pendiente de SMA y de las regresiones de cuantiles, ya que se estiman de manera distinta a la media o mediana de la FBN% (Koenker y Basset, 1978; Koenker y D'Orey, 1987; Warton et al., 2006).

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas en leguminosas

La FBN presentó un amplio rango de valores, de 0% a 96% entre todas las leguminosas (Tabla 2.1). Las habas y el lupino blanco alcanzaron la media más alta de FBN% (~74%), seguido por el lupino azul, el caupí, la arveja, el maní y la lenteja (57% en promedio). Por el

contrario, el garbanzo y el poroto mostraron una mediana de $FBN_{\%} < 45\%$. En términos absolutos, el lupino blanco tuvo el valor medio más alto de N fijado aéreo (198 kg ha^{-1}) (Tabla 2.1). Las especies presentaron diferencias sutiles en su concentración de N total aéreo, con un promedio de 2,45% (Tabla 2.2). Sin embargo, la concentración de N en el rastrojo en el lupino blanco triplicó a la obtenida para el caupí, y se observó una diferencia de 2,10% entre la máxima (lupino blanco) y la mínima (garbanzo) concentración de N en los granos (Tablas 2.2 y 2.3). La arveja, el lupino blanco y las habas mostraron rendimientos medios superiores a 2 Mg ha^{-1} . Por el contrario, el caupí y el maní mostraron los valores más bajos (Tabla 2.3). Aunque algunos de estos valores de rendimiento fueron extremadamente bajos, los informes que incluían estos datos no brindaron aclaraciones sobre las principales causas detrás de estos valores, por lo cual no se eliminaron del conjunto de datos de este análisis. Tanto el IC como el ICN mostraron valores similares entre las especies (en promedio 37% y 63%, respectivamente), excepto el maní, que presentó los valores más bajos y más variables para ambos índices (Tablas 2.2 y 2.3).

Tabla 2. 1. Estadísticas descriptivas de las variables en la base de datos meta de leguminosas de grano cultivadas en campo en relación con la biomasa total aérea, el N total aéreo y la contribución de N de la fijación del N como porcentaje del N total aéreo (FBN%) y en términos absolutos (N fijado aéreo). Todas las variables se midieron cerca de la madurez de cada cultivo de leguminosas.

Especie	Biomasa total aérea (Mg ha ⁻¹)					N total aéreo (kg N ha ⁻¹)					FBN% ^a					N fijado aéreo (kg N ha ⁻¹)				
	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx
Lupino azul	20	5,81 2,26	1,98	5,69 3,07-7,40	10,87	30	181 80	48	173 138-231	316	30	54 19,8	15	56 38-67	87	30	108 73,1	11	103 54-131	260
Garbanzo	65	3,29 1,84	1,02	2,87 2,00-3,90	10,60	77	77 41,1	21	66 47-108	194	77	44 25,9	0	43 22-62	90	77	36 31,7	0	24 14-44	125
Poroto	45	3,82 1,58	2,00	3,20 2,70-4,32	8,88	90	103 47,4	14	101 70-144	207	90	41 11,5	1	41 35-49	66	90	44 27,3	0,8	38 24-63	123
Caupí	64	3,53 2,09	0,95	2,55 2,19-4,70	10,20	81	89 48,6	18	76 60-97	266	81	61 14,5	28	58 54-71	89	81	56 37,6	10	43 34-68	206
Haba	134	6,28 2,52	0,80	6,94 4,20-8,07	11,64	141	167 84,7	22	156 104-224	388	141	71 16,4	18	73 64-82	96	141	122 72,6	12	106 64-165	361
Arveja	128	6,47 3,33	1,20	6,19 3,59-8,69	17,05	169	146 70,6	32	133 99-186	433	169	56 20,7	6	60 44-70	91	169	87 59,6	4	75 38-121	256
Maní	129	5,08 1,79	0,86	4,98 3,82-5,97	10,17	138	132 53,7	20	126 102-152	291	138	52 17,4	10	54 41-63	92	138	71 43,2	10	63 40-96	203
Lenteja	144	4,42 2,01	1,63	4,37 2,37-6,0	9,20	151	97 49,3	29	94 49-131	237	151	49 27,0	0	56 29-72	89	151	53 42,4	0	47 17-75	192
Lupino blanco	12	10,19 2,33	6,58	9,99 8,22-11,06	15,44	12	263 43,2	160	262 243-279	345	12	70 9,1	45	74 61-77	79	12	185 44,2	97	198 147-204	247

^a La contribución de N de la fijación del N como porcentaje del N total aéreo (FBN%) no incluye ninguna contribución por parte de las raíces.

Tabla 2. 2. Estadísticas descriptivas de las variables de la base de datos de leguminosas de grano cultivadas a campo en relación con el índice de cosecha de nitrógeno (ICN), la concentración de N total aéreo, la concentración de N del rastrojo y el N del rastrojo.

Especie	ICN (%)					Concentración de N total aéreo (%)					Concentración de N de rastrojo (%) ^a					N de rastrojo (kg N ha ⁻¹) ^a				
	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy
Lupino azul	18	53 21,1	11	49 37-69	90	20	2,61 0,48	1,85	2,72 2,24-2,85	3,96	8	1,45 0,92	0,35	1,09 0,44-1,80	3,58	18	97 55,2	14	92 39-150	186
Garbanzo	39	67 19,7	12	73 59-83	88	65	2,15 0,40	0,63	2,24 1,87-2,38	3,23	39	1,08 0,54	0,43	0,87 0,69-1,40	2,63	39	25 22,1	3	19 12-28	99
Poroto	26	61 24,1	17	69 41-82	94	45	2,34 0,40	0,72	2,40 2,19-2,59	2,96	17	1,12 0,78	0,15	0,86 0,49-1,62	2,75	26	27 23,5	4	19 10-48	87
Caupí	38	51 13,5	14	53 43-63	69	64	2,83 0,97	1,52	2,57 2,30-2,93	6,46	29	1,92 0,90	0,85	1,75 1,59-2,00	4,33	38	54 34,2	15	44 27-63	143
Haba	80	64 13,7	17	65 55-76	85	134	2,58 0,54	1,44	2,54 2,27-2,85	4,00	76	1,61 0,75	0,63	1,36 1,06-1,96	3,49	80	65 43,1	17	52 35-71	179
Arveja	104	65 16,7	14	70 54-78	88	128	2,29 0,62	1,12	2,36 1,94-2,71	4,62	96	1,53 0,75	0,40	1,30 1,02-2,07	4,96	104	53 52,0	7	40 19-59	373
Maní	24	38 15,9	14	38 20-47	67	129	2,62 0,46	0,61	2,59 2,41-2,90	3,70	15	1,82 0,40	1,36	1,67 1,39-2,18	2,50	24	86 46,4	9	90 55-113	177
Lenteja	69	64 16,5	19	66 58-74	98	144	2,26 0,37	1,38	2,27 1,98-2,48	3,39	62	1,23 0,50	0,10	1,22 0,94-1,52	3,28	69	40 26,6	2	33 22-51	128
Lupino blanco	12	86 7,3	65	88 85-90	92	12	2,70 0,48	2,23	2,49 2,41-2,73	3,88	12	0,60 0,21	0,34	0,54 0,47-66	1,16	12	35 14,5	19	32 25-35	71

^a La concentración de N del rastrojo y un contenido de N de rastrojo no representan ninguna contribución por parte de las raíces.

Tabla 2. 3. Estadísticas descriptivas de las variables de la base de datos de las leguminosas de grano cultivadas a campo en relación con el rendimiento en grano (en condiciones secas), el índice de cosecha (IC), la concentración de N en las semillas y balance parcial de N.

Especie	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)					IC (%)					Concentración de N en semillas (%)					Balance parcial de N (kg N ha ⁻¹)				
	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy	n	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máy
Lupino azul	30	2,1 1,25	0,16	1,89 1,13-2,98	4,9	20	35 12,3	8	39 14-45	53	18	4,74 0,85	3,16	4,78 4,60-4,91	6,76	18	24 67	-61	22 -45 – 74	138
Garbanzo	77	1,50 0,72	0,11	1,45 0,89-2,01	3,64	65	43 12,4	9	45 36-51	63	39	3,27 0,64	2,23	3,30 2,72-3,64	4,60	39	-16 27,5	-75	-19 -34 – 0,6	59
Poroto	90	1,82 0,99	0,27	1,73 1,00-2,59	4,7	45	38 13,2	11	42 32-46	68	26	3,69 0,94	1,03	3,66 3,44-4,11	6,44	26	-13 30,9	-79	-6 -37 – 2	34
Caupí	81	1,25 0,69	0,38	0,97 0,77-1,41	3,34	64	38 12,4	14	36 29-45	78	38	3,51 0,59	2,21	3,37 3,27-3,61	4,83	38	14 29,4	-38	7 -4 – 29	92
Haba	141	2,45 1,25	0,18	2,12 1,60-3,49	5,3	134	38 11,3	11	36 26-47	61	80	4,17 0,70	2,45	4,39 3,73-4,59	6,12	80	17 41,7	-115	13 -4 – 39	157
Arveja	169	2,89 1,42	0,13	2,80 1,86-3,86	7,40	128	41 13,8	11	40 32-46	79	104	3,60 0,59	2,13	3,54 3,26-4,07	4,6	104	1,3 46,3	-88	-7 -22 – 14	193
Maní	138	1,10 0,80	0,04	0,85 0,42-1,70	3,2	129	21 12,7	1	19 12-27	53	24	4,54 0,78	3,37	4,61 3,71-5,13	5,88	24	36 31,7	-8	29 7 – 53	111
Lenteja	151	1,54 0,80	0,09	1,44 0,86-2,01	4,15	144	36 9,9	2	39 29-43	56	69	4,04 0,36	2,54	4,07 3,88-4,28	4,7	69	5 23,5	-75	6 -5 – 18	69
Lupino blanco	12	4,24 0,87	1,83	4,42 3,99-4,80	5,05	12	42 6,7	28	44 37-47	51	12	5,41 0,32	4,59	5,40 5,28-5,53	4,90	12	-43 26,0	-98	-33 -54 – -27	-8

2.3.2. Relaciones entre el rendimiento en grano, el N total aéreo y el N fijado aéreo

El rendimiento y el N total aéreo se relacionaron linealmente cuando se consideraron todas las leguminosas juntas ($r^2 = 0,85$), con una pendiente media de 16 kg de rendimiento kg N^{-1} total aéreo (Figura 2.2.A). La inversa de la pendiente ($\times 1000$) indica el requisito de N (kg ha^{-1}) para producir 1 Mg de rendimiento en grano. Los límites superiores (cuantil 0,95) e inferior (cuantil 0,05) de esta relación fueron 26 kg y 4 kg de rendimiento kg N^{-1} , respectivamente (Figura 2.2.A). La línea del límite superior es indicativa del N total aéreo como principal factor limitante para el rendimiento, mientras que la línea del límite inferior corresponde a aquellas circunstancias en las que el rendimiento está limitado por factores ajenos al N total aéreo. La prueba de pendiente común mostró que la relación entre el rendimiento y el N total aéreo fue diferente entre las leguminosas ($p < 0,05$). La mayor demanda de N por unidad de rendimiento se observó en el maní, con un requerimiento de $10 \text{ kg N total aéreo}^{-1}$ (Figura 2.2.C).

La pendiente de la relación entre el rendimiento y el N fijado aéreo promedió 24 kg de rendimiento kg de N^{-1} fijado aéreo ($r^2 = 0,77$, $n = 889$). La pendiente de las líneas del límite superior e inferior fue de 56 kg y 8 kg de rendimiento $\text{kg N fijado aéreo}^{-1}$, respectivamente (Figura 2.2.B). Además, la prueba de pendiente común mostró que la relación entre el rendimiento y el N fijado aéreo difirió entre las leguminosas ($p < 0,05$) (Figura 2.2.D). La pendiente para el poroto fue el doble de la de todas las otras especies (en promedio), la cual se diferenció estadísticamente del resto. Por lo tanto, el poroto mostró la menor dependencia en la FBN para satisfacer su demanda de N (Figura 2.2.D).

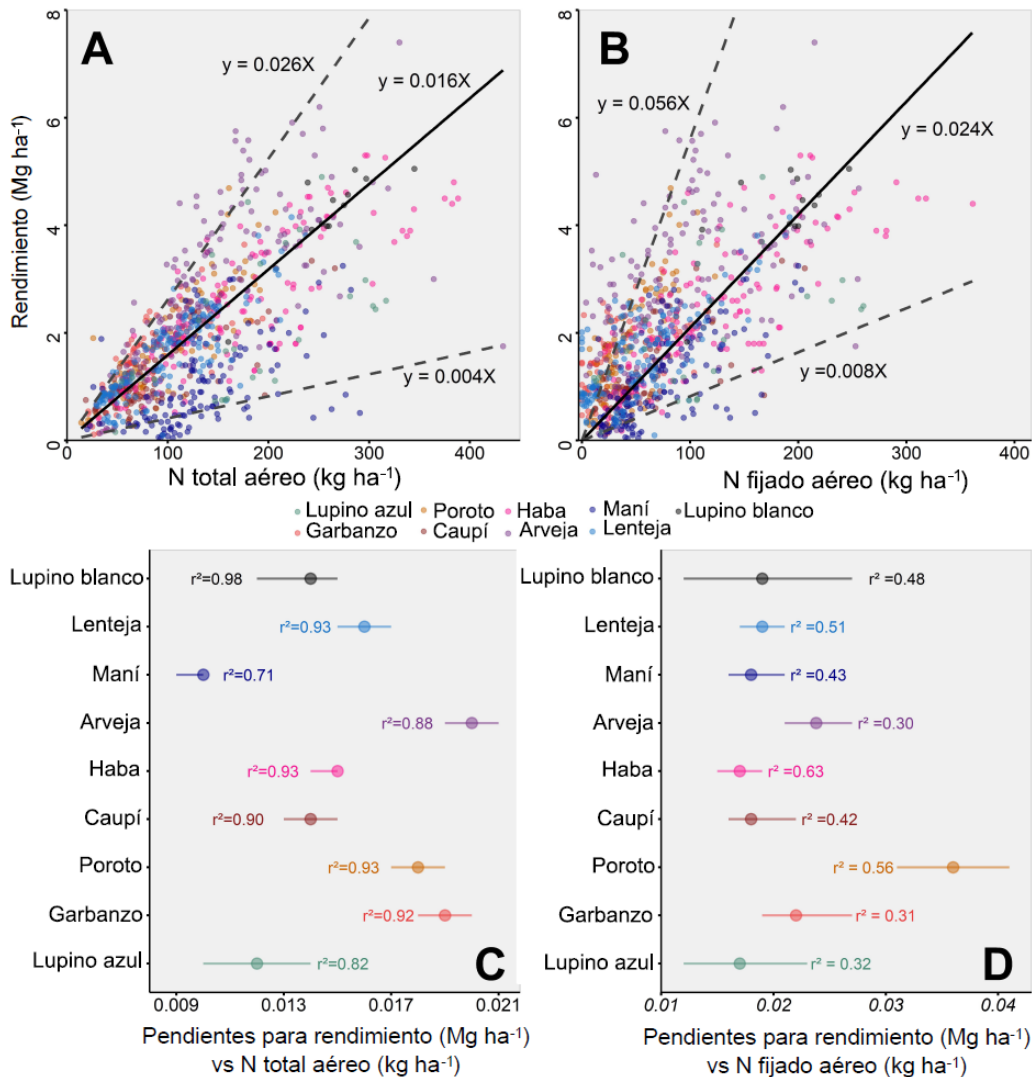


Figura 2. 2. Relación entre el rendimiento en grano (en condiciones secas) y el N total aéreo (A) y el N fijado aéreo (B) considerando todas las leguminosas juntas. La línea sólida en (A) representa el mejor ajuste de los datos a través del método de eje mayor estandarizado con una pendiente de 0,016 Mg de granos kg de N⁻¹ ($r^2 = 0,85$; $n = 889$). La línea sólida en (B) es el mejor ajuste de los datos a través del método de eje mayor estandarizado con una pendiente de 0,024 Mg de granos kg N⁻¹ de N fijado aéreo ($r^2 = 0,77$; $n = 889$). En (A) y (B). las líneas discontinuas muestran las regresiones de los cuantiles 0,95 (superior) y 0,05 (inferior). En los paneles (C) y (D), los círculos muestran las pendientes, y las líneas representan sus respectivos intervalos de confianza del 95 % para las relaciones entre el rendimiento en grano frente al N total aéreo y el rendimiento en grano frente al N fijado aéreo para cada leguminosa.

2.3.3. El nitrógeno proveniente de la atmósfera y su potencial

La pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo biológicamente representa a la FBN%. Esta pendiente promedió 0,84 kg N fijado aéreo kg N⁻¹ total aéreo ($r^2 = 0,83$). La diferencia entre esta línea de regresión y la línea 1:1 aumentó a medida que el N total aéreo incrementó (Figura 2.3.A). El modelo ajustado mostró que la FBN comienza cuando las leguminosas han acumulado al menos ~37 kg de N total aéreo ha⁻¹ (intersección en eje x). La mayor FBN% se logró para lupino blanco (Tabla 2.4). Sin embargo, este valor no fue estadísticamente diferente de las pendientes del lupino azul, el garbanzo, el caupí, el haba, la arveja, el maní y la lenteja. Por otra parte, el poroto mostró una FBN% significativamente más baja que el resto de las especies de leguminosas ($p < 0,05$) (Tabla 2.4).

Tabla 2. 4. Parámetros (n = observaciones, pendiente, intersección, intervalos de confianza (IC₉₅) y coeficiente de determinación) de regresiones lineales que describen la relación entre el N fijado aéreo (y) y el N total aéreo (x) en diferentes leguminosas.

Especies	n	Pendiente (kg de N kg de N ⁻¹)	IC ₉₅ de la pendiente ^a	Intersección (kg de N)	IC ₉₅ de la intersección	r ²
Lupino azul	30	0,90	0,78, 1,05	-57,6	-83,4, -31,8	0,86**
Garbanzo	77	0,77	0,67, 0,89	-23,5	-34,2, -12,8	0,54**
Poroto	90	0,57	0,52, 0,63	-15,7	-21,7, -9,6	0,81**
Caupí	81	0,77	0,72, 0,83	-13,1	-18,8, -7,4	0,89**
Haba	141	0,86	0,81, 0,90	-21,3	-30,4, -12,3	0,89**
Arveja	169	0,84	0,79, 0,90	-36,5	-45,9, -27,2	0,80**
Maní	138	0,80	0,74, 0,87	-35,4	-45,3, -25,5	0,74**
Lenteja	151	0,86	0,78, 0,94	-29,9	-38,4, -21,5	0,70**
Lupino blanco	12	0,98	0,72, 1,10	-84,8	-101,7, -34,8	0,73**

^a IC₉₅ es el intervalo de confianza (nivel de significación, $\alpha = 0,05$).

** Significativo en $p = 0,01$.

La línea de regresión del cuantil 0,95 para la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo, como un indicador de la máxima FBN%, mostró los mayores potenciales en los lupinos y el haba, mientras que el más bajo fue para el poroto (Figura 2.3.B).

La diferencia entre las pendientes de los cuantiles 0,95 y 0,50 de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo indica la brecha de FBN%, la cual fue 0,13 kg de N fijado aéreo kg de N total aéreo N⁻¹, en promedio, para todas las leguminosas (Figura 2.3.B). El poroto y el maní exhibieron la mayor brecha de la FBN%. Por lo tanto, estas leguminosas mostraron la mayor oportunidad para mejorar su FBN% hacia sus potenciales. En contraposición, el lupino blanco y la lenteja demostraron valores próximos a sus potenciales (la brecha FBN% más baja).

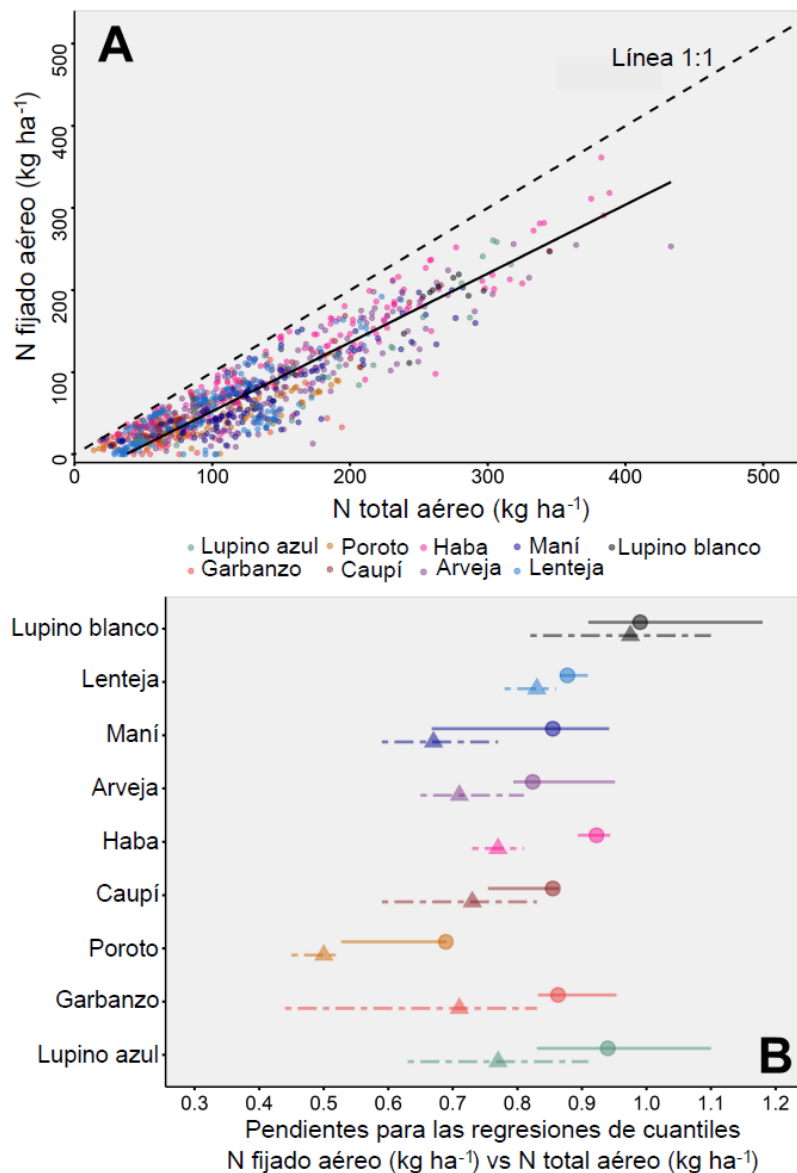


Figura 2. 3. Relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo para las leguminosas incluidas en este estudio abarcando todas las especies (panel A). La línea continua es la línea ajustada para el N fijado aéreo frente al N total aéreo ($y = 0,84x - 31,1$; $r^2 = 0,83$; $n = 889$) y la línea discontinua representa la línea 1:1 en la que todo el N total aéreo derivaría de la FBN. En el panel B, los círculos representan las pendientes de la línea de regresión ajustada individualmente para cada leguminosa

en el cuantil 0,95 (es decir, potencial de FBN%), y los triángulos representan las pendientes del cuantil 0,5 ajustadas individualmente para cada leguminosa. En (B), las líneas sólidas (pendientes del cuantil 0,95) y las líneas discontinuas (pendientes del cuantil 0,5) representan los intervalos de confianza del 95% para las pendientes.

2.3.4. Balance de N y rasgos del cultivo asociados a dicho balance

El balance parcial de N mostró una gran variación entre las leguminosas con valores medios entre $-24 \text{ kg de N ha}^{-1}$ para el lupino blanco y $29 \text{ kg de N ha}^{-1}$ para el maní (Tabla 2.3). Se exploraron diferentes relaciones entre el balance parcial de N y otras variables asociadas a la dinámica del N en la planta (Tabla 2.5; Tabla Anexo 1.1). Cuando se agruparon las leguminosas bajo un análisis, no se detectaron relaciones entre el balance parcial de N y el rendimiento y, entre el balance parcial de N y la concentración de N en grano. Sin embargo, se determinaron regresiones significativas entre el balance parcial de N y el ICN y, la FBN% y concentración de N en el rastrojo (Tabla 2.5). Entre estas variables, la concentración de N del rastrojo mostró la mayor consistencia, tal como lo indica su valor de r^2 (Tabla 2.5). En general, las leguminosas debieron fijar ~58% de su N total aéreo para lograr un balance parcial de N neutro o positivo (intersección del eje x para la relación entre el balance parcial de N y la FBN%). Sin embargo, este valor fue específico para cada especie. Para observar un balance parcial de N neutro o positivo, el lupino blanco (87%), la lenteja (65%), el haba (63%) y el caupí (60%) necesitaron alcanzar valores de FBN% superiores a la arveja (58%), el garbanzo (56%), el poroto (53%) y el lupino azul (53%). No fue posible determinar dicho valor para el cultivo de maní debido a que no se encontró una relación entre el FBN% y el balance parcial de N para este cultivo.

Tabla 2. 5. Parámetros de las regresiones lineales que describen la relación entre el balance parcial de N (PNB, por sus siglas en inglés) y el rendimiento en grano, la concentración de N en grano, el índice de cosecha de N (ICN), la proporción de N proveniente de la FBN (FBN%) y la concentración N del rastrojo. Las regresiones generales y de cada especie se informaron solamente cuando fueron significativas.

Relación (y;x)	Especies	n	Pendiente	IC ₉₅ de la pendiente ^a	Intersección (kg de N)	IC ₉₅ de la intersección ^a	r ²	
PNB vs rendimiento en grano	Poroto	26	kg N t ⁻¹	-31,8	-45,4, -22,3	29,4	9,5, 49,3	0,26**
PNB vs concentración de N en grano	Lenteja	69	% de kg de N ⁻¹	65,8	52,5, 82,6	-260,9	-322,0, -199,9	0,12**
PNB vs ICN	Todas las especies	410	-2,2	-2,3, -2,0	140,9	130,5, 151,5	0,42**	
	Lupino azul	18	-2,9	-3,3, -1,9	175,8	143,2, 226,1	0,40**	
	Garbanzo	39	-1,4	-1,7, -1,1	77,7	54,8, 100,6	0,51**	
	Poroto	26	-1,3	-1,6, -1,0	66,0	46,7, 85,3	0,71**	
	Caupí	38	-2,2	-2,7, -1,7	125,7	99,0, 152,4	0,53**	
	Haba	80	-3,0	-3,7, -2,5	212,1	173,5, 250,7	0,27**	
	Arveja	104	-2,7	-3,1, -2,4	181,6	156,4, 206,9	0,52**	
	Maní	24	-2,0	-2,8, -1,4	111,7	79,9, 143,4	0,26*	
	Lenteja	69	-1,4	-1,7, -1,1	96,0	77,4, 114,6	0,35**	
PNB vs FBN	Todas las especies	410	2,0	1,8, 2,1	-117,7	-128,1, -107,2	0,33**	
	Lupino azul	18	3,6	2,4, 4,8	-191,1	-230,2, -101,1	0,44**	
	Garbanzo	39	1,0	0,8, 1,3	-56,5	-67,6, -45,4	0,55**	
	Poroto	26	1,8	1,3, 2,5	-95,5	-122,7, -68,3	0,47**	
	Caupí	38	2,3	1,8, 3,0	-135,3	-174,2, -96,5	0,44**	
	Haba	80	2,6	2,1, 3,0	-165,3	-198,3, -132,2	0,39**	
	Arveja	104	2,3	1,9, 2,7	-133,9	-156,9, -110,9	0,35**	
	Lenteja	69	1,5	1,2, 1,8	-98,5	-118,6, -78,7	0,41**	
	Lupino blanco	12	2,6	1,6, 4,2	-226,2	-321,0, -131,5	0,47**	
PNB vs concentración de N del rastrojo	Todas las especies	355	51,7	47,9, 55,8	-68,4	-74,9, -61,9	0,47**	
	Lupino azul	8	33,4	19,5, 57,1	-63,8	-97,6, 19,5	0,68*	
	Garbanzo	39	50,5	38,5, 66,2	-70,5	-87,7, -53,3	0,32**	
	Caupí	29	37,4	28,6, 48,9	-56,9	-78,6, -35,1	0,53**	
	Haba	76	46,9	40,5, 54,3	-53,1	-65,5, -40,6	0,60**	
	Arveja	96	60,3	51,5, 70,7	-87,3	-104,0, -70,6	0,40**	
	Maní	15	76,1	49,4, 117,2	-101,1	-164,4, -37,8	0,45**	
	Lenteja	62	41,1	34,4, 49,1	-43,3	-53,1, -33,4	0,52**	

^a IC₉₅ es el intervalo de confianza (nivel de significación, $\alpha = 0,05$).

** Significativo en $p = 0,01$.

* Significativo en $p = 0,05$.

El lupino azul, el caupí, el haba, el maní y la lenteja presentaron más del 60% de sus observaciones totales respectivas con balances parciales de N positivos. Por otra parte, las observaciones del lupino blanco fueron negativas (Figura 2.4.A). Sin embargo, cuando se contabilizó la contribución de N de las raíces, el lupino blanco mostró el mayor cambio, ya que más del 80% de sus balances de N fueron positivos (Figura 2.4.B). Del mismo modo, el caupí transitó del 66% al 100% de sus observaciones con balances parciales de N positivos (Figura 2.4.B). El N del cultivo debajo de la superficie del suelo recuperado como un porcentaje de los valores totales de N (parte aérea + raíces) fue altamente variable y fluctuó entre el 3%—68% para todas las leguminosas bajo estudio (Tabla Anexo 1.2). La estimación de los balances de N cambió según el método utilizado para evaluar la contribución de N por las raíces. Para la mayoría de las especies (excepto el lupino blanco), cuando las raíces fueron recuperadas físicamente, los balances de N fueron inferiores a cuando se usaron métodos de ^{15}N (Tabla Anexo 1.3).

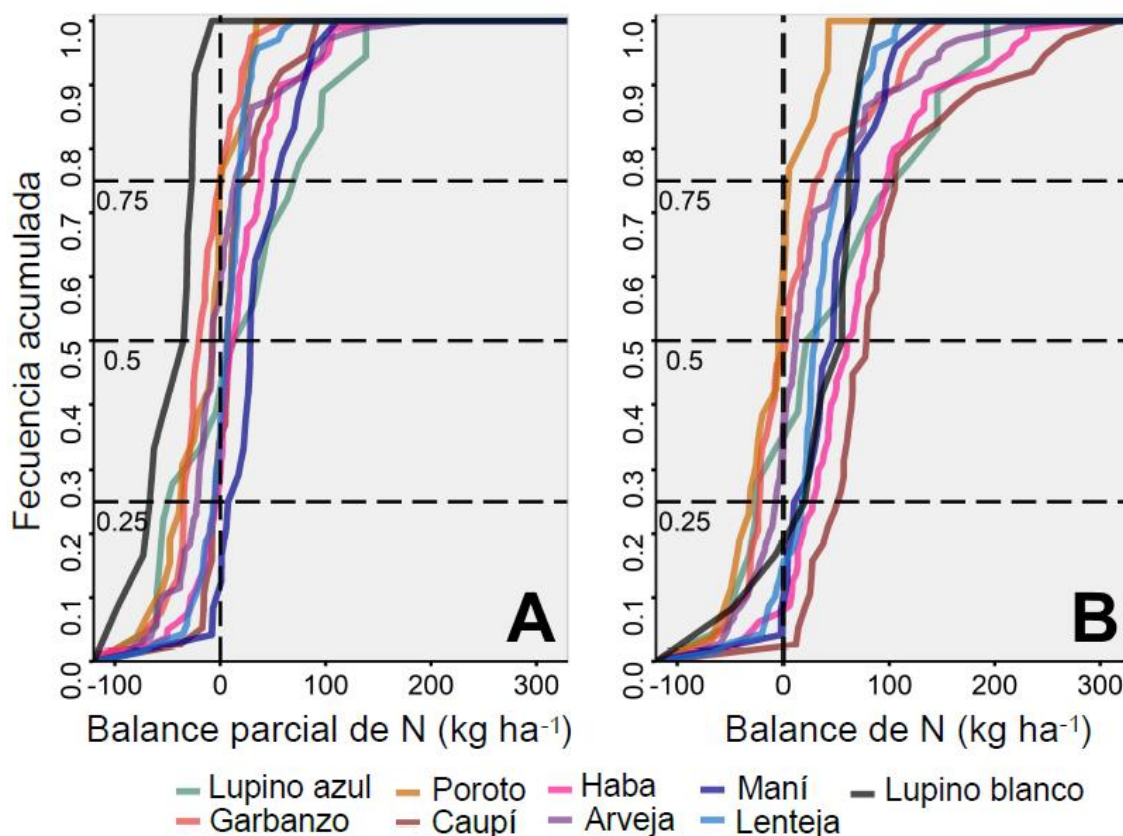


Figura 2. 4. En el panel A, se puede ver la distribución de la frecuencia acumulada para el balance parcial de N. El balance parcial de N no considera ninguna contribución de N por parte de las raíces. En el panel B, se puede ver la distribución de la frecuencia acumulada para el balance de N. El balance de N se calculó teniendo en cuenta la contribución de N del cultivo debajo de la superficie del suelo para cada especie. Las contribuciones de N del cultivo debajo de la superficie del suelo se estimaron a través de un promedio de los diferentes métodos (recuperación física y ^{15}N).

2.4. DISCUSIÓN

Este análisis de síntesis cuantitativo presenta la contribución potencial de la FBN para diferentes leguminosas de grano (excepto la soja) en una amplia gama de condiciones. Para mejorar las posibilidades de diversificación de los sistemas agrícolas, se requieren comparaciones entre especies (Fan et al., 2020). En este análisis de síntesis, se proporcionó información sobre la falta de variación de la $\text{FBN}_{\%}$ en general (calculada como la pendiente de la relación entre el N fijado y

el N total aéreo) a través de las leguminosas, excepto para el poroto, y con una FBN% similar en condiciones óptimas. Este estudio aborda de manera más adecuada la comparación entre especies de leguminosas seleccionadas porque considera la variación para todo el conjunto de datos y utiliza el método SMA, probando pendientes (en lugar de basarse en la estimación media general) para una caracterización cuantitativa de esas diferencias potenciales en los rasgos pertinentes de las plantas.

Se encontró que las leguminosas de grano presentaron una concentración de N total e IC similares, como se muestra en estudios anteriores (Unkovich et al., 2010b; Anglade et al., 2015). Sin embargo, el IC del maní fue bajo, y el IC de leguminosas almidonadas y los lupinos fue mayor y consistente en todas las especies. El alto contenido de aceite en los granos de maní demanda mayor energía para producir rendimiento, penalizando el IC potencial para este cultivo (Unkovich et al., 2010a). Los lupinos, el haba y la arveja fueron las leguminosas con mayor producción de biomasa, como ya se informó en estudios anteriores (Rochester et al., 1998; Hossain et al., 2016; Liu et al., 2019). Estas especies también mostraron los mayores valores totales de N, lo cual ya se esperaba debido a que el N total está determinado por el crecimiento de la planta y la concentración específica de N para cada órgano vegetal (Thompson y Siddique, 1997; Soltani et al., 2006). Se encontró que las leguminosas, excepto el maní, tienen diferencias sutiles en su eficiencia en el uso del N total aéreo, como se puede ver en diferentes estudios para el poroto (18 kg de rendimiento kg N total aéreo⁻¹) (Akter et al 2017), el garbanzo (20 kg de rendimiento kg N total aéreo⁻¹, en promedio) (López-Bellido et al., 2004; Koudouubas et al., 2009; Doaei et al., 2020), faba (17 kg de rendimiento kg N total aéreo⁻¹, en promedio) (Stelling et al., 1996; López-Bellido et al., 2003; Sobkowicz y Śniady, 2004), y la arveja (18 kg de rendimiento kg N total aéreo⁻¹) (Neugschwandtner y Kaul, 2015).

El presente estudio ha probado las diferencias en las pendientes de la relación entre el N fijado y N total para la fracción área de planta. Esto mostró que el poroto se diferenció de todas las otras especies. Varias revisiones enfocadas en las leguminosas han investigado la contribución de la FBN sin comparar a las leguminosas o sin usar un marco estadístico formal en el análisis (Peoples y Herridge, 1990; Unkovich y Pate, 2000; van Kessel y Harley, 2000; Herridge et al., 2008; Peoples

et al., 2009; Jensen et al., 2010; Jensen et al., 2020). Sólo se encontraron dos artículos en los cuales las especies de leguminosas de grano fueron comparadas estadísticamente. Peoples et al. (2021) agrupó cualitativamente a las leguminosas de grano y comparó formalmente los grupos a través de sus valores medios de FBN%. Estos autores informaron que el poroto tenía una FBN% estadísticamente más baja que el garbanzo, el caupí, el maní, la arveja y la lenteja, y todas las leguminosas mencionadas eran diferentes del haba y los lupinos. En el otro artículo, basado en los valores medios de FBN%, Anglade et al. (2015) clasificaron estadísticamente a la arveja y a la lenteja en el mismo grupo, diferente del haba. Sin embargo, los datos presentados por los mismos autores para las relaciones entre el N fijado y N total demostraron una falta de diferencia de la FBN% (ya que los intervalos de confianza del 95% de las pendientes para las especies de leguminosas de grano se superponían). Por lo tanto, la comparación de la FBN% de diferentes leguminosas de grano mediante el cálculo de sus pendientes de la relación entre el N fijado y N total permite incluir la variación de todo el conjunto de datos en la estimación de este parámetro que luego es comparado en la prueba de hipótesis. Dado que el conjunto de datos utilizado en el presente capítulo se creó desde diferentes ubicaciones de todo el mundo, las conclusiones que se muestran en esta revisión no se pueden aplicar de forma fiable para cada sitio o región en particular. Se deben desarrollar comparaciones más precisas mediante la parametrización específica en cada sitio.

En este capítulo se mostró que el lupino blanco y la lenteja están cerca en su potencial de FBN%, mientras que el poroto y el maní presentaron la mayor brecha entre sus potenciales de FBN% y sus valores actuales. Mejorar la FBN de las leguminosas hacia sus potenciales permitiría introducir más N desde la atmósfera en los sistemas de cultivo. Varios estudios han explorado como mejorar la FBN en leguminosas a través de programas de mejoramiento genético (Herridge et al., 1994; Barron et al., 1999; Kennedy et al., 2015; Abaidoo et al., 2017; Yang et al., 2017; Reinprecht et al., 2020). No obstante, la FBN también puede mejorarse mediante el manejo agronómico (Herridge et al., 2001). Por lo tanto, con el fin de reducir la dependencia de los fertilizantes nitrogenados en los sistemas agrícolas, es necesario explorar nuevas vías para mejorar la FBN de las leguminosas tanto desde el punto de vista del mejoramiento genético como de las prácticas utilizadas en el manejo de los cultivos.

Se identificó a la concentración de N del rastrojo como el principal factor que afecta al balance parcial de N en las leguminosas de grano. La relación entre el balance parcial de N y el rendimiento no fue consistente en todas las especies. Esto concuerda con informes anteriores sobre diferentes leguminosas en Australia y Canadá (Evans et al., 2001; Walley et al., 2007). En este capítulo se encontró que el balance parcial de N estuvo significativamente relacionado con el rendimiento sólo para el poroto, mientras que Walley et al. (2007) encontraron correlaciones positivas entre el balance de N y el rendimiento para la lenteja, garbanzos del tipo desi y el haba. Ciampitti y Salvagiotti (2018) informaron una relación negativa entre el balance parcial de N y el rendimiento en grano para la soja, principalmente en ambientes de baja FBN% (por debajo del 42%). Esta relación negativa podría explicarse debido al alto contenido de proteínas en las semillas de soja en comparación con el resto de las leguminosas (Sinclair y de Wit, 1975; Unkovich et al., 2010a; Sinclair y Vadez, 2012).

Como se esperaba, el balance parcial de N estuvo fuertemente relacionado con variables que representan el ingreso (es decir la FBN%) y la salida relativa de N del sistema (es decir ICN). Se ha informado previamente una correlación positiva entre el balance N y el ICN para el garbanzo tipo desi y el poroto (Walley et al., 2007). La reducción del balance parcial de N cuando el ICN aumentó, encontrada en este capítulo, sugiere que la contribución de N por parte de las leguminosas depende de la partición de N y del rendimiento en grano relativo a la biomasa total aéreo (es decir el IC). Esta dependencia se vio reforzada por la fuerte relación entre la concentración de N del rastrojo y el balance parcial de N, lo que demuestra que alcanzar altos niveles de FBN% no necesariamente reflejan una contribución neta de N por parte de las leguminosas (Liu et al., 2019). La variación interespecífica en la concentración de N del rastrojo es causada por las diferencias en los requerimientos de N y su partición (Sinclair y de Wit, 1975; Unkovich et al., 2010a). Además, dentro de las especies, esta partición también se ve afectada por la interacción entre genotipo x ambiente x manejo (Unkovich et al., 2010a; Xu et al., 2012; Cohen et al., 2021). Por lo tanto, los estudios futuros deben investigar la partición alométrica de la biomasa y de N en las leguminosas para entender mejor su contribución potencial al balance de N en las rotaciones agrícolas.

Los valores de $FBN_{\%}$ que se expusieron en este capítulo para el garbanzo, el poroto y el haba necesarios para lograr un balance de N parcial neutro o positivo concuerdan con los reportados por Walley et al. (2007), quienes consideraron la contribución de N por parte de las raíces. Sin embargo, para la arveja y la lenteja se encontraron valores mayores que los mostrados por los mismos autores. Cuando no se tuvo en cuenta la contribución N de las raíces, el maní, el haba, el caupí, la lenteja y el lupino azul fueron las especies que mostraron mayor frecuencia de balances parciales de N positivos. A pesar de la alta variación en los datos recuperados sobre el N del cultivo debajo de la superficie del suelo, se intentó estimar el balance de N para contabilizar las contribuciones del N radical. Esto se debe a que el N del cultivo debajo de la superficie del suelo es una fuente de N para el siguiente cultivo en la rotación (Evans et al., 2001). Además, se conoce que al estudiar el balance de N considerando solo el N aéreo se subestiman las verdaderas contribuciones del N fijado por parte de las leguminosas al suelo en los sistemas de cultivo (Crews y Peoples, 2005; Unkovich et al., 2010b; Carranca et al., 2015). Por lo tanto, esas estimaciones son más exactas que si las contribuciones del N del cultivo debajo de la superficie del suelo no se incluyeran en absoluto. Cuando se consideró el N del cultivo debajo de la superficie del suelo para las estimaciones del balance de N, los mayores cambios fueron para el lupino blanco y el caupí. Para el lupino blanco, esto se debió aparentemente a su alta producción de biomasa, mientras que para el caupí se debió a una mayor partición del N total hacia las raíces. Cuando se incluyeron los datos del N aportado por las raíces, el lupino blanco, el caupí y el haba mostraron la mayor contribución de N, mientras que el garbanzo y el poroto tendieron a ser neutrales (Tabla Anexo 1.3). Sobre la base de 262 observaciones, Evans et al. (2001) calcularon los balances de N considerando la contribución de N por parte de las raíces para el lupino, la arveja y el garbanzo en Australia. Del mismo modo, Walley et al. (2007) estimaron los balances de N para cinco leguminosas basado en 240 observaciones alrededor de las llanuras del norte de Canadá. Los resultados obtenidos en este capítulo estuvieron de acuerdo con los presentados por Evans et al. (2001) y Walley et al. (2007), ya que el lupino y el haba presentaron los mayores saldos de N.

2.5. CONCLUSIÓN

La recopilación de datos publicados sobre la FBN y variables asociadas a la dinámica del N en las plantas de diferentes regiones del mundo mostró que no hubo diferencias en la demanda de N por tonelada de rendimiento entre las leguminosas de grano ($\sim 16 \text{ kg granos kg N}^{-1}$), excepto el maní ($10 \text{ kg granos kg N}^{-1}$), que requirió una mayor cantidad de N para producir una tonelada de rendimiento. La pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y N total aéreo fue consistente (valores similares) en todas las leguminosas, excepto para el poroto. Esta especie presentó la menor $\text{FBN}_{\%}$, mientras que el lupino blanco y la lenteja estuvieron más cerca de su límite máximo de la $\text{FBN}_{\%}$ en relación con las demás leguminosas de grano. La concentración de N del rastrojo y el ICN (salida de N del sistema relativa) explicaron mejor la variación en el balance parcial de N, lo que sugiere que la partición alométrica de la biomasa y del N desempeñan un papel importante en la contribución neta de N de las leguminosas de producción de granos a los balances de N. El maní alcanzó los valores más bajos de IC e ICN y, como consecuencia, se observó una baja exportación de N en los granos y una elevada concentración de N en el rastrojo. Esto condujo a que el maní haya presentado la mayor frecuencia de observaciones positivas en sus balances parciales de N entre las leguminosas estudiadas. Por lo tanto, se hallaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis de este capítulo: “a escala global y en términos relativos, los balances parciales de N del maní son menores que en otras leguminosas de grano (excluyendo soja) debido a la alta exportación de N en este cultivo por un rendimiento superior en mayor medida que por una mayor concentración de N en los granos.”

La incorporación del contenido de N de estructuras subsuperficiales para estimar los balances de N mostró que el N proveniente de esta fracción es un componente clave para estudiar el rol de las leguminosas en el mantenimiento de la fertilidad nitrogenada del suelo en los sistemas agrícolas. Por lo tanto, los estudios futuros deben centrarse en cuantificar con precisión la contribución de estas estructuras y la $\text{FBN}_{\%}$ en las raíces y rizodeposiciones, como también en comprender la $\text{FBN}_{\%}$ en las leguminosas bajo condiciones de suelo, clima, genotipos y prácticas de manejo particulares. Estos nuevos conocimientos serían esenciales para predecir la $\text{FBN}_{\%}$ y la contribución de N a los sistemas agrícolas por parte de las leguminosas, y para mejorar la capacidad predictiva de estos

procesos mediante el uso de modelos de simulación del crecimiento de los cultivos con el fin de mejorar el conocimiento de la dinámica del N en sistemas agrícolas diversificados.

CAPÍTULO 3: Fijación biológica de nitrógeno en maní en Argentina: relación con variables asociadas a la dinámica del nitrógeno en el cultivo

3. CAPÍTULO 3. Fijación biológica de nitrógeno en maní en Argentina: relación con variables asociadas a la dinámica del nitrógeno en el cultivo

3.1. INTRODUCCIÓN

El maní (*Arachis hypogaea* L.) es la segunda leguminosa con mayor superficie sembrada en el mundo y en Argentina después de la soja (*Glycine max* L. Merrill) (Peoples et al., 2021; MAGyP, 2022). En los últimos diez años (2011-2021), la principal zona de producción de maní en Argentina contabilizó, en promedio, un total de 360.000 ha concentradas en las provincias de Córdoba, La Pampa y San Luis (MAGyP, 2022). Entre ellas, Córdoba fue la principal provincia productora ya que contribuyó con el 91% del área sembrada y de la producción (MAGyP, 2022). Dentro de esta provincia, la principal zona de producción de maní se extiende desde el centro hacia el sur del territorio (Figura 3.1).

Con el fin de contextualizar la FBN del cultivo de maní con respecto a otras leguminosas de producción de granos a escala global, se realizó un análisis de síntesis presentado en el Capítulo 2 de esta tesis. Dentro de la base de datos empleada, no hubo datos de maní en Argentina. Un estudio realizado en nuestro país evaluó la proporción de N fijada (FBN%) en el cultivo de maní en condiciones de campo (Castro et al., 2006). La FBN% reportada en dicho estudio estuvo entre 23% y 61%. Sin embargo, esta información no fue incluida en la base de datos del Capítulo 2 de esta tesis debido a que el método para estimar la FBN% fue a través de un balance relativo de N y no se utilizó ninguna de las técnicas planteadas como requisito para el armado de la base de datos en dicho capítulo (2). Las mediciones de la FBN mediante la técnica de balances de N en una o dos estaciones de crecimiento no proveen una estimación confiable de la FBN% debido a la dificultad de medir pequeños cambios en el N total en comparación con la gran cantidad de N presente en el suelo (Unkovich et al., 2008).

En el análisis de síntesis realizado en el capítulo previo, la media de la FBN% por el maní fue de 52% y la cantidad de N fijado aéreo fue de 71 kg ha⁻¹. Por otro lado, la producción de biomasa fue de 5,08 Mg ha⁻¹, sin embargo, solo el 21% de esa biomasa se particionó hacia los granos (IC), por lo que el rendimiento fue de 1,10 Mg ha⁻¹. A su vez, solo el 38% del N total aéreo se particionó hacia

los granos. Como consecuencia de la baja partición de biomasa y de N hacia los órganos reproductivos, la extracción promedio de N fue $\sim 50 \text{ kg ha}^{-1}$, lo cual a su vez condujo a un balance parcial de N medio de $+36 \text{ kg ha}^{-1}$. Sin embargo, los resultados obtenidos en el Capítulo 2 de esta tesis deben ser contrastados con aquellos que se obtengan localmente en Argentina, pues podrían evidenciar discrepancias entre los resultados globales y los locales debido a que pueden existir divergencias entre los resultados provenientes de estudios abordados a escala global y los resultados provenientes de estudio a escala local debido a la falta de información a pequeña escala (región o país) (Herridge et al., 2008; Collino et al., 2015; Herridge et al., 2022). Por este motivo, es necesario cuantificar la FBN%, los balances de N y otras variables asociadas a la producción y dinámica del N en el cultivo con el fin de lograr un conocimiento más preciso del rol que cumple esta leguminosa en los sistemas de producción nacionales.

Es necesario considerar que todas las observaciones de la base de datos global utilizada en el Capítulo 2 fueron tomadas de países con climas tropicales y subtropicales (Cernay et al., 2016; Sayre et al., 2020) con baja adopción de tecnología para la producción de cultivos (Sheahan y Barret, 2016; Magruder, 2018; Fischer y Connor, 2018; Macours, 2019) (Ghana (n=105), Tailandia (n=11), Kenia (n=9), India (n=7), Burkina Faso (n=3), Sud África (n=3)). Cuando el maní es producido bajo las condiciones mencionadas, su rendimiento es inferior al obtenido en áreas con climas templados y subtropicales con mayor adopción de tecnología (Estados Unidos, Australia, Argentina) (FAOSTAT, 2021; Figura Anexo 2.1). Mientras que en el Capítulo 2 el rendimiento medio del maní fue de $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, en Argentina el rendimiento medio en los últimos diez años (2011-2021) fue $\sim 2,5$ veces superior al mencionado ($2,85 \text{ Mg ha}^{-1}$; MAGyP, 2022). Debido al mayor rendimiento en Argentina con respecto a los países incluidos en la base de datos global (Capítulo 2), es esperable que ocurra una mayor extracción de N del sistema y, como consecuencia, que se observe una mayor frecuencia de balances de N negativos. Es decir, que la cantidad de N proveniente de la atmósfera no sea suficiente para compensar a la removida del sistema a través de los granos (Blesh y Drinkwater, 2013).

En Argentina, las estimaciones promedio de la contribución de la FBN fueron 49%, 59% y 60% para la soja, la arveja (*Pisum sativum* L.) y la vicia (*Vicia sativa* L. o *Vicia villosa* L.),

respectivamente. Además, la soja arrojó balances parciales de N de entre -52 kg N ha^{-1} a -6 kg N ha^{-1} , mientras que para la arveja el balance parcial fue neutro. Los valores mencionados previamente fueron obtenidos como promedio o como valores individuales de diferentes artículos científicos (Álvarez et al., 1995; Di Ciocco et al., 2004, 2008, 2011; Collino et al., 2015; Enrico et al., 2020; Kehoe et al., 2022). Sin embargo, en el caso del maní se carece de estimaciones de estas variables de especial importancia para la sustentabilidad de los sistemas de producción que incluyan a esta leguminosa. Por lo tanto, los objetivos del presente capítulo fueron:

3.1.1. Objetivos

- i)* estimar la contribución de la FBN en el cultivo de maní en lotes de producción del centro-sur de Córdoba y su relación con el rendimiento y variables asociadas a la dinámica del N en el cultivo.
- ii)* Calcular los balances parciales de N y su relación con la $\text{FBN}_{\%}$ en las condiciones descritas en el objetivo previo.

3.1.2. Hipótesis

En condiciones ambientales que generen un elevado crecimiento del cultivo de maní y una alta cantidad de N fijado, este aporte no es suficiente para que los balances de N sean positivos debido a la alta exportación de este nutriente con los granos.

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Descripción de los sitios de estudio

Durante la campaña 2019-2020 se evaluó el N proveniente de la FBN en 10 lotes de producción de maní en la provincia de Córdoba, Argentina. Los puntos de estudio se localizaron entre los $31^{\circ}25'-34^{\circ}13' \text{ S}$ y los $62^{\circ}43'-64^{\circ}10' \text{ O}$ (Figura 3.1). Los sitios seleccionados abarcaron condiciones de suelo y clima representativas de la principal zona productora de maní de Argentina (Tablas 3.1 y 3.2). Además, se incluyeron parcelas experimentales provenientes de tres experimentos (exp. 1, 2 y 13; Tabla 3.1 y 3.2) ubicados en la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional

de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Manfredi y en el Campo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba en Capilla de Los Remedios. En ambos sitios se estudió el factor cultivar con tres niveles (ASEM-400, Granoleico y Blanco Santa Fe) dispuestos en un diseño en bloques completamente aleatorizado con tres repeticiones. Las parcelas estuvieron conformadas por 4 surcos de 18 m de largo distanciados a 0,7 m entre ellos. Cada lote de producción y sitio experimental dispuso de sus propias prácticas de manejo (genotipo, fecha de siembra, labranza, riego) y de ahora en más serán llamados "sitios". En los lotes de producción se aplicaron las prácticas de manejo seguidas por los productores (exp. 3 a 12; Tabla 3.1 y 3.2). En todos los sitios bajo estudio, las semillas fueron inoculadas previo a la siembra y el cultivo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades. Las condiciones experimentales y prácticas de manejo se detallan en las Tablas 3.1 y 3.2.

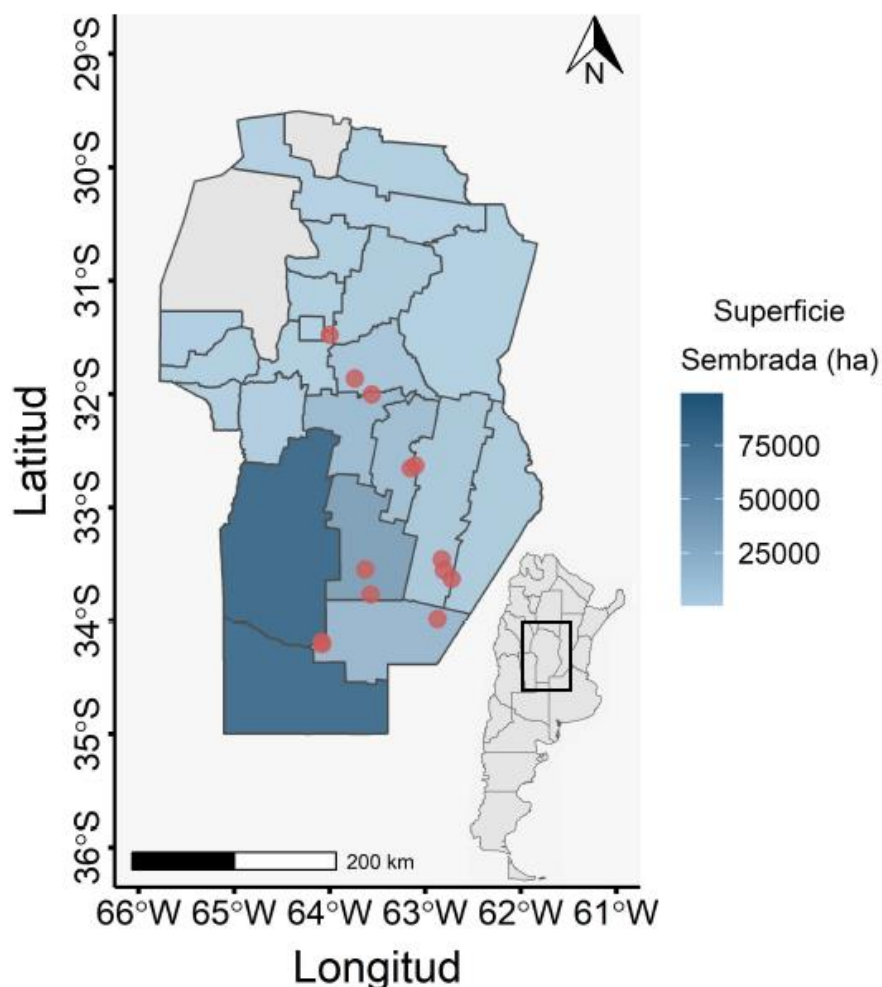


Figura 3. 1. Ubicación geográfica de los sitios estudiados en la campaña 2019/2020 en la zona de producción de maní de la provincia de Córdoba. La intensidad del sombreado indica la superficie anual promedio sembrada en cada de departamento entre los años 2011 y 2021 (MAGyP, 2022).

3.2.2. Variables edáficas y climáticas

Al momento de la siembra, se tomaron muestras compuestas de suelo (12 submuestras) hasta una profundidad de 20 cm en cada sitio. En cada muestra se determinó el pH (1;2,5), el contenido de N en forma de nitratos (NO_3^-) (Bremner, 1960), el contenido de fósforo (P) (Bray-Kurtz I; Bray y Kurtz, 1945) y el contenido de C orgánico mediante el método de Walkley y Black (1934) que luego fue transformado a materia orgánica (MOS) mediante el factor 1,72. Los suelos incluidos fueron del orden Molisol y los parámetros estudiados se detallan en la Tabla 3.2.

Las variables climáticas registradas fueron las temperaturas mínimas y máximas y las precipitaciones. Las temperaturas fueron tomadas de estaciones meteorológicas del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba (<https://newmagya.omixom.com/accounts/login/?next=/>) ubicadas a menos de 50 km de distancia de cada sitio mientras que las precipitaciones fueron registradas *in situ* (**Tabla 3.2**).

Tabla 3. 1. Detalles de la ubicación, genotipo, y prácticas de manejo empleadas en cada uno de los ensayos utilizados en para el estudio de la fijación biológica en el cultivo de maní en la provincia de Córdoba, Argentina, en la campaña 2019/2020.

Exp.	Ubicación	Coordenadas	Genotipo	Cultivo antecesor	Labranza	Densidad (pl m ⁻²)
1	Manfredi	31° 51' 28.68"S 63° 44' 31.77"O	ASEM-400; Granoleico	Maíz	Siembra directa	14
2	Manfredi	31° 51' 28.68"S 63° 44' 31.77"O	ASEM-400; Granoleico; Blanco Santa Fe	Maíz	Siembra directa	14
3	Manfredi	31° 51' 45.78"S 63° 43' 50.97"O	ASEM-400; Granoleico	Maíz	Siembra directa	10
4	Ballesteros	32° 37' 51.60"S 63° 6' 24.16"O	ASEM-400	Soja/ <i>Triticum aestivum</i> L. cultivo de servicio	Siembra directa	10
5	Ballesteros	32°38' 6.43"S 63° 6' 47.42"O	ASEM-400	Soja	Siembra directa	11
6	Canals	33° 33' 14.00"S 62° 48' 23.00"O	Granoleico	Soja	Doble acción (15 cm prof)	12
7	Canals	33° 27' 11.44"S 62° 49' 39.93"O	Granoleico	Maíz	Doble acción (15 cm prof)	13
8	Benjamín Gould	33° 37' 44.00"S 62° 43' 23.00"O	Granoleico	Soja	Siembra directa	11
9	Pueblo Italiano	33° 58' 57.94"S 62° 52' 19.95"O	Granoleico	Soja	Siembra directa	13
10	General Lavalle	34° 12' 20.30"S 64° 5' 9.57"O	Granoleico	Girasol/ <i>Secale cereale</i> L. cultivo de servicio	Siembra directa	10
11	Huanchillas	33° 46' 4.05"S 63° 34' 30.09"O	Granoleico	Soja	Siembra directa	10
12	Huanchillas	33° 32' 46.66"S 63° 37' 53.77"O	Granoleico	Soja	Siembra directa	10
13	Capilla de Los Remedios	31° 28' 37.28"S 64° 0' 18.76"O	ASEM-400; Granoleico; Blanco Santa Fe	Maíz	Siembra directa	14

Tabla 3. 2. Detalles de la fecha de siembra (FS), temperatura, precipitaciones y variables edáficas en cada uno de los ensayos utilizados en para el estudio de la fijación biológica en el cultivo de maní en la provincia de Córdoba, Argentina, en la campaña 2019/2020.

Exp.	Sitio	FS	Temperatura media (°C) ^a			Riego	PP ^a (mm)	Tipo de suelo ^c	MOS (g kg ⁻¹)	pH	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)
			Mínima	Media	Máxima							
1	Manfredi	Oct 10	13.9	21.5	29.5	Si	872 ^b	Haplustol éntico	24.8	7.4	52.5	10.4
2	Manfredi	Dic 10	14.0	21.2	28.4	Si	903 ^b	Haplustol éntico	24.8	7.1	52.5	7.8
3	Manfredi	Dic 10	14.0	21.2	28.4	No	422	Haplustol éntico	24.8	7.2	52.5	9.1
4	Ballestero	Nov 03	12.3	20.3	28.2	No	732	Haplustol acuico	30.2	6.9	27.8	6.0
5	Ballesteros	Nov 03	12.3	20.3	28.2	No	732	Haplustol acuico	30.2	6.8	31.9	3.1
6	Canals	Nov 08	14.2	21.7	29.1	No	581	Haplustol éntico	24.2	6.4	14.9	5.9
7	Canals	Nov 07	14.5	22.0	29.5	No	502	Haplustol éntico	30.2	6.7	11.7	7.4
8	Benjamín Gould	Oct 10	13.8	21.4	28.9	No	757	Haplustol údico	30.9	5.9	22.9	4.5
9	Pueblo Italiano	Nov 03	14.5	22.2	29.8	No	508	Haplustol údico	28.2	6.2	13.3	4.5
10	General Lavalle	Nov 11	14.8	22.3	29.7	No	475	Haplustol údico	20.0	6.4	26.7	4.2
11	Huanchillas	Nov 04	14.8	22.0	29.2	No	454	Haplustol udorthents	20.1	6.3	13.3	5.9
12	Huanchillas	Nov 07	15.0	22.2	29.4	No	498	Haplustol éntico	18.1	6.4	41.1	4.2
13	Capilla de Los Remedios	Nov 11	13.7	20.9	28.1	Si	737 ^b	Haplustol éntico	30.9	6.8	63.9	3.1

^a Desde la siembra hasta la cosecha.

^b Lluvia acumulada y riego.

^c Tipo de suelo de acuerdo a **Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 2014.**

3.2.3. Muestreo y análisis del cultivo

3.2.3.1. Determinación de la biomasa total y del rendimiento y cálculo de variables asociadas

Cuando el cultivo alcanzó la madurez de cosecha (*i.e.* 30-40 % de vainas maduras; Boote, 1982) en cada sitio, se tomaron tres muestras de biomasa aérea y de vainas, sin incluir las raíces (biomasa aérea (hojas y tallos) + vainas+ granos; de ahora en más llamada “biomasa total”), en una superficie de 0,7 m². Las muestras fueron secadas a 60 °C hasta peso constante. Con base en el peso de la muestra se calculó la biomasa total producida por hectárea. El peso del grano se cuantificó por separado y se calculó el rendimiento en granos por hectárea (de ahora en más llamado “rendimiento”).

Posteriormente, las muestras fueron molidas con el molino CT 293 Cyclotec™ con una malla de 0,5 mm. Posteriormente, se midió la concentración de N total en los granos y en las estructuras vegetativas de la planta mediante un analizador elemental que realiza la combustión de las muestras. Luego, se calculó la cantidad de N (kg ha⁻¹) contenida en los granos (ec. 1) y en el rastrojo (ec. 2):

$$N \text{ en granos (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} \times \frac{\text{concentración de N en granos (\%)}}{100} \quad (1)$$

$$N \text{ en rastrojo (kg ha}^{-1}\text{)} = [\text{biomasa total (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)}] \times \frac{\text{concentración de N en rastrojo (\%)}}{100} \quad (2)$$

Seguidamente se obtuvo el contenido de N en el cultivo en kg ha⁻¹ (sin contabilizar raíces; de ahora en más llamado “N total aéreo”) mediante la suma de las ecuaciones 1 y 2. Si bien el cultivo de maní fructifica debajo de la superficie del suelo, el N contenido en los granos y vainas está incluido en el término “N total aéreo”. También se calculó el índice de cosecha (IC) y el índice de cosecha de N (ICN) de acuerdo a las ecuaciones 3 y 4, respectivamente:

$$IC = \left(\frac{\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Biomasa total (kg ha}^{-1}\text{)}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$ICN = \left(\frac{N \text{ en granos (kg ha}^{-1}\text{)}}{N \text{ total aéreo (kg ha}^{-1}\text{)}} \right) \times 100 \quad (4)$$

3.2.3.2. Determinación de la fijación biológica de N y balance de N en el cultivo de maní

La FBN se determinó a través del método de abundancia natural de isótopo ^{15}N (Shearer and Khol, 1986). Para ello, se sembraron tres parcelas de maíz (*Zea mays* L.) con un ancho de 5 surcos distanciados a 0,7 m y un largo de 5 m contiguas al cultivo de maní en cada sitio. Tanto el maní como el maíz no recibieron fertilización nitrogenada. Al momento de la cosecha del maní, se extrajeron plantas de maíz en una superficie de 0,7 m² que luego fueron secadas a 60 °C hasta peso constante y utilizadas como plantas no fijadoras de referencia. Las mediciones de abundancia de ^{15}N fueron realizadas, separadamente, en los granos y en las estructuras vegetativas del maní y en las plantas de maíz utilizadas como referencia. Luego, la proporción de N en maní proveniente de la FBN (FBN%) se calculó como:

$$FBN_{\%}(\%) = \left(\frac{\delta^{15}N_{ref} - \delta^{15}N_{maní}}{\delta^{15}N_{ref} - B} \right) \times 100 \quad (5)$$

en donde $\delta^{15}N_{ref}$ es la abundancia natural de ^{15}N en la planta de referencia (maíz), $\delta^{15}N_{maní}$ es la abundancia natural de ^{15}N en la planta de maní, y B es la abundancia natural de ^{15}N en plantas de maní cuya única fuente de N es la proveniente de la FBN. El valor del coeficiente B considerado en este estudio es un valor medio para el cultivo de maní tomado de Unkovich et al. (2008). Debido a que en las plantas de maní la abundancia natural de ^{15}N fue determinada en granos y en el resto de la planta de manera independiente, el valor de $\delta^{15}N_{maní}$ se calculó ponderando la abundancia de ^{15}N y la cantidad proporcional de N en los granos y en el resto de la planta (Unkovich et al., 2008). Seguidamente, la cantidad de N fijada por el cultivo de maní ("N fijado aéreo"; kg ha⁻¹) fue calculada como:

$$N \text{ fijado aéreo (kg ha}^{-1}\text{)} = N \text{ total (kg ha}^{-1}\text{)} \times \left(\frac{FBN_{\%}}{100} \right) \quad (6)$$

Además, se estimó el balance parcial de N de acuerdo a la ecuación 7:

$$\text{Balance parcial de N (kg ha}^{-1}\text{)} = N \text{ fijado aéreo (kg ha}^{-1}\text{)} - N \text{ en granos (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Un valor positivo para el balance parcial de N (ec. 7) indica un ingreso neto de N al suelo, mientras que un valor negativo implica que la cantidad de N fijada en la parte aérea del cultivo de maní no es suficiente para cubrir la cantidad de N exportada en los granos. En este balance parcial solo se incluyó el N contenido en granos, vainas y parte aérea debido a que el N aportado por las

raíces y las rizodeposiciones no fue medido. No obstante, para demostrar la importancia del N ubicado debajo de la superficie del suelo, su aporte fue considerado para recalcular el balance de N asumiendo que el 13% del N total está contenido en las raíces y rizodeposiciones (Capítulo 1 de esta tesis).

3.2.4. Análisis estadístico

3.2.4.1. Estadística descriptiva

Para la caracterización general de las principales variables estudiadas se calculó la media, el desvío estándar (DE), el mínimo, el máximo, la mediana y el rango intercuartílico (IQR; cuantiles 0,25 y 0,75), como una medida de descripción del 50% de los valores centrales alrededor de la mediana. Para el cálculo de dichas medidas, se utilizó el paquete *psych* (Revelle, 2021) en el software R (R Core Team, 2020).

3.2.4.2. Bootstrapping

El *bootstrapping* es un método de inferencia estadística basado en el remuestreo de los datos (Faraway, 2014). Este método aplica el principio de *plug-in* (*plug-in principle*) que es utilizado en teoría de probabilidades y estadística para estimar la función de una dada distribución de probabilidades mediante la distribución empírica de las observaciones muestrales. Por lo tanto, el *bootstrapping* facilita la inferencia poblacional a partir de los datos muestrales y es particularmente útil cuando la distribución del estadístico es complicada o no se conoce. Este método provee una manera de hacer afirmaciones sobre la confianza que se tiene en la estimación de un parámetro sin asumir una distribución normal y evita la necesidad de cálculos matemáticos teóricos (Efron y Tibshirani, 1993). La premisa del *bootstrapping* es que la inferencia acerca de una población puede ser modelada mediante el remuestreo (con reposición) del conjunto de datos disponible (Efron, 1979). De esta manera, la muestra actúa como la “población”, por lo tanto, en lugar de tomar muestras aleatorias de una distribución poblacional que en la práctica es desconocida, se hace un remuestreo de los datos disponibles.

Para el análisis presentado en este capítulo, se estimaron modelos de regresión lineal simple expresados como:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\varepsilon}_i \quad (10)$$

en el cual \hat{y}_i es el valor estimado de la i -ésima observación de variable respuesta, $\hat{\beta}_0$ es ordenada al origen, $\hat{\beta}_1$ es pendiente, que indica el cambio esperado en la variable respuesta (y) por cada cambio unitario en la variable predictora x_i , y $\hat{\varepsilon}_i$ = residuos del modelo. Para las regresiones de rendimiento (y) con N total aéreo (x) y de N fijado aéreo (y) con biomasa total (x), los modelos fueron forzados a cero (Collino et al., 2015; Salvagiotti et al., 2021). Por lo tanto, en dichas regresiones, el estimador $\hat{\beta}_0$ no fue computado. Además, la relación de rendimiento (y) con N total aéreo (x) se describió mediante las líneas de frontera a partir del cómputo de las regresiones para los cuantiles 0.05 y 0.95 mediante el uso del paquete *quantreg* (Koenker, 2021).

En el primer capítulo de esta tesis se contrastó al cultivo de maní con otras ocho leguminosas de producción de granos alrededor del mundo. En el presente capítulo, se contrastó al cultivo de maní bajo las condiciones de crecimiento en Argentina (clima templado) con las condiciones de crecimiento en otros países (tropicales y subtropicales). Para lograr tal fin, se aplicó *bootstrapping* separadamente para el conjunto de datos de maní obtenidos en la provincia de Córdoba en la campaña 2019/2020, y para el conjunto de datos de maní presentado en el capítulo 1 de esta tesis (donde no hubo datos de Argentina presentes). Se generaron 5000 muestras aleatorias a partir del remuestreo de cada conjunto de datos a través del paquete *rsample* (Kuhn et al., 2020) en el software R (R Core Team, 2020). Con el propósito de asegurar reproducibilidad, se estableció un generador numérico aleatorio mediante la función *set.seed* y se le asignó un *id* a cada remuestreo. Además, a cada uno de éstos se les ajustó el modelo de la ec. 10 a través de la función *lm*. De cada modelo se extrajo, según corresponda: i) $\hat{\beta}_0$; ii) $\hat{\beta}_1$; iii) la suma de cuadrados totales ($SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$); y iv) la suma de cuadrados de los residuales ($SCR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$). De esta manera, se generaron distribuciones empíricas que permitieron la estimación de los parámetros ($\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$; (Efron y Tibshirani, 1993). De las distribuciones generadas se extrajo la mediana (percentil

50%), como la tendencia central, y el intervalo de confianza del 95% (IC₉₅) mediante el cómputo de los percentiles empíricos 2,5% y 97,5%.

Los valores de la mediana y de los percentiles 2,5% y 97,5% (IC₉₅) fueron utilizados para poner a prueba la hipótesis nula de las pendientes en cada modelo ($H_0: \hat{\beta}_1 = 0$), de manera tal que, si el IC₉₅ no incluye al cero, se concluye, con un 95% de confianza, que la pendiente es significativamente distinta de cero ($H_1: \hat{\beta}_1 \neq 0$) (Faraway, 2014).

La pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo puede ser biológicamente interpretada como la FBN% ($FBN\% = [N \text{ fijado aéreo } (kg \text{ ha}^{-1}) / N \text{ total aéreo } (kg \text{ ha}^{-1})] \times 100$). No obstante, al observar los valores obtenidos, es necesario considerar que la estimación de la pendiente por mínimos cuadrados es diferente al cálculo de la media o la mediana de la FBN% (Wilkinson y Roger, 1973; Chambers, 1992).

La regresión del balance de N (y) en función de la FBN% (x) se realizó solo con los datos de maní generados en Argentina debido a que dicha regresión no fue significativa para la base de datos global. Se ajustaron 5000 modelos mediante el uso de *bootstrapping*. El corte de este modelo de regresión con el eje x ($y = 0$) indica la proporción de N que debe fijar el cultivo de maní para alcanzar balances de N neutros. Se calculó dicho corte para cada uno de los modelos ajustados y se computaron los cuantiles 2,5% y 97,5%. De esta manera se generó un intervalo de confianza (IC₉₅) que permite estudiar la variabilidad con respecto al valor de FBN% que debería alcanzar el cultivo de maní en Argentina para obtener balances parciales de N neutros.

3.2.4.3. Comparación de los estimadores

La comparación de dos estimadores a través de sus intervalos de confianza es una técnica de comparación frecuente en artículo científicos. No obstante, es importante resaltar que observar la superposición de los intervalos de confianza de cada estimador muestra menor potencia estadística (mayor probabilidad de cometer error de tipo II) en comparación con observar si el intervalo de confianza de la diferencia entre los estimadores contiene el valor cero (Schenker y Gentleman, 2001). En este capítulo, para realizar las comparaciones de las pendientes entre el conjunto de datos de Argentina y la base de datos global, se calculó la diferencia de pendientes para cada uno

de los 5000 modelos ajustados en cada regresión ($\hat{\beta}_{1 Arg} - \hat{\beta}_{1 otros países}$). Debido a que cada modelo se ajustó con una muestra aleatoria, la distribución empírica de la diferencia entre las pendientes también fue generada de manera aleatoria. Luego se computaron los percentiles 2,5% y 97,5% (IC₉₅) de la distribución de dicha diferencia y se puso a prueba la hipótesis nula de igualdad de pendientes ($H_0: \hat{\beta}_{1 Arg} = \hat{\beta}_{1 otros países}$). De esta manera, si los IC₉₅ de la diferencia entre los estimadores de las pendientes no incluyen al cero, se considera que hay evidencia suficiente para rechazar la H_0 y se concluye, con un 95% de confianza, que las pendientes son significativamente distintas ($H_1: \hat{\beta}_{1 Arg} \neq \hat{\beta}_{1 otros países}$) (Schenker y Gentleman, 2001; Cumming y Finch, 2006; O'Brien y Yi, 2016). Es importante notar que la diferencia entre los estimadores de las pendientes se realizó con Argentina en el primer término y el resto de los países en el segundo término ($\hat{\beta}_{1 Arg} - \hat{\beta}_{1 otros países}$). Esto indica que, si el IC no incluye al cero y muestra solo valores positivos, se concluye que la pendiente para el conjunto de datos de Argentina es significativamente mayor que la del resto de los países, mientras que, si el IC no incluye al cero y muestra solo valores negativos, se concluye que la pendiente para el conjunto de datos de Argentina es significativamente menor que la del resto de los países. Para la comparación de las pendientes en las regresiones de cuantiles, el intervalo de la diferencia para un $\alpha = 0,05$ se calculó de acuerdo a la ecuación 11 (Schenker y Gentleman, 2001):

$$IC_{95} = (\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2) \pm 1,96 \sqrt{\widehat{SE}_1^2 + \widehat{SE}_2^2} \quad (11)$$

donde $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ son los estimadores de las pendientes y \widehat{SE}_1 y \widehat{SE}_2 son el error estándar de los estimadores de las pendientes $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$, respectivamente.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Variables del cultivo asociadas a la dinámica del N

La FBN_% mostró un rango de 26 — 79% (valor máximo – valor mínimo), con un IQR de 43 — 64% y una media de 53% (Tabla 3.3). El rendimiento tuvo un valor medio de 4,37 Mg ha⁻¹, con un

IQR 3,84 — 4,77 Mg ha⁻¹. Los valores de IC, ICN y concentración de N en granos mostraron una variabilidad baja (menor desviación standard) (Tabla 3.3), por lo que la variabilidad observada en la cantidad de N en granos se debió principalmente a variaciones en el rendimiento. La concentración de N total mostró un IQR entre 2,53 y 3,03% con una media de 2,75%, mientras que la media de la concentración de N en los granos fue un 1,6 veces superior a la de N total (Tabla 3.3).

Tabla 3. 3. Estadística descriptiva las variables asociadas a la producción, absorción de N y a la fijación biológica de N en el cultivo de maní en Argentina.

Variable	Unidad	Media	DE ^a	Mínimo	Cuantil 0.25	Mediana	Cuantil 0.75	Máximo
Biomasa total	Mg ha ⁻¹	10.52	1.98	7.36	9.26	10.29	11.01	15.46
IC	%	42	3	37	39	42	44	48
Rendimiento	Mg ha ⁻¹	4.37	0.65	3.29	3.84	4.94	4.77	5.93
Conc. N total ^b	%	2.75	0.31	2.18	2.53	2.74	3.03	3.2
N total	kg ha ⁻¹	288	54	171	258	293	315	417
FBN	%	53	14	28	43	52	64	79
N fijado	kg ha ⁻¹	154	49	76	119	138	188	257
ICN	%	68	4	58	65	67	71	76
Conc. N en granos	%	4.45	0.50	3.71	4.14	4.44	4.77	5.43
N en granos	kg ha ⁻¹	194	33	131	176	195	216	273
Balance Parcial de N ^c	kg ha ⁻¹	-41	38	-105	-68	-45	-15	34
		(-21)	(42)	(-95)	(-53)	(-26)	(8)	(60)

^a DE: desvío estándar de la media

^b Concentración de N considerando el total de la planta, excepto las raíces. Es decir, la concentración de N referida hojas + tallos + vainas + granos.

^c Los valores entre paréntesis fueron calculados considerando que el 13% del N total está contenido en las raíces y rizodeposiciones (**Capítulo 2**)

3.3.2. Relación entre rendimiento, el N total aéreo y el N fijado aéreo

El rendimiento y el N total aéreo estuvieron relacionados linealmente ($r^2 = 0.98$) con una pendiente de 15 kg de grano por kg N total aéreo para el maní producido en Argentina (esto equivale a 67 kg de N por Mg de rendimiento). En consecuencia, el presente trabajo demuestra que el maní en Argentina tuvo una eficiencia en el uso del N del 50% superior a aquella obtenida con la base de datos global (Figura 3.2.A; Figura Anexo 3.2.A), la cual fue estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) (Figura 3.2.C). La línea de frontera superior indica que el N total aéreo es el principal factor que limita el rendimiento (cuantil 0.95), mientras que la línea de frontera inferior indica que el rendimiento es limitado por otros factores diferentes a la disponibilidad de N (cuantil 0.05). Cuando el N total aéreo fue limitante para el rendimiento del maní, las pendientes no se diferenciaron entre aquella de Argentina y la base de datos global ($\alpha = 0.05$), que en promedio fue de 17,5 kg de grano por kg N total aéreo (Figura 3.2.A). En cambio, cuando el rendimiento estuvo limitado por otros factores diferentes a la disponibilidad de N, el presente estudio mostró una eficiencia de 12 kg de grano por kg de N aéreo total, la cual fue seis veces superior y significativamente diferente a la obtenida para la base de datos global ($\alpha = 0.05$). Por otro lado, la pendiente de la relación entre el rendimiento y el N fijado aéreo, para la base de datos global fue de 12 kg de rendimiento kg N fijado aéreo⁻¹, valor que duplicó al observado en este estudio (6 kg de rendimiento kg N fijado aéreo⁻¹) (Figura 3.2.B; Figura Anexo 3.2.B). Dicha diferencia fue estadísticamente significativa (Figura 3.2.D).

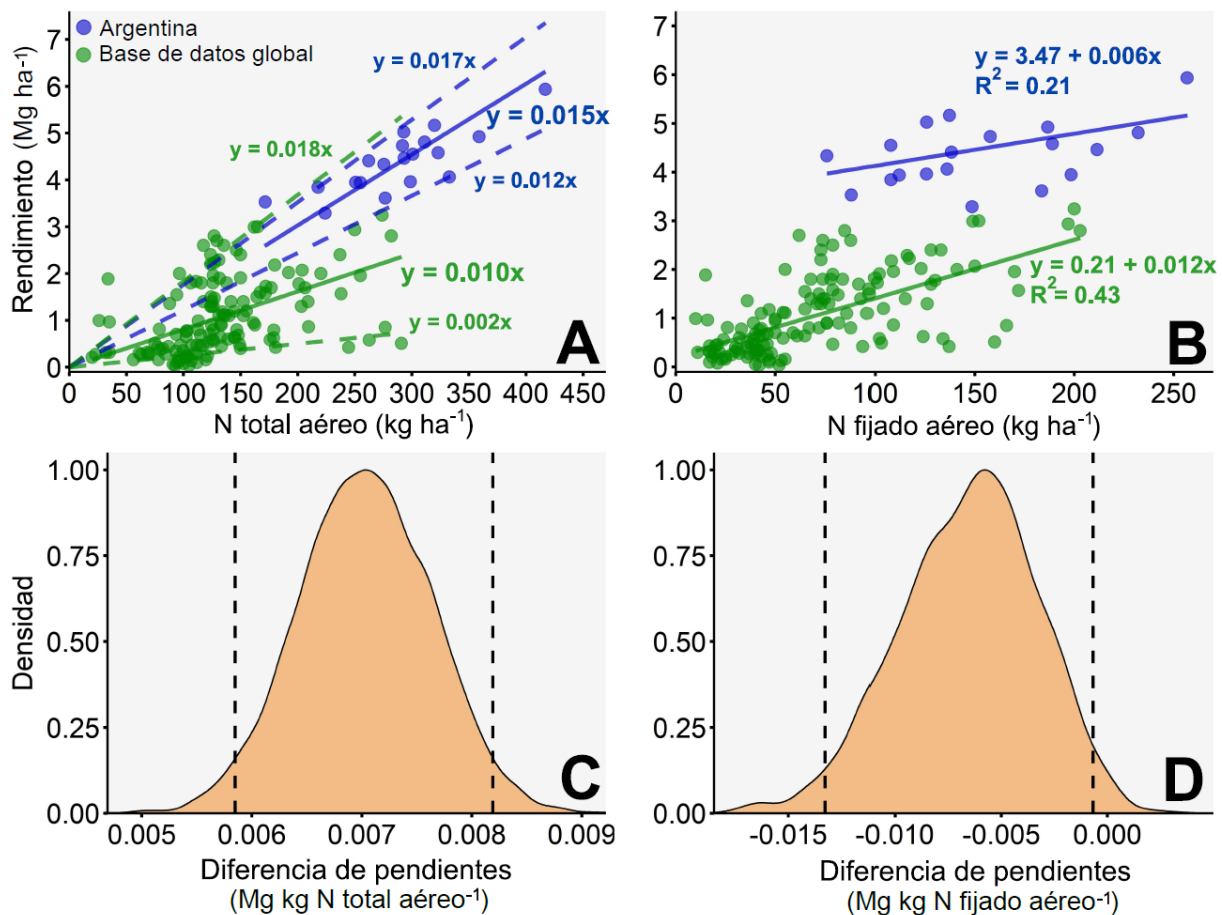


Figura 3. 2. Relación entre el rendimiento en grano en maní y el N total aéreo (A) y el N fijado aéreo (B) para Argentina (azul) y para la base de datos global (verde). Las líneas sólidas en A representan el mejor ajuste para el set de datos de Argentina (azul; pendiente = 0.015 Mg kg N total aéreo; $R^2 = 0,98$; $n = 19$), y para la base de datos global (verde; pendiente = 0.010 Mg kg N total aéreo; $R^2 = 0,71$; $n = 138$). En A las líneas rayadas muestran el mejor ajuste para los cuantiles 0.95 (superiores) y 0.05 (inferiores) para cada set de datos. Las líneas sólidas en B representan el mejor ajuste para el set de datos de Argentina (azul; pendiente = 0.006 Mg kg N fijado aéreo; $n = 19$), y para la base de datos global (verde; pendiente = 0.012 Mg kg N fijado aéreo; $n = 138$). Los parámetros de las funciones de las líneas sólidas en A y en B fueron estimados mediante *bootstrapping*. Los paneles C y D muestran las distribuciones empíricas de las diferencias entre las pendientes (líneas sólidas) presentadas en A y en B respectivamente. En C y D las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha).

3.3.3. Fijación biológica de nitrógeno

La pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo puede ser biológicamente interpretada como la FBN%. Independientemente de la fuente de datos (el presente capítulo o la base de datos global), la pendiente fue de 0.61 kg de N fijado aéreo kg de N total aéreo⁻¹ (i.e. 61%) (Figura 3.3.A; Figura Anexo 3.2.C). Se ajustó una línea de regresión media debido a que no hubo diferencia entre las pendientes estimadas separadamente ($\alpha = 0.05$) (Figura 3.3.C). Resolviendo la ecuación para $y = 0$, el modelo ajustado mostró que se necesitaron ~18 kg N total aéreo para que comience la FBN en el cultivo. Además, se observó que la diferencia entre la línea de regresión y la línea 1:1 se incrementó a medida que aumentó el N total aéreo (Figura 3.3.A).

La cantidad de N fijado aéreo por unidad de biomasa total determina la eficiencia de la FBN (Unkovich et al., 2010b; Chen et al., 2016). En promedio para el presente capítulo y la base de datos global, la eficiencia de la FBN fue de 14.6 kg de N fijado aéreo por Mg de biomasa total⁻¹ (Figura 3.3.B; Figura Anexo 3.2.D). Aun cuando en Argentina se exploraron valores de biomasa total superiores a los del resto de los países (Figura 3.3.B), se ajustó una única línea de regresión media debido a que no hubo diferencia entre las pendientes estimadas separadamente ($\alpha = 0.05$) (Figura 3.3.D).

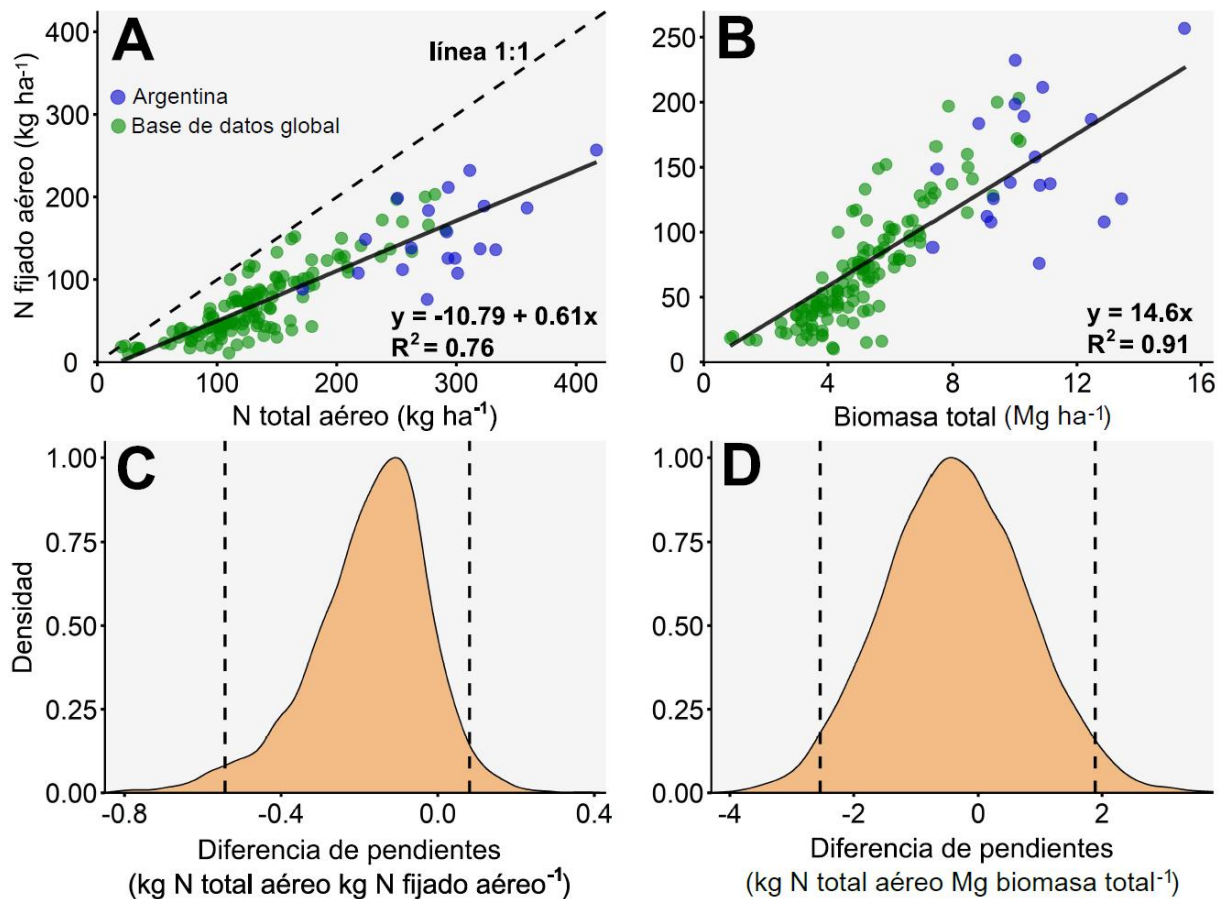


Figura 3. 3. Relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo (A) y la biomasa total (B) para el cultivo de maní. La línea sólida en A representa el mejor ajuste promedio para la combinación del set de datos de Argentina y para la base de datos global (pendiente = 0,61 kg N fijado kg N total⁻¹; n=157). En A la línea discontinua es la relación 1:1 (indica que todo el N total aéreo provendría de la FBN). La línea sólida en A representa el mejor ajuste promedio para la combinación del set de datos de Argentina y la base de datos global (pendiente = 14.6 kg N fijado Mg biomasa total⁻¹; n=148). Los parámetros de las funciones de las líneas sólidas en A y en B fueron estimados mediante *bootstrapping*. Los paneles C y D muestran las distribuciones empíricas de las diferencias entre las pendientes ajustadas separadamente para Argentina y para la base de datos global para las relaciones presentadas en A y en B respectivamente. En C y D las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha).

3.3.3. Balance parcial de N

El balance parcial de N indica el aporte neto de la FBN con respecto a la cantidad de N removida en los granos. Este balance varió entre $-105 \text{ kg N ha}^{-1}$ y 34 kg N ha^{-1} , y mostró que, en promedio, la cantidad de N exportada en los granos superó en 41 kg N ha^{-1} a la cantidad de N proveniente de la FBN (Tabla 3.3). El 50% de los valores centrales alrededor de la mediana fueron negativos (entre -68 kg N ha^{-1} y -15 kg N ha^{-1}). El balance parcial de N se relacionó positiva y linealmente con la $\text{FBN}_{\%}$. La pendiente de la relación mostró un incremento de $2,61 \text{ kg N ha}^{-1}$ en el balance parcial de N por cada unidad de aumento en la $\text{FBN}_{\%}$ (Figura 3.4.A; Figura Anexo 3.2.E). El corte de este modelo de regresión con el eje x ($y = 0$) indica la proporción de N que debe fijar ($\text{FBN}_{\%}$) el cultivo de maní para alcanzar un balance parcial de N neutro. En la Figura 3.4.B se muestra la distribución de los valores obtenidos mediante la resolución de $y = 0$ para los 5000 modelos ajustados por *bootstrapping*. Esto permitió estimar la incertidumbre alrededor de dicho valor mediante la obtención de los percentiles empíricos 2,5% y 97,5% (IC_{95}). De esta manera, se observó que para que el cultivo de maní alcance balances parciales de N neutros, entre el 66%—72% de su N debe provenir de la FBN (Figura 3.4.B). Solo el ~15% de las observaciones alcanzaron valores de $\text{FBN}_{\%}$ superiores al intervalo mencionado y mostraron valores positivos de balance parcial de N (Figura 3.4.C).

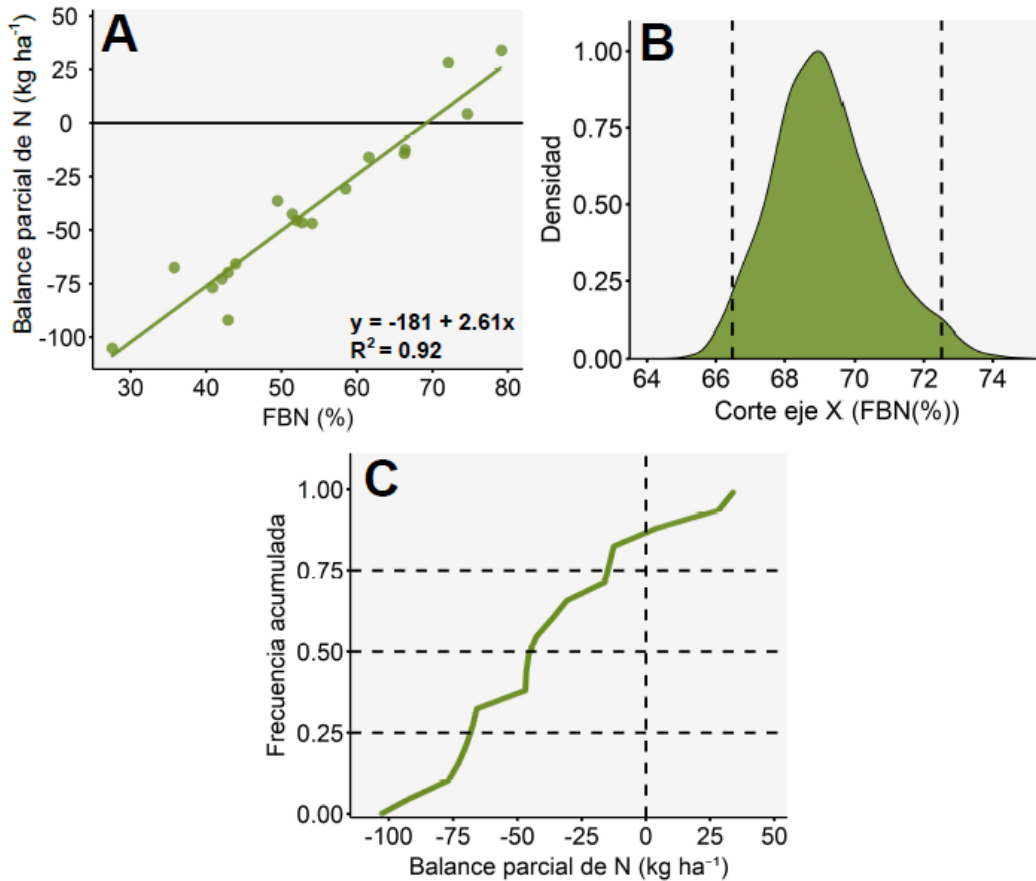


Figura 3. 4. Relación entre el balance parcial de N y la proporción de N fijada (FBN%) para los datos del presente estudio (A). La línea sólida en representa el mejor ajuste del set de datos de Argentina ($n=19$). Los parámetros de la función fueron estimados mediante *bootstrapping*. En B se muestra la distribución empírica del corte con el eje x para el modelo presentado en A. Las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha) (B). En C se muestra la distribución de frecuencia acumulada para el balance parcial de N para el cultivo de maní en Argentina.

3.4. DISCUSIÓN

El estudio expuesto en el presente capítulo fue el primero en abordar tres temas clave para la producción del maní y para los sistemas de producción que incluyan a esta especie en Argentina. Estos temas fueron: *i*) la cuantificación de la FBN% y de la cantidad de N fijada, *ii*) la estimación de la eficiencia en el uso del N y *iii*) el cálculo de los balances de N. El análisis

de estas variables es el primer paso para comprender el rol que juega el maní en los sistemas de producción argentinos y para contar con datos a escala local que permitan reducir la incertidumbre al momento de cuantificar el ingreso de N a los sistemas de producción mediante la FBN a escala global (Herrdige et al., 2008).

El cultivo de maní en Argentina mostró mayor biomasa total y el IC alcanzado fue dos veces superior que en los países estudiados en el capítulo 2. Desde el punto de vista de la economía del carbono en el cultivo, el rendimiento en grano es igual al producto entre la biomasa total y el IC ($Rendimiento = Biomasa\ total \times IC$). El maní contiene mayor cantidad de lípidos en sus granos que el resto de las leguminosas (Unkovich et al., 2010a), por lo tanto, demanda mayor cantidad de energía para producir rendimiento (Penning de Vries et al., 1972), lo cual a su vez reduce su IC (Unkovich et al., 2010a). No obstante, existen otros factores que afectan el IC dentro de una misma especie como los avances en programas de mejoramiento genético, el manejo de insectos y enfermedades, y episodios de estrés por sequía y por altas temperaturas (Sinclair, 1998; Unkovich et al., 2010a; Haro et al., 2017; Cohen et al., 2020). Estos factores pueden explicar el menor IC obtenido en el capítulo 1 para el cultivo de maní a nivel mundial con respecto al obtenido en Argentina, ya que en el capítulo 1 los datos fueron tomados de países con climas tropicales y subtropicales (Cernay et al., 2016; Sayre et al., 2020) con baja adopción de tecnología para la producción de cultivos (Sheahan y Barret, 2016; Magruder, 2018; Macours, 2019). Además, el mayor IC junto con la mayor producción de biomasa total explican el mayor rendimiento del cultivo obtenido en Argentina.

Por otro lado, la eficiencia en el uso del N total aéreo del maní en Argentina fue superior a la obtenida en la base de datos global. Existe una relación positiva entre el IC y el ICN (Araújo y Teixeira, 2003; Ayaz et al., 2004; Tamagno et al., 2017), debido a que la mayor partición de biomasa hacia las semillas con respecto a la biomasa total (mayor IC) implica un ajuste en el metabolismo del N lo cual hace que las plantas particionen más N desde los tejidos vegetativos hacia los reproductivos (mayor ICN) (Sinclair, 1989). Esto explica el mayor ICN observado para el maní en Argentina con respecto a la base de datos global. Además, la eficiencia en el

uso del N puede ser estudiada a partir de la inversa de la concentración de N en granos y el ICN ($N \text{ en granos} / N \text{ en granos} + N \text{ en rastrojo}$) (Sadras, 2006) de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Rendimiento}}{N \text{ total}} = \frac{\text{Rendimiento}}{N \text{ en granos}} \frac{N \text{ en granos}}{N \text{ en granos} + N \text{ en rastrojo}}$$

Dado que el rendimiento y el ICN del maní en Argentina fueron superiores con respecto a los obtenidos con la base de datos global, y la concentración de N en granos fue similar (~4,45%), el cultivo de maní en Argentina mostró una mayor eficiencia en el uso del N. Sin embargo, bajo condiciones en las cuales el N fue el recurso que limitó la producción (regresiones para el cuantil 0,95), las eficiencias mostradas en este estudio y en la base de datos global no fueron diferentes. Esto sugiere una eficiencia máxima en el uso del N total para el cultivo de maní de ~17.5 kg rendimiento kg N total aéreo⁻¹. Este valor fue 1,3 kg rendimiento kg N total aéreo⁻¹ por debajo de la máxima eficiencia en el uso del N total para el cultivo de soja (Ciampitti y Salvagiotti., 2018).

En el presente estudio se mostró que, en promedio, el valor de la FBN% del cultivo de maní en Argentina fue del 53%, con un valor mínimo de 28% y un máximo de 79%. Estudios previos, cuantificando la FBN mediante un balance relativo de N, mostraron valores en un rango de 23 a 61% para el maní en Argentina. Para el cultivo de maní en Australia, se reportaron valores de FBN% entre 36%—47% (Bell et al., 1994; Peoples et al., 1992; Unkovich et al., 2010a). Considerando datos de diferentes países en simultáneo, el valor de la FBN% obtenido para Argentina estuvo por debajo del 58% reportado por Cernay et al. (2016) y Peoples et al. (2021), pero próximo al valor presentado en el Capítulo 2 de esta tesis (52%; Capítulo 2 de esta tesis). Además, se observó que la FBN% no se diferenció entre el cultivo de maní en Argentina y en la base de datos global (estudiada como pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo). Esto fue inesperado debido a que en Argentina el maní se cultiva principalmente en suelos del orden Molisol con un contenido de materia orgánica entre 23 g kg⁻¹—27 g kg⁻¹ y un pH entre 6—6,6 (Sainz Rozas et al., 2019), mientras que los países con climas tropicales y subtropicales incluidos en la base de datos del Capítulo 2 tienen menor contenido de C y

menor pH (Bado et al., 2006; Phoomthaisong et al., 2003; Oteng-Frimpong y Dakora, 2017). Por lo tanto, es esperable una mayor mineralización de N en los suelos de Argentina y como consecuencia una menor FBN% (Salvagiotti et al., 2009). Con respecto a otras leguminosas en Argentina, el maní mostró valores de FBN% por debajo de los reportados para la soja (58%, Collino et al., 2015; 74%, Kehoe et al., 2022), la arveja (59%; Enrico et al., 2020) y la vicia (60%; Enrico et al., 2020).

La cantidad de N fijada reportada en el segundo capítulo fue de 71 kg N ha⁻¹, mientras que en el presente estudio fue de 154 kg N ha⁻¹ aun cuando en Argentina la concentración de N total (concentración de N considerando la biomasa total excluyendo las raíces) y de la FBN% mostraron valores similares con respecto a los presentados en el Capítulo 2. Por lo tanto, dicha diferencia se debió a la mayor producción de biomasa total en Argentina con respecto a la base de datos global, dado que no hubo diferencias entre las pendientes de la relación entre el N fijado aéreo y la biomasa total para las dos bases de datos estudiadas.

El cultivo de maní en Argentina mostró un balance parcial de N de -41 kg N ha⁻¹, el cual fue 79 kg N ha⁻¹ inferior al estimado para el cultivo de maní en la base de datos global (Capítulo 2). Si bien la FBN% fue similar para ambas bases de datos (~52%), se ha demostrado que el balance parcial de N no solo depende de la FBN% y de la cantidad de N fijada, sino también de la partición de biomasa y de N hacia los órganos reproductivos (IC; ICN), y de la concentración de N en el rastrojo (Liu et al., 2019). El mayor rendimiento obtenido del cultivo en Argentina implicó una mayor partición de N hacia los granos (ICN), lo cual condujo a una mayor exportación de N del sistema, generando balances parciales de N negativos en el ~85% de los sitios estudiados. Un estudio realizado en Australia, en el cual el rendimiento, el IC, el ICN y la FBN% del cultivo de maní mostraron valores similares a los obtenidos en este estudio en Argentina, se observaron balances parciales de N negativos en el 75% de los casos (Bell et al., 1994). Diferentes estudios reportaron balances parciales de N para otras especies de leguminosas en Argentina. Enrico et al. (2020) estimaron un valor medio neutro (~0 kg N ha⁻¹) para el cultivo de arveja. Además, para el cultivo de soja, Di Ciocco et al. (2011) estimaron

un balance parcial de N medio de -39 kg N ha^{-1} tomando datos de diez experimentos distribuidos en la región Pampeana. Para el mismo cultivo, Collino et al. (2015) estimaron un balance parcial de N a nivel nacional de -52 kg N ha^{-1} . En un estudio sitio-específico, Kehoe et al. (2022) calcularon un balance parcial de N para el cultivo de soja de 2 kg N ha^{-1} en promedio. Si bien este valor fue 39 kg N ha^{-1} superior al de maní obtenido en el presente capítulo, es necesario considerar que dicha investigación fue conducida en un solo sitio con dos genotipos, mientras que el presente estudio abarcó cuatro genotipos y diez puntos con diferentes ubicaciones geográficas.

Es necesario considerar que los balances parciales de N presentados en este capítulo para el cultivo de maní en Argentina subestiman a los valores reales debido a que no se consideró el N presente en las raíces ni en las rizodeposiciones (Unkovich y Pate, 2000; Crews y Peoples, 2005; Carranca et al., 2015). Por lo tanto, para demostrar la importancia del N en estructuras sub-superficiales, se consideró que el 13% del N total en el cultivo de maní está presente en las raíces y rizodeposiciones (Capítulo 2). Si bien este valor no fue medido en las condiciones de producción del maní en Argentina, cualquier intento por incluir el aporte del N ubicado debajo de la superficie del suelo aumenta la precisión en los cálculos de la contribución de N por parte de las leguminosas a los sistemas de producción. El aporte de N de las raíces y rizodeposiciones produjo un incremento de 21 kg N ha^{-1} en el balance de N y el 31% de las observaciones mostraron valores positivos, aunque el valor medio aun mostró una remoción neta de 21 kg N ha^{-1} (Tabla 3.3). Sin embargo, es esperable que ocurra una remoción de N por parte del cultivo de maní en sistemas con rendimientos elevados como los de Argentina. Esto se debe a que en dichos casos ocurre una mayor partición de N hacia los granos de manera tal que el ICN alcanza valores superiores a la $\text{FBN}\%$, por lo tanto, la cantidad de N exportada en los granos supera a la cantidad de N fijada.

Por otro lado, se realizó la regresión para la relación entre el balance de N y la $\text{FBN}\%$ empleando *bootstrapping* y se calculó el corte de los modelos con el eje x. Este análisis demostró que, al incluir el aporte de N radical, el maní debe fijar 60% de su N para alcanzar

balances de N neutros, con un IC_{95} entre 58—62%. Es decir, para alcanzar balances de N neutros, el maní debe fijar entre ~5—12% menos de N con respecto a no considerar el aporte de N de las raíces y rizodeposiciones. Dicha diferencia fue estadísticamente significativa (Figura Anexo 3.3). Para la soja, Kehoe et al. (2022) determinaron que, para alcanzar balances de N neutros, la $FBN_{\%}$ del cultivo debe ser, en promedio, del 74% sin considerar al N ubicado debajo de la superficie del suelo y del 69% considerando dicha fracción de N. Estos valores fueron superiores a los estimados para el cultivo de maní debido a un mayor ICN de la soja con respecto al maní. Sin considerar el N debajo de la superficie del suelo, el ICN fue del 68% para el maní en este estudio y de 74% para la soja en Kehoe et al. (2022); mientras que considerando al N contenido en raíces y en rizodeposiciones: el ICN fue del 60% para el maní en este estudio y de 69% para la soja en Kehoe et al. (2022).

3.6. CONCLUSIÓN

En este capítulo se estudió la FBN en el cultivo de maní en Argentina y los balances parciales de N, y su relación con variables asociadas a la dinámica del N en el cultivo. El maní en Argentina mostró una eficiencia en el uso del N superior a la obtenida en otros países con climas tropicales y subtropicales (base de datos global) debido a un mayor rendimiento explicado por una mayor producción de biomasa y una mayor partición de ésta (IC) y de N (ICN) hacia los órganos reproductivos. Además, la combinación de una elevada absorción de N junto con una alta eficiencia en el uso del N condujo a una elevada producción de granos, por lo tanto, a una gran cantidad de N exportada del sistema. De esta manera, la cantidad de N fijada por el cultivo de maní no fue suficiente para lograr un aporte neto de N a los sistemas de producción locales. Por lo tanto, no se hallaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis de este capítulo: “aún en condiciones ambientales que generen un mayor crecimiento y mayor cantidad de N fijado en el cultivo de maní, el aporte de la FBN es

insuficiente para obtener balances de N positivos debido a la alta exportación de este nutriente en los granos”.

CAPÍTULO 4: Discusión final

4. CAPÍTULO 4: Discusión final

4.1. Discusión general

La producción de cultivos agrícolas depende del nitrógeno (N), el cual es un factor limitante para el crecimiento de las plantas en los agroecosistemas (Hawkesford et al., 2012). Previo a la revolución industrial, la fijación biológica de N (FBN) fue la principal fuente de N para los organismos vivos (Vitousek et al., 2013). Luego, el ser humano incrementó el ingreso de N a la biosfera mediante la creación de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Se estima que para el año 2014—2015 la cantidad de N aplicada a los cultivos a través de fertilizantes sintéticos fue de 102,5 millones de toneladas métricas (Heffer et al., 2017). Sin embargo, la FBN continúa siendo una fuente importante de N a la biosfera. El ingreso de N a través de la FBN es aproximadamente de 122 millones de toneladas por año, de las cuales 55—60 millones son fijadas por cultivos agrícolas debido a la asociación simbiótica entre *Rizobium* y Leguminosas (Vitousek et al., 2013). Por lo tanto, la FBN es fuente de N importante para mejorar la provisión de este nutriente en los sistemas de producción de cultivos, de manera tal de poder incrementar sus rendimientos (Sinclair y Ruffy, 2012).

Diferentes estudios han mostrado que existe una relación positiva entre la proporción de N fijado (FBN%) y el balance de N en leguminosas (Evans et al., 2001; Walley et al., 2007; Ciampitti y Salvagiotti, 2018). Sin embargo, la contribución de la FBN a los sistemas de producción varía de acuerdo con la especie de leguminosa y las condiciones locales de producción (Anglade et al., 2015). En consecuencia, cuando se realizan estudios a gran escala, se puede arribar a resultados y conclusiones imprecisas con respecto a los aportes de N por parte de la FBN a los sistemas agrícolas (Collino et al., 2015). Por lo tanto, es necesario cuantificar la contribución de la FBN en cada sistema productivo según los principales cultivos que intervienen en el mismo. Esto permite aumentar la precisión en las estimaciones de los balances parciales de N a escala local.

La generación de datos digitales, la informática, los sistemas de comunicación, la movilidad de los científicos y la formación de redes de colaboración condujeron a una evolución exponencial de la ciencia (Fortunato et al., 2018). Esto se tradujo en una gran disponibilidad de artículos científicos que exponen los resultados de numerosos experimentos en distintas temáticas. La revisión formal y sistemática de dicho conocimiento permite resumir los resultados de los estudios, arribar a conclusiones generales y descubrir qué es conocido y qué se desconoce en un determinado campo de estudio (Yuan y Hunt, 2009). Esta forma de abordar el estudio de un tema en particular permite generar un nuevo conocimiento del conocimiento, llamado “metaconocimiento”, que permite reformular la ciencia mediante la identificación de áreas que necesitan ser examinadas nuevamente, la confirmación de teorías y el descubrimiento de nuevos caminos que trascienden las fronteras de una cierta temática (Evans y Foster, 2011).

No obstante, como se mencionó anteriormente, pueden existir discrepancias entre las conclusiones generadas a partir de las revisiones formales y sistemáticas a gran escala y las conclusiones alcanzadas a partir de estudios a nivel local (Collino et al., 2015). Por este motivo, en la presente tesis, en primer lugar, se llevó a cabo un análisis de síntesis cuantitativo para estudiar la FBN y los balances de N a escala global en el cultivo de maní, con el fin de contextualizar a esta especie con relación a otras leguminosas de producción de granos. La base de datos para llevar adelante dicho estudio fue construida a partir de distintos sitios que abarcaron diversas condiciones climáticas, tipos de suelos, genotipos y manejo del cultivo. Por este motivo, las conclusiones generadas para el cultivo de maní a partir del análisis de síntesis presentado en el Capítulo 2 no pueden ser trasladadas de manera fiable a las condiciones particulares de producción en Argentina. Por lo tanto, en segundo lugar, se cuantificó la FBN y los balances de N del cultivo de maní bajo las condiciones de producción de Argentina.

El primer objetivo de esta tesis fue realizar un análisis de síntesis a escala global sobre la contribución de la FBN y la estimación de los balances de N del maní en relación con otras

leguminosas de grano. Si bien la producción de biomasa del cultivo de maní no fue la menor, su IC sí fue el menor entre todas las especies estudiadas. La alta cantidad de lípidos contenidos en los granos del maní demanda un mayor costo energético para producir rendimiento, lo cual reduce su IC (Unkovich et al., 2010a). El bajo IC del maní se tradujo en un rendimiento medio de apenas 1100 kg ha⁻¹, el cual estuvo por debajo del resto las especies. Además, se encontró que el maní tuvo la menor eficiencia en el uso del N total aéreo, mientras que ésta fue similar entre el resto de las leguminosas estudiadas como se puede ver en distintos estudios previos (Stelling et al., 1996; López-Bellido et al., 2003; López-Bellido et al., 2004; Sobkowicz y Śniady, 2004; Koutroubas et al., 2009; Neugschwandtner y Kaul, 2015; Akter et al. 2017; Doaei et al., 2020). El análisis de síntesis demostró que, de las especies incluidas en este estudio, solo el poroto tuvo una FBN% significativamente distinta al resto. Sin embargo, el maní, junto con la lenteja, mostró la mayor brecha entre la FBN% actual y la potencial.

Si bien no se encontró una relación entre el balance parcial de N y la FBN% para el maní, se ha demostrado, en este y otros estudios, que la FBN% está relacionada con el ingreso de N atmosférico al sistema (Evans et al., 2001; Walley et al., 2007; Ciampitti y Salvagiotti, 2008), por lo que llevar los valores de la FBN% a su potencial podría conducir a una mayor frecuencia de aportes netos de N por parte del maní (i.e. balances de N positivos). Sin embargo, se encontró que el balance parcial de N también se relacionó con la concentración de N en el rastrojo y el ICN. Esto demostró que alcanzar valores elevados de FBN% no es condición suficiente para lograr balances parciales de N positivos (Liu et al., 2019). Por lo tanto, el balance parcial de N depende no solo de la FBN% sino también de la partición de N hacia los granos (ICN) y del rendimiento con relación a la biomasa total (IC). Por este motivo, el hecho de que el maní haya mostrado los menores valores de IC e ICN explica que esta especie haya alcanzado la mayor frecuencia de valores positivos en sus balances parciales de N entre las leguminosas estudiadas. Por lo tanto, se hallaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis del planteada en el capítulo 2.” a escala global y en términos relativos, los balances

parciales de N del maní son menores (en todo el rango de la variable aleatoria balance parcial de N) que en otras leguminosas de grano (excluyendo soja) debido a la alta exportación de N en este cultivo por un rendimiento superior en mayor medida que por una mayor concentración de N en los granos.”

Los objetivos del tercer capítulo de esta tesis fueron *i)* “estimar la contribución de la FBN en el cultivo de maní en lotes de producción del centro-sur de Córdoba y su relación con el rendimiento y variables asociadas a la dinámica del N en el cultivo” y *ii)* “calcular los balances parciales de N y su relación con la $FBN_{\%}$ en las condiciones descritas anteriormente”. Este estudio abarcó distintas condiciones de crecimiento del maní que fueron representativas de la principal zona de producción del cultivo en Argentina. Lo más sobresaliente del Capítulo 3 de esta tesis fue que se logró medir por primera vez la proporción y la cantidad de N que provienen de la FBN en el cultivo de maní en Argentina en una gran cantidad de condiciones de campo. Esto, a su vez, permitió por primera vez el cálculo de los balances de N en las condiciones de producción a escala local. Se estimó que el maní fijó entre el 28% —79% de su N, con un valor medio de 53%. La $FBN_{\%}$ (medida como la pendiente de la relación entre el N fijado aéreo y el N total aéreo) no se diferenció de la obtenida en el Capítulo 2 para la base de datos global. Esto ocurrió a pesar de que dichos países tienen climas tropicales o subtropicales (Cernay et al., 2016; Sayre et al., 2020) con menor contenido de C y menor pH que en Argentina (Bado et al., 2006; Phoomthaisong et al., 2003; Oteng-Frimpong y Dakora, 2017; Sainz Rozas et al., 2019) y, por lo tanto, menor aporte de N. Bajo este contexto, es esperable que la FBN sea menor en Argentina debido a la sensibilidad de la FBN a la presencia de nitratos en la solución del suelo (Vessey y Waterer, 1992; Collino et al., 2015).

Por otro lado, también se reportó por primera vez la eficiencia en el uso del N del maní en condiciones de campo en la Argentina, la cual fue superior a la obtenida para el maní en la base de datos global (Capítulo 2). Esto podría ser explicado por la mayor partición de biomasa (IC) y de N (ICN) del maní en Argentina con respecto a los otros países (Sadras, 2006). El mayor IC del maní en Argentina puede deberse a una mayor oferta de recursos (agua y

nutrientes) que reducen la penalización impuesta por el alto costo energético de la producción de granos (Unkovich et al., 2010a) o al resultado de programas de mejoramiento genético (Haro et al., 2017) o a una combinación de ambas. El crecimiento más significativo del cultivo, junto con la mayor partición de biomasa y de N hacia los granos alcanzada en Argentina, condujo a un rendimiento superior con una concentración de N en los granos similar a la mostrada en la base de datos global. Esto se tradujo en una cantidad de N removida en los granos (kg ha^{-1}) en Argentina que superó en $\sim 3,6$ veces la cantidad de N promedio removida en los países estudiados en el Capítulo 2. Mientras que la cantidad de N fijada (kg ha^{-1}) en Argentina fue superior solo en $\sim 2,2$ veces. Por lo tanto, si bien el maní en Argentina fijó mayor cantidad de N, ésta no fue suficiente para compensar la gran cantidad de este nutriente extraído en los granos debido al elevado rendimiento alcanzado. Por lo tanto, no se hallaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis del capítulo 3: “aún en condiciones ambientales que generen un mayor crecimiento y mayor cantidad de N fijado en el cultivo de maní, el aporte de la FBN es insuficiente para obtener balances de N positivos debido a la alta exportación de este nutriente en los granos”.

Debido a los rendimientos elevados alcanzados en Argentina, el nivel de la $\text{FBN}\%$ no fue suficiente para compensar la cantidad de N exportada en los granos del maní. Por lo tanto, se observó una frecuencia alta de balances de N negativos. Frente a este escenario, es necesario considerar que el rendimiento de las leguminosas se relaciona con la cantidad de N total, independientemente del origen de dicho N (nitratos o FBN) (Rotundo et al., 2014), de manera tal que una mayor cantidad de N total se traduce en un mayor rendimiento. El incremento en la $\text{FBN}\%$ no necesariamente implica un incremento en la cantidad de N total en el cultivo, pero sí una mayor cantidad de N proveniente de la atmósfera. Por lo tanto, es posible lograr aumentos en el rendimiento del maní mediante un incremento en la cantidad de N total alcanzada por el cultivo y, al mismo tiempo, mejorar los balances de N mediante un aumento en la $\text{FBN}\%$. Este puede ser el puntapié inicial para programas de mejoramiento genético de

maní en Argentina, con el objetivo de lograr aumentos en el rendimiento del cultivo alcanzando una mayor producción y cuidando la fertilidad nitrogenada de los suelos.

En resumen, los resultados de esta tesis aportan nuevos conocimientos con respecto a: (i) la comparación cuantitativa de diferentes especies de leguminosas a escala global en cuanto a su eficiencia en el uso del N, su habilidad de fijar N (FBN%) y el rol que juegan en el mantenimiento de la fertilidad de los suelos en los sistemas de producción y cuáles son las variables del cultivo que más se relacionan con dicho rol, y (ii) la cuantificación de la eficiencia en el uso del N, de la capacidad de fijar N (FBN) y de los balances de N del cultivo de maní bajo las condiciones particulares de producción de Argentina.

4.2. Futuras investigaciones

Las evidencias obtenidas en esta tesis abren nuevas perspectivas de investigación en cuanto a: (i) la partición alométrica de la biomasa y del N hacia los órganos reproductivos en las distintas leguminosas, con el fin de alcanzar un mayor conocimiento de los aportes potenciales de estas especies al balance de N en los sistemas de rotación de cultivos; (ii) la cuantificación del N aportado por las raíces y rizodeposiciones para aumentar la precisión en los cálculos de los balances de N; (iii) la detección de rasgos de interés para ser incluidos en programas de mejoramiento genético de maní con el objetivo de mejorar el rendimiento y los balances de N del cultivo en Argentina; y (iv) el estudio de la influencia del cultivo de maní sobre la respuesta de los cereales a la fertilización con N con el fin de optimizar el manejo de dicha práctica en los sistemas de producción argentinos que incluyan al cultivo de maní.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abaidoo, R., Dare, M., Killani, S., Opoku, A., 2017. Evaluation of early maturing cowpea (*Vigna unguiculata*) germplasm for variation in phosphorus use efficiency and biological nitrogen fixation potential with indigenous rhizobial populations. *The Journal of Agricultural Science*, 155, 102-116. <https://doi:10.1017/S002185961500115X>.
- Akter, Z., Lupwayi, N.Z., Balasubramanian, P.M., 2017. Nitrogen use efficiency of irrigated dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes in southern Alberta. *Canadian Journal of Plant Science*. 97, 610-619. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0254>.
- Alexandre, A., Oliveira, S., 2013. Response to temperature stress in rhizobia. *Critical Reviews in Microbiology*. 39, 219–228. <https://doi:10.3109/1040841X.2012.702097>.
- Anglade, J., Billen, G., Garnier, J., 2015. Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*. 6, 37. <https://doi.org/10.1890/ES14-00353.1>.
- Angus J.F., Kirkegaard J.A., Hunt J.R., Ryan M.H., Ohlander L., Peoples M.B., 2015. Break crops and rotations for wheat. *Crop and Pasture Science*, 66, 523-552. <https://doi.org/10.1071/CP14252>.
- Angus, J.F., Grace, P.R., 2017. Nitrogen balance in Australia and nitrogen use efficiency on Australian farms. *Soil Research*. 55, 435–450. <https://doi.org/10.1071/SR16325>.
- Aquino Alves, L., Ambrosini, V.G., de Oliveira Denardin, L.G., Moro Flores, J.P., Posselt Martins, A., Filippi, D., Bremm, C., de Faccio Carvalho, P.C., Duarte Farias, G., Ciampitti, I.A., Tiecher, T., 2021. Biological N₂ fixation by soybeans grown with or without liming on acid soils in a no-till integrated crop-livestock system. *Soil and Tillage Research*, 209, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104923>.
- Aranjuelo, I., Arrese-Igor, C., Molero, G., 2014. Nodule performance within a changing environmental context. *Journal of Plant Physiology*, 171, 1076–1090. <https://doi:10.1016/j.jplph.2014.04.002>.
- Araújo, A.P., Teixeira, M.G., 2003. Nitrogen and phosphorus harvest indices of common bean cultivars: Implications for yield quantity and quality. *Plant and Soil*, 257, 425–433. <https://doi.org/10.1023/A:1027353822088>.
- Ayaz, S., McKenzie, B.A., Hill, G.D., McNeil, D.L., 2004. Nitrogen distribution in four grain legumes. *The Journal of Agricultural Science*, 142(3), 309–317. <https://doi:10.1017/s0021859604004356>.
- Bado, B.V., Bationo, A., Cescas, M.P., 2006. Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biology and Fertility of Soils*, 43, 171-176. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0076-7>.
- Barron, J.E., Pasini, R.S., Davis, D.W., Stuthman, D.D., Graham, P.H., 1999. Response to selection for seed yield and nitrogen (N₂) fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research*. 62, 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00009-X).
- Bell, M.J., Wright, G.C., Suryantini, Peoples, M.B., 1994. The N₂-fixing capacity of peanut cultivars with differing assimilate partitioning characteristics. *Australian Journal of Agricultural Research* 45, 1455-1468. <https://doi.org/10.1071/AR9941455>.
- Bellenger, J.P., Darnajoux, R., Zhang, X., Kraepiel, A.M.L., 2020. Biological nitrogen fixation by alternative nitrogenases in terrestrial ecosystems: a review. *Biogeochemistry*. 149(1), 53–73. <https://doi:10.1007/s10533-020-00666-7>.

- Billen, G., Lassaletta, L., Garnier, J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system: nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>.
- Blesh, J., Drinkwater, L.E., 2013. The impact of nitrogen source and crop rotation on nitrogen mass balances in the Mississippi River Basin. *Ecological Applications*, 23(5), 1017–1035. <https://doi.org/10.1890/12-0132.1>.
- Bonku, R., Yu, J., 2019. Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition. *Food Science and Human Wellness*, 9(1), 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.12.005>.
- Boote, K.J., 1982. Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L). *Peanut Science*, 9(1), 35–39. <https://doi.org/10.3146/i0095-3679-9-1-11>.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39–45. <https://doi.org/10.1097/00010694-94501000-00006>.
- Bremner, J., 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science*, 55(1), 11-33. <https://doi.org/10.1017/S0021859600021572>.
- Cade, B.S., Noon, B.R., 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1, 412–420. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0412:AGITQR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0412:AGITQR]2.0.CO;2).
- Carranca, C., Torres, M.O., Madeira, M., 2015. Underestimated role of legume roots for soil N fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1095-1102. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0297-y>.
- Cernay, C., Pelzer, E., Makowski, D., 2016. A global experimental dataset for assessing grain legume production. *Sci Data*. 3:160084. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.84>
- Chambers, J.M., 1992. Linear models en Chambers J.M. y Hastie, T.J. (Ed), *Statistical Models in S*. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Chen, C., Lawes, R., Fletcher, A., Oliver, Y., Robertson, M., Bell, M., Wang, E., 2016. How well can APSIM simulate nitrogen uptake and nitrogen fixation of legume crops?. *Field Crops Research*, 187, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.007>.
- Ciampitti, I. A., Salvagiotti, F., 2018. New Insights into Soybean Biological Nitrogen Fixation. *Agronomy Journal*. 110, 1185–1196. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>.
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133, 48–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>.
- Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C., Fritschi, F.B., Mittler, R., 2020. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*. 171, 66-76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>
- Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W., 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil*. 392:239–252. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2459-8>.
- Cottingham, K.L., Lennon, J.T., Brown, B.L., 2005. Knowing when to draw the line: designing more informative ecological experiments. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 3, 145-152. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0145:KWTDTL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0145:KWTDTL]2.0.CO;2)
- Crews, T., Peoples, M., 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72:101–120. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-6480-1>
- Cumming, G., Finch, S., 2005. Inference by Eye: Confidence Intervals and How to Read Pictures of Data. *American Psychologist*, 60(2), 170–180. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.60.2.170>.

- Davies-Barnard, T., Friedlingstein, P., 2020. The Global Distribution of Biological Nitrogen Fixation in Terrestrial Natural Ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2019GB006387. <https://doi.org/10.1029/2019GB006387>.
- Di Ciocco, C., Alvarez, R., Andrada, Y., Momo, F., 2004. Nitrogen balance in a soybean crop. *Ciencia del Suelo* 22:48–51.
- Di Ciocco, C., Coviella, C., Coviella, C., Penon, E., Diaz-Zorita, M., Lopez, S., Lopez, S., 2008. Biological fixation of nitrogen and N balance in soybean crops in the pampas region. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6, 114–119.
- Di Ciocco, C., Penón, E., Coviella, C., Lopez, S., Diaz-Zorita, M., Momo, F., Alvarez, R., 2011. Nitrogen fixation by soybean in the Pampas: relationship between yield and soil nitrogen balance. *Agrochimica*, 55, 305–313.
- Divito, G.A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H. y Sadras, V.O. 2016. Soybean shows an attenuated nitrogen dilution curve irrespective of maturity group and sowing date. *Field Crops Research*, 186: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.004>.
- Divito, G.A., Sadras, V.O., 2014. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 156, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.004>.
- Doaei, F., Nakhzari Moghaddam, A., Rahemi karizaki, A., Aldaghi, M., 2020. Environmental and nutritional effects on yield and nitrogen efficiency of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a warm and semi-arid climate of Iran. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 2610-2621, <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793177>.
- Efron, B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *Ann. Statist.* 7(1), 1–26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>.
- Efron, B., Tibshirani, R., 1993. *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall. NY, USA, London, 453 pp. ISBN 0-412-04231-04232.
- Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvaggiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *European Journal of Agronomy*, 115, 126016. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126016>.
- Evans, J.A., Foster, J.G., 2011. Metaknowledge. *Science*, 331, 721–725. <https://doi.org/10.1126/science.1201765>.
- Evans, J., McNeill, A. M., Unkovich, M. J., Fettell, N. A., Heenan, D. P., 2001. Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41, 347-359. <https://doi.org/10.1071/EA00036>.
- Fan, J., McConkey, B.G., St. Luce, M., Brandt, K., 2020. Rotational benefit of pulse crop with no-till increase over time in a semiarid climate. *European Journal of Agronomy*, 121, 126155. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126155>.
- FAO, 2021. FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome Available at: <http://www.fao.org>, Accessed date: February 2021.
- Faraway, J.J., 2014. *Linear models with R*. Chapman & Hall/CRC Press, NY, USA. 270 pp. ISBN 9781439887332.
- Fischer, R.A., Connor, D.J., 2018. Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years. *Field Crops Research*, 222(1), 121–142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.008>.
- Fortunato, S., Bergstrom, C.T., Börner, K., Evans, J.A., Helbing, D., Milojević, S., Petersen, A.M., et al., 2018. Science of science. *Science*, 359(6379), eaao0185. <https://doi.org/10.1126/science.aao0185>.

- Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J.B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30, 57–66. <https://doi.org/10.1051/agro/2009003>
- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Steitzinger, S.P., Asner, G.P., et al., 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70, 153–226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>.
- Granhall, U., 1981. Biological nitrogen fixation in relation to environmental factors and functioning of natural ecosystems. *Ecological Bulletins*. 33, 131–144.
- Guinet, M., Nicolardot, B., Voisin, A.S., 2020. Nitrogen benefits of ten legume pre-crops for wheat assessed by field measurements and modelling, *European Journal of Agronomy*, 120, 126151. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126151>.
- Hardarson, G., Atkins, C. 2003. Optimising biological N₂ fixation by legumes in farming systems. *Plant and Soil*. 252, 41–54. <https://doi.org/10.1023/A:1024103818971>.
- Haro, R.J., Baldessari, J., Otegui, M.E., 2017. Genetic improvement of peanut in Argentina between 1948 and 2004: Light interception, biomass production and radiation use efficiency. *Field Crops Research*, 204, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.021>.
- Hawkesford, M., Horts, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I., White, P., 2012. Functions of Macronutrients en Marschner, P. (Ed), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3^a ed.). 135–189. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>.
- Heffer, P., Gruère, A., Roberts, T., 2017. Assessment of fertilizer use by crop at the global level. International Fertilizer Association (IFA) and International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- Herridge D.F., Turpin J.E., Robertson M.J., 2001. Improving nitrogen fixation of crop legumes through breeding and agronomic management: analysis with simulation modelling. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41, 391-401. <https://doi.org/10.1071/EA00041>.
- Herridge, D.F., Giller, K.E., Jensen, E.S., Peoples, M.B., 2022. Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes II. Coefficients, templates and estimates for soybean, groundnut and pulses. *Plant Soil*, 474, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05166-7>.
- Herridge, D.F., Peoples, M.B., Boddey, R.M., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>.
- Herridge, D.F., Rupela, O.P., Serraj, R., Beck, D.P., 1994. Screening techniques and improved biological nitrogen fixation in cool season food legumes. *Euphytica*, 73, 95-108. <https://doi.org/10.1007/BF00027186>.
- Hossain, Z., Wang, X., Hamel, C., Knight, J.D., Morrison, M.J., Gan, Y., 2016. Biological nitrogen fixation by pulse crops on semiarid Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 97, 119-131. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0185>.
- Imsande, J., 1989. Rapid dinitrogen fixation during soybean pod fill enhances net photosynthetic output and seed yield: a new perspective. *Agronomy Journal*. 81: 549–556. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040001x>.
- Jensen, E.S., 1987. Seasonal patterns of growth and nitrogen fixation in field-grown pea. *Plant Soil*. 101: 29–37. <https://doi.org/10.1007/BF02371027>.
- Jensen, E.S., Carlsson, G., Hauggaard-Nielsen, H., 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 40, 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>.
- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Boddey, R.M., Gresshoff, P.M., Hauggaard-Nielsen, H., Alves, B.J.R., Morrison, M.J., 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of

- feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 329–364. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0056-7>.
- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, 115, 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.008>.
- Kelm, D.M., Loges, D.R., Taube, P.D.F., 2008. Comparative analysis of conventional and organic farming systems: Nitrogen surpluses and nitrogen losses. *Cultivating the Future Based on Science: 2nd Conference of the International Society of Organic Agriculture Research ISOFAR*, Modena, Italy, June 18–20, 2008. <http://orgprints.org/11679/>.
- Kennedy, P., Leonforte, A., Butsch, M., 2015. Plant breeding for biological nitrogen fixation: A review, in de Bruijn, F.R. (Ed.), *Biological nitrogen fixation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, pp. 1071–1076. <https://doi.org/10.1002/9781119053095.ch106>.
- Koenker, R., 2021. *quantreg: Quantile Regression*. R package version 5.83. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>
- Koenker, R., Bassett, G., 1978. Regression Quantiles. *Econometrica*. 46, 1, 33–50. <https://doi.org/10.2307/1913643>
- Koenker, R., D’Orey, V., 1987. Computing regression quantiles. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 36, 383-393. <https://doi.org/10.2307/2347801>
- Koutroubas, S.D., Papageorgiou, M., Fotiadis, S., 2009. Growth and nitrogen dynamics of spring chickpea genotypes in a Mediterranean-type climate. *Journal of Agricultural Science*, 147, 445-458. <https://doi:10.1017/S00218596090008739>.
- Kuhn, M., Chow, F., Wickham, H., RStudio, 2020. *rsample: General Resampling Infrastructure*. CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/rsample/rsample.pdf>.
- Lin, L., 2018. Bias caused by sampling error in meta-analysis with small sample sizes. *PLoS ONE* 13, 9, 0204056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204056>
- Liu Y., Wu L., Baddeley J.A., Watson C.A., 2011. Models of Biological Nitrogen Fixation of Legumes. In: Lichtfouse E., Hamelin M., Navarrete M., Debaeke P. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Dordrecht, pp. 883-905. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_39.
- Liu, L., Knight, J.D., Lemke, R.L., Farrell, R. E., 2019. A side-by-side comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume crops. *Plant and Soil*. 442, 169–182. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04167-x>.
- López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Castillo, J.E., López-Bellido, F.J., 2004. Chickpea response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat: II. Soil nitrate, N uptake and influence on wheat yield. *Field Crops Research*, 88, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.012>.
- López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., López-Bellido, F.J., Castillo, J.E., 2003. Faba Bean (*Vicia faba* L.) Response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 95, 1253-1261. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1253>.
- Macours, K., 2019. Farmers’ Demand and the Traits and Diffusion of Agricultural Innovations in Developing Countries. *Annual Review of Resource Economics*, 11, 483–499. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094045>.
- MacWilliam, S., Wismer, M., Kulshreshtha, S., 2014. Life cycle and economic assessment of Western Canadian pulse systems: The inclusion of pulses in crop rotations. *Agricultural Systems*, 123, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.08.009>.
- Magruder, J.R., 2018. An Assessment of Experimental Evidence on Agricultural Technology Adoption in Developing Countries. *Annual Review of Resource Economics*, 10, 299–316. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023202>.

- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2021. Estimaciones Agrícolas (Acceso 1 Marzo 2022). CABA, Buenos Aires, Argentina.
- Munjonji, L., Ayisi, K.K., Haesaert, G., Boeckx, P., 2018. Screening cowpea genotypes for high biological nitrogen fixation and grain yield under drought conditions. *Agronomy Journal*, 110, 1925-1935. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0037>.
- Munjonji, L., Ayisi, K.K., Haesaert, G., Boeckx, P., 2018. Screening cowpea genotypes for high biological nitrogen fixation and grain yield under drought conditions. *Agronomy Journal*, 110, 1925-1935. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0037>.
- Neugschwandtner, R.W., Kaul, H.P., 2015. Nitrogen uptake, use and utilization efficiency by oat-pea intercrops. *Field Crops Research*, 179, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.018>.
- O'Brien, S.F., Yi, Q.L., 2016. How do I interpret a confidence interval? *Transfusion*, 56(7), 1680–1683. <https://doi:10.1111/trf.13635>.
- Oteng-Frimpong, R., Dakora, F.D., 2018. Selecting elite groundnut (*Arachis hypogaea* L) genotypes for symbiotic N nutrition, water-use efficiency and pod yield at three field sites, using ¹⁵N and ¹³C natural abundance. *Symbiosis*, 75, 229-243. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0524-1>.
- Parsons, R., Stanford, A., Raven, A.J., Sprent, J.I., 1993. Nodule growth and activity may be regulated by a feedback mechanism involving phloem nitrogen. *Plant Cell and Environment*. 16, 125–136. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00854.x>.
- Penning de Vries, F.W.T., 1972. Respiration and growth, en Rees, A.P. (Ed.), *Crop Processes in Controlled Environments*. Academic Press, New York, pp. 327–347.
- Peoples, M.B., Bell, M.J., Bushby, H.V.A., 1992. Effect of rotation and inoculation with *Bradyrhizobium* on nitrogen fixation and yield of peanut (*Arachis hypogaea* L., cv. Virginia Bunch). *Australian Journal of Agricultural Research*, 43, 595-607. <https://doi.org/10.1071/AR9920595>.
- Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dakora, F.D., Bhatpara, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D.F., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*, 48, 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF03179980>.
- Peoples, M.B., Giller, K.E., Jensen, E.S., Herridge, D.F., 2021. Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes: I. Reliance on nitrogen fixation of soybean, groundnut and pulses. *Plant Soil*, 469, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05167-6>.
- Peoples, M.B., Herridge, D.F., 1990. Nitrogen fixation by legumes in tropical and subtropical agriculture. *Advances in Agronomy*, 44, 155-223. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60822-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60822-6).
- Peoples, M.B., Khan, D.F., Fillery, I.R.P., 2014. The use of isotopic techniques to quantify the potential contribution of legumes to the mitigation of climate change and future food security, In: Heng, L.K., Sakadevan, K., Dercon, G., Nguyen, M.L. (Eds.), *Managing Soils for Food Security and Climate Change Adaptation and Mitigation*, Rome, pp. 55-60
- Phoomthaisong, J., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Cadisch, G., Patanothai, A., 2003. Attributes affecting residual benefits of N₂-fixing mungbean and groundnut cultivars. *Biology and Fertility of Soils*, 39, 16-24. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0676-4>.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reed, S.C., Cleveland, C.C., Townsend, A.R., 2011. Functional ecology of free-living nitrogen fixation: A contemporary perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 42(1), 489–512. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145034>.

- Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T.H., Hill, B., Pauls, K.P., 2020. Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. *Frontiers in Plant Sciences*, 11, 1172. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01172>.
- Renard, D., Tilman, D., 2019. National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, 571, 257–260. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>.
- Revelle, W. (2021) psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.R-project.org/package=psych>, Version = 2.1.9.
- Rochester, I.J., Peoples, M.B., Constable, G.A., Gault, R.R., 1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 253–260. <https://doi.org/10.1071/EA97132>.
- Rodriguez, C., Carlsson, G., Englund, J.E., Flöhr, A., Pelzer, E., Jeuffroy, M.H., Makowski, D., Jensen, E. S., 2020. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 118, 126077. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>.
- Rohatgi, A., 2020. WebPlotDigitizer (Version 4.3) [Computer software]. Pacifica, CA, USA. Retrieved from <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- Rotundo, J.L., Borrás, L., DeBruin, J.D., Pedersen, P., 2014. Soybean nitrogen uptake and utilization in Argentina and united states cultivars. *Crop Science*. 54, 1153–1165. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.09.0618>.
- Sadras, V.O., 2006. The N:P stoichiometry of cereal, grain legume and oilseed crops. *Field Crops Research*, 95(1), 13–29. <https://doi:10.1016/j.fcr.2005.01.020>.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N., Wyngaard, N., 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Simposio de Fertilidad 2019, Fertilizar Asociación Civil. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/11824/INTA_CRBsAsSur_EEA_Balcarce_Sainz%20Rozas_HR_Relevamiento_determinaci%c3%b3n_propiedades_suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A., 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>.
- Salvagiotti, F., Magnano, L., Ortez, O., Enrico, J., Barraco, M., Barbagelata, P., Condori, A., Di Mauro, G., Manlla, A., Rotundo, J., García, F.O., Ferrari, M., Gudejl, V., Ciampitti, I., 2021. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy*. 127, 126289. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126289>
- Salvagiotti, F., Specht, J.E., Cassman, K.G., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A., 2009. Growth and nitrogen fixation in high yielding soybean: impact of nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 101:958–970. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0173x>.
- Santachiara, G., Salvagiotti, F., Rotundo, J.L., 2019. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 240, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.006>.
- Sayre, R., Karagulle, D., Frye, C., Boucher, T., Wolff, N.H., Breyer, S., Wright, D., et al., 2020. An assessment of the representation of ecosystems in global protected areas using new maps of World Climate Regions and World Ecosystems. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00860. <https://doi:10.1016/j.gecco.2019.e00860>.

- Schenker, N., Gentleman, J.F., 2001. On Judging the Significance of Differences by Examining the Overlap Between Confidence Intervals. *The American Statistician*, 55(3), 182–186. <https://doi:10.1198/000313001317097960>.
- Schultze, M., Kondorosi, E., Ratet, P., Buiré, M., Kondorosi, A., 1994. Cell and Molecular Biology of *Rhizobium*-Plant. *International Review of Citology*, 156, 1–75. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(08\)62252-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)62252-4).
- Sheahan, M., Barrett, C.B., 2016. Ten striking facts about agricultural input use in Sub-Saharan Africa. *Food Policy*, 67, 12–25. <https://doi:10.1016/j.foodpol.2016.09.010>.
- Shearer, G., Kohl, D., 1986. N₂-Fixation in Field Settings: Estimations Based on Natural¹⁵N Abundance. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(6), 699. <https://doi:10.1071/pp9860699>.
- Sinclair, T.R., 1998. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Science*, 38, 638–643. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800030002x>.
- Sinclair, T.R., de Wit, C.T., 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science*, 189, 90-98. <https://doi.org/10.1126/science.189.4202.565>
- Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science*, 29, 90–98. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010023x>.
- Sinclair, T.R., Rufty, T.W., 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security*, 1(2), 94–98. <https://doi:10.1016/j.gfs.2012.07.001>.
- Sinclair, T.R., Vadez, V., 2012. The future of grain legumes in cropping systems. *Crop and Pasture Science*, 63, 501-512. <https://doi.org/10.1071/CP12128>
- Slattery J.F., Coventry D.R. Slattery W.J., 2001. Rhizobial ecology as affected by the soil environment. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41, 289-298. <https://doi.org/10.1071/EA99159>.
- Sobkowicz, P., Śniady, R., 2004. Nitrogen uptake and its efficiency in triticale (*Triticosecale* Witt.) – field beans (*Vicia faba* var. minor L.) intercrop. *Plant, Soil and Environment*, 50, 500-506.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Soltani, A., Robertson, M.J., Manschadi, A.M., 2006. Modeling chickpea growth and development: Nitrogen accumulation and use. *Field Crops Research*, 99, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.006>.
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., Pisante, M., 2017. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 2. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>.
- Stelling, D., Wang, S. H., Römer, W., 1996. Efficiency in the use of phosphorus, nitrogen and potassium in topless faba beans (*Vicia faba* L.) – variability and inheritance. *Plant Breeding*, 115, 361-366. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1996.tb00934.x>.
- Suchoszek-Lukaniuk, K., Jaromin, A., Korycińska, M., Kozubek, A., 2011, Nuts and seeds in health and disease prevention en Preedy, V.R., Watson, R.R., Patel, V.B. (Ed), *Health Benefits of Peanut (Arachis hypogaea L.) Seeds and Peanut Oil Consumption*. 873–880. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375688-6.10103-3>.
- Tamagno, S., Balboa, G.R., Assefa, Y., Kovács, P., Casteel, S.N., Salvagiotti, F., García, F.O., Stewart, W.M., Ciampitti, I.A., 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. *Field Crops Research*, 200, 18–27. <https://doi:10.1016/j.fcr.2016.09.019>.

- Thompson, B.D., Siddique, K.H.M., 1997. Grain legume species in low rainfall Mediterranean-type environments II. Canopy development, radiation interception, and dry-matter production. *Field Crops Research*, 54, 189-199. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00048-8).
- Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Denton, M.D., 2019. Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes? A review. *Soil and Tillage Research*, 185, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.006>.
- Ueli A. Hartwig (1998). The regulation of symbiotic N₂ fixation: a conceptual model of N feedback from the ecosystem to the gene expression level. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 1(1), 92–100. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00054>.
- Unkovich, M., Herridge, D.F., Peoples, M.B., Boddey, R.M., Cadisch, G., Giller, K., Alves, B., Chalk, P.M., 2008. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. *ACIAR Monograph No.136*. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- Unkovich, M., Baldock, J., Forbes, M., 2010a. Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: Examples from Australian agriculture. *Advances in Agronomy*. 105, 173– 219. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05005-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05005-4)
- Unkovich, M.J., Baldock, J., Peoples, M.B., 2010b. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant and Soil*, 329, 75–89. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0136-5>.
- Unkovich, M.J., Baldock, J., Peoples, M.B., 2010b. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant and Soil*, 329, 75–89. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0136-5>.
- Unkovich, M.J., Pate, J.S., 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Research*, 65, 211-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00088-X).
- van Kessel, C., Hartley, C., 2000. Agricultural management of grain legumes: Has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research*, 65:165-181. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00085-4).
- Vessey, J.K., Waterer, J., 1992. In search of the mechanism of nitrate inhibition of nitrogenase activity in legume nodules: Recent developments. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 171–176. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08780.x>.
- Vitousek, P.M., Menge, D.N.L., Reed, S.C., Cleveland, C.C., 2013. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130119–20130119. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0119>
- Voisin, A.S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.H., Magrini, M.B., Meynard, J.M., Mougél, C., Pellerin, S., Pelzer, E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 361-380. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0189-y>.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–37.
- Walley, F.L., Clayton, G.W., Miller, P.R., Carr, P.M., Lafond, G.P., 2007. Nitrogen economy of pulse crop production in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 99, 1710-1718. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0314s>.
- Warton, D.I., Duursma, R.A., Falster, D.S., Taskinen, S., 2012. smatr 3 - an R package for estimation and inference about allometric lines. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 257-259. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00153.x>.

- Warton, D.I., Weber, N.C., 2002. Common slope tests for bivariate errors-in-variables models. *Biometrical Journal* 44, 161–174. [https://doi.org/10.1002/1521-4036\(200203\)44:2<161::AID-BIMJ161>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-4036(200203)44:2<161::AID-BIMJ161>3.0.CO;2-N)
- Warton, D.I., Wright, I.J., Falster, D.S, Westoby, M., 2006. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, 81, 259-291. <https://doi:10.1017/S1464793106007007>
- Wilkinson, G.N., Rogers, C.E., 1973. Symbolic descriptions of factorial models for analysis of variance. *Applied Statistics*, 22, 392–399. <https://doi.org/10.2307/2346786>.
- Xu, G., Fan, X., Miller, A.J., 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*. 63, 153-182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>
- Yang, C., Bueckert, R., Schoenau, J., Diederichsen, A., Zakeri, H., Warkentin, T.D., 2017. Evaluation of growth and nitrogen fixation of pea nodulation mutants in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 97, 1121-1129. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0383>.
- Yuan, M.D., Hunt, R.H., 2009. Systematic reviews: the good, the bad, and the ugly. *The American Journal of Gastroenterology*, 104, 1086–1092. <http://doi:10.1038/ajg.2009.118>.
- Zander, P., Amjath-Babu, T.S., Preissel, S., Reckling, M., Bues, A., Schläfke, N., Kuhlman, T., Bachinger, J., Uthes, S., Stoddard, F., Murphy-Boekern, D., Watson, C., 2016. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: a review. *Agronomy Sustainable Development*, 36, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0365-y>.
- Zapata, F., Danso, S.K.A., Hardarson, G. y Fried, M. 1987. Time course of nitrogen fixation in field-grown soybean using nitrogen-15 methodology. *Agronomy Journal*. 79: 172–177. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900010035x>.
- Zhang, X., Davidson, E.A., Zou, T., Lassaletta, L., Quan, Z., Li, T., Zhang, W., 2020. Quantifying Nutrient Budgets for Sustainable Nutrient Management. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2018GB006060. <https://doi.org/10.1029/2018GB006060>

6. ANEXO

Tabla Anexo 1. 1. Parámetros de las regresiones lineales que describen la relación entre el balance parcial de N (PNB, por sus siglas en inglés) y la biomasa total aérea, la biomasa de rastrojo, el índice de cosecha (IC) y el N total aéreo. Las regresiones generales y de cada especie se informaron solamente cuando fueron significativas.

Relación (y;x)	Especies	n	Pendiente	IC ₉₅ de la pendiente ^a	Intersección (kg N)	IC ₉₅ de la intersección ^a	r ²
			<u>kg N Mg⁻¹</u>				
PNB vs Biomasa total aérea	Haba	76	16.4	13.4, 20.2	-88.9	-114.0, -63.8	0.17**
	Arveja	96	18.6	14.3, 21.6	-97.7	-117.7, -77.7	0.28**
	Maní	15	9.4	6.5, 13.4	-19.4	-43.7, 4.1	0.62**
PNB vs Biomasa de rastrojo	Todas las especies	354	22.1	20.2, 24.3	-71.9	-80.4, -63.4	0.20**
	Garbanzo	39	18.9	14.1, 25.2	-59.0	-74.6, -43.2	0.23**
	Haba	76	25.8	20.8, 31.9	-82.4	-106.7, -58.2	0.15**
	Arveja	96	25.1	21.7, 28.9	-77.6	-91.5, -63.8	0.50**
	Maní	15	12.2	9.1, 16.2	-17.4	-35.8, 0.90	0.76**
			<u>kg N %⁻¹</u>				
PNB vs IC	Todas las especies	354	-3.5	-3.8, -3.1	140.6	127.1, 154.0	0.18**
	Garbanzo	39	-2.3	-2.9, -1.8	79.1	55.5, 102.7	0.49**
	Poroto	17	-2.5	-3.6, -1.7	67.9	33.9, 101.7	0.57**
	Caupí	29	-4.0	-5.5, -2.9	159.7	110.3, 209.1	0.30**
	Arveja	96	-3.8	-4.5, -3.2	168.5	139.7, 197.4	0.32**
Lenteja	62	-2.2	-2.8, -1.7	85.9	67.1, 104.8	0.21**	
			<u>kg N kg N⁻¹</u>				
PNB vs N total aéreo	Todas la especies	410	0.51	0.47, 0.56	-65.6	-73.2, -57.9	0.17**
	Lupino azul	18	0.85	0.57, 1.12	-150.9	-220.4, -73.5	0.40**
	Caupí	38	0.50	0.37, 0.67	-40.9	-60.4, -21.3	0.21*
	Haba	80	0.48	0.39, 0.58	-69.5	-88.5, -50.6	0.28**
	Arveja	104	0.63	0.54, 0.74	-88.0	-104.7, -71.4	0.33**
Maní	24	0.41	0.29, 0.58	-21.6	-45.8, 2.6	0.34**	

^a IC₉₅ es el intervalo de confianza (nivel de significación, $\alpha = 0,05$).

Tabla Anexo 1. 2. N del cultivo debajo de la superficie del suelo (N subsuperficial) como porcentaje del N total (parte aérea + raíces), y el promedio del factor raíz de acuerdo a cada método empleado para medir el N y como promedio de todos los métodos. **Factor raíz = 1 + $\left(\frac{N \text{ en raíces}}{N \text{ total aéreo}}\right)$.** El N total (parte aérea + raíces) se obtiene multiplicando el N total aéreo por el factor raíz.

Método	Condiciones de crecimiento	N subsuperficial (% N total)	Media del factor raíz		Referencia
			Por método	En general	
Lupino azul (<i>Lupinus angustifolius</i>)					
N marcado (¹⁵ N)					
¹⁵ N alimentación por tallo	Invernadero	13	1.32	1.21	Foyjunessa et al., 2018
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	26			Russell and Fillery 1996a
<i>Cotton-wick</i>	Shelters	28			Russell and Fillery 1996b
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	29	McNeill and Fillery, 2008		
Recuperación física					
Recuperación física	Campo	13	1.10		Unkovich et al., 1994
Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i>)					
N marcado (¹⁵ N)					
¹⁵ N alimentación por tallo	Invernadero	53	2.46	1.89	Khan et al., 2002
¹⁵ N dilución	Invernadero	52			Khan et al., 2002
¹⁵ N balance	Invernadero	52			Khan et al., 2002
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	68			Khan et al., 2003
¹⁵ N alimentación por hoja	Campo	65	López-Bellido et al., 2011		
Recuperación física					
Recuperación física	Invernadero	40			Unkovich and Pate, 2000
Recuperación física	Invernadero	11	1.32		Khan et al., 2002
Recuperación física	Campo	15			Liu et al., 2019
Poroto (<i>Phaseolus vulgaris</i>)					
N marcado (¹⁵ N)					
¹⁵ N alimentación por hoja	Invernadero	20	1.23	1.13	Giller et al., 1991
¹⁵ N dilución	Invernadero	17			Giller et al., 1991
Recuperación física					
Recuperación física	Campo	2	1.03		Wolyn et al., 1991
Recuperación física	Campo	4			Kipe-Nolt and Giller, 1993
N marcado (¹⁵ N)					
Caupí (<i>Vigna unguiculata</i>)					
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	53	2.13	2.13	Laberge et al., 2011

Tabla Anexo 1.2. Continuación.

Método	Condiciones de crecimiento	N subsuperficial (% N total)	Media del factor raíz		Referencia
			Por método	En general	
Haba (<i>Vicia faba</i>)					
			N marcado (¹⁵ N)		
¹⁵ N alimentación por tallo	Invernadero	39			Khan et al., 2002
¹⁵ N dilución	Invernadero	11			Khan et al., 2002
¹⁵ N balance	Invernadero	30			Khan et al., 2002
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	25	1.52		Khan et al., 2003
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	17			Mayer et al., 2003
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	41		1.40	Rochester et al., 1998
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	55			López-Bellido et al., 2011
			Recuperación física		
Recuperación física	Invernadero	40			Unkovich and Pate, 2000
Recuperación física	Invernadero	14	1.27		Khan et al., 2002
Recuperación física	Campo	15			Von Fragstein, 1995
Recuperación física	Campo	8			Liu et al., 2019
Arveja (<i>Pisum sativum</i>)					
			N marcado (¹⁵ N)		
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	15			Mayer et al., 2003
Raíz dividida	Invernadero	32			Sawatsky and Soper 1991
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	18			Mahieu et al., 2007
Raíz dividida	Invernadero	25			Mahieu et al., 2007
Raíz dividida	Campo	30	1.36		Mahieu et al., 2007
<i>Cotton-wick</i>	Campo	35			Mahieu et al., 2007
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	39		1.29	Wichem et al., 2007
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	19			Arcand et al., 2013
Raíz dividida	Invernadero	16			Schmidtke et al., 2005
			Recuperación física		
Recuperación física	Campo	24			Von Fragstein, 1995
Recuperación física	Campo	15	1.22		Izaurre et al., 1992
Recuperación física	Campo	6			Liu et al., 2019
Recuperación física	Campo	25			Armstrong et al., 1994
Maní (<i>Arachis hypogaea</i>)					
			N marcado (¹⁵ N)		
¹⁵ N alimentación por tallo	Campo	19	1.23		Zhang et al., 2019
			Recuperación física		
Recuperación física	Campo	3	1.03	1.13	Xia et al., 2021

Tabla Anexo 1.2. Continuación.

Método	Condiciones de crecimiento	N subsuperficial (% N total)	Media del factor raíz		Referencia
			Por método	En general	
Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)					
			N marcado (¹⁵ N)		
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	34	1.50		Arcand et al., 2013
			Recuperación física		
Recuperación física	Campo	14		1.36	Walley et al., 2007
Recuperación física	Invernadero	28	1.21		Unkovich and Pate, 2000
Recuperación física	Campo	8			Liu et al., 2019
Lupino blanco (<i>Lupinus albus</i>)					
			N marcado (¹⁵ N)		
<i>Cotton-wick</i>	Invernadero	19	1.20		Mayer et al., 2003
			Recuperación física		
Recuperación física	Invernadero	40	1.70	1.45	Unkovich and Pate, 2000

Tabla Anexo 1. 3. Balance de N incluyendo al N del cultivo debajo de la superficie del suelo (N subsuperficial) a través de métodos con N marcado (^{15}N), balance de N incluyendo la contribución de N por parte de las raíces medida por recuperación física, y balance de N considerando al N del cultivo debajo de la superficie del suelo como un promedio de los métodos de N marcado (^{15}N) y recuperación física.

Especie	n	Balance de N incluyendo al N subsuperficial medido a través de métodos de N marcado (^{15}N) (kg N ha $^{-1}$)				Balance de N incluyendo al N subsuperficial medido a través de métodos de recuperación física (kg N ha $^{-1}$)				Promedio del balance de N (kg N ha $^{-1}$) ^a			
		Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx	Media DE	Mín	Mediana 25%Q-75%Q	Máx
Lupino azul	18	66 87	-47	46 -6 – 142	221	37 73	-56	30 -36 – 96	164	52 80	-52	35 -24 – 119	193
Garbanzo	39	34 72	-72	18 -18 – 54	210	-5 35	-74	-10 -29 – 15	92	15 53	-73	3 -22 – 38	152
Poroto	26	-3 31	-66	-1.8 -24 – 18	56	-11 29	-67	-6 -35 – 3	36	-7 30	-67	-4 -30 – 5	42
Caupí	38	95 70	11	78 53 – 105	315	n/a	n/a	n/a	n/a	95 70	11	78 53 – 105	315
Haba	80	87 76	-77	78 34 – 118	345	53 58	-99	45 19 – 76	255	71 67	-88	63 27 – 97	302
Arveja	104	33 64	-74	15 -3 – 59	281	20 56	-79	7 -10 – 43	246	27 60	-76	11 -6 – 50	264
Maní	24	57 41	3	57 12 – 78	152	38 33	-6	30 8 – 54	118	48 37	-1	47 10 – 69	135
Lenteja	69	44 38	-60	39 27 – 69	132	21 28	-69	20 6 – 36	90	33 33	-64	31 18 – 54	111
Lupino blanco	12	-6 30	-76	8 -28 – 11	22	86 46	-20	104 60 – 114	146	40 37	-48	55 20 – 62	84

^a Balance de N considerando al aporte de N por parte de las raíces. El N del cultivo debajo de la superficie del suelo fue estimado como un promedio de los métodos de N marcado (^{15}N) y recuperación física.

Referencias utilizadas en la Tabla Anexo 1.2

- Arcand, M., Knight, J.D., Farrell, R.E., 2013. Estimating belowground nitrogen inputs of pea and canola and their contribution to soil inorganic N pools using ^{15}N labeling. *Plant and Soil*. 371:1–2, 67–80. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1626-z>.
- Arcand, M.M., Lemke, R., Farrell, R.E., Knight, D., 2014. Nitrogen supply from belowground residues of lentil and wheat to a subsequent wheat crop. *Biology and Fertility of Soils*. 50, 507–515. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0873-8>.
- Armstrong, E.L., Pate, J.S., Unkovich, M.J., 1994. Nitrogen balance of field pea crops in South Western Australia, studied using the ^{15}N natural abundance technique. *Functional Plant Biology*. 21:4, 533–549. <https://doi.org/10.1071/PP9940533>.
- Foyjunnessa, A.M.N., Doolette, A., Mason, S., 2018. Dual-labelling (^{15}N and ^{33}P) provides insights into stoichiometry and release of nitrogen and phosphorus from in situ mature lupin and canola below-ground residues. *Plant Soil*. 426, 77–93. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3621-x>.
- Giller, K.E., Ormsher, J., Awah, M.F., 1991. Nitrogen transfer from Phaseolus bean to intercropped maize measured using ^{15}N -enrichment and ^{15}N -isotope dilution methods. *Soil Biology and Biochemistry*. 23:4, 339-346. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(91\)90189-Q](https://doi.org/10.1016/0038-0717(91)90189-Q).
- Izaurrealde, R.C., McGill, W.B., Juma, N.G., 1992. Nitrogen fixation efficiency, interspecies N transfer, and root growth in barley-field pea intercrop on a Black Chernozemic soil. *Biology and Fertility of Soils*. 13, 11–16. <https://doi.org/10.1007/BF00337231>.
- Khan, D.F., Peoples, M.B., Herridge, D.F., 2002. Quantifying below-ground nitrogen of legumes. *Plant and Soil* 245(2):327–334. <https://doi.org/10.1023/A:1020407006212>.
- Khan, D.F., Peoples, M.B., Schwenke, G.D., Felton, W.L., Chen, D., Herridge, D.F., 2003. Effects of below-ground nitrogen on N balances of field-grown fababean, chickpea, and barley. *Australian Journal of Agricultural Research*. 54, 333-340. <https://doi.org/10.1071/AR02105>.
- Kipe-Nolt, J.A., Giller, K.E., 1993. A field evaluation using the ^{15}N isotope dilution method of lines of Phaseolus vulgaris L. bred for increased nitrogen fixation. *Plant Soil*. 152, 107–114. <https://doi.org/10.1007/BF00016339>.
- Laberge, G., Haussmann, B.I.G., Ambus, P., Høgh-Jensen, H., 2011. Cowpea N rhizodeposition and its below-ground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone. *Plant Soil*. 340, 369–382. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0609-6>.
- Liu, L., Knight, J.D., Lemke, R.L., Farrell, R. E., 2019. A side-by-side comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume crops. *Plant and Soil*, 442, 169-182. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04167-x>.
- López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., García, P., Redondo, R., López-Bellido, R.J., 2011. Tillage system effect on nitrogen rhizodeposited by faba bean and chickpea. *Field Crops Research*. 120:1, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.001>
- Mahieu, S., Fustec, J., Faure, M.L., Corre-Hellou, G., Crozat, Y., 2007. Comparison of two ^{15}N labelling methods for assessing nitrogen rhizodeposition of pea. *Plant and Soil*. 295:1–2,193–205. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9275-8>.
- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E.S., Schloter, M., Heß, J., 2003. Estimating N rhizodeposition of grain legumes using a ^{15}N in situ stem labelling method. *Soil Biology and Biochemistry*. 35:1, 21-28. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00212-2).
- McNeill, A.M., Fillery, I.R.P., 2008. Field measurement of lupin belowground nitrogen accumulation and recovery in the subsequent cereal-soil system in a semi-arid Mediterranean-type climate. *Plant Soil*. 302, 297–316. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9487-y>.
- Rochester, I.J., Peoples, M.B., Constable, G.A., Gault, R.R., 1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 253–260. <https://doi.org/10.1071/EA97132>.
- Russell, C., and Fillery. I., 1996a. In situ ^{15}N labelling of lupin below-ground biomass. *Australian Journal of Agricultural Research*. 47, 1035-1046. <https://doi.org/10.1071/AR9961035>.
- Russell, C.A., Fillery, I.R.P., 1996b. Estimates of lupin below-ground biomass nitrogen, dry matter, and nitrogen turnover to wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*. 47, 1047-1059. <https://doi.org/10.1071/AR9961047>.

- Sawatsky, N., Soper, R. J., 1991. A quantitative measurement of the nitrogen loss from the root system of field peas (*Pisum avense* L.) grown in the soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 23, 255–259. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(91\)90061-N](https://doi.org/10.1016/0038-0717(91)90061-N).
- Schmidtke, K., 2005. A model to predict the accuracy of measurements of legume N rhizodeposition using a split-root technique. *Soil Biology and Biochemistry*. 37:5, 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.024>.
- Unkovich, M.J., Pate, J.S., 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Research*, 65, 211–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00088-X).
- Unkovich, M.J., Pate, J.S., Hamblin M.J., 1994. The nitrogen economy of broadacre lupin in southwest Australia. *Aust Journal of Agriculture Research*. 45:149–164. <https://doi.org/10.1071/AR9940149>.
- Von Fragstein, P. 1995. Manuring, manuring strategies, catch crops and N-fixation. *Biological Agriculture & Horticulture*. 11(1–4), 273–287. <https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754712>.
- Walley, F.L., Clayton, G.W., Miller, P.R., Carr, P.M., Lafond, G.P., 2007. Nitrogen economy of pulse crop production in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 99, 1710–1718. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0314s>.
- Wolyn, D.J., Clair, D.A.S, DuBois, J., Rosas, J.C., Burris, R.H., Bliss., F.A., 1991. Distribution of nitrogen in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes selected for differences in nitrogen fixation ability. *Plant Soil*. 138, 303–311. <https://doi.org/10.1007/BF00012256>.
- Xia, G., Wang, Y., Hu, J., Wang, S., Zhang, Y., Wu, Q., Chi, D., 2021. Effects of Supplemental Irrigation on Water and Nitrogen Use, Yield, and Kernel Quality of Peanut under Nitrogen-Supplied Conditions. *Agricultural Water Management*. 243, 106518. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106518>.
- Zhang, K., Zhao, J., Wang, X., Xu, H., Zang, H., Liu, J., Hu, et al., 2019. Estimates on nitrogen uptake in the subsequent wheat by above-ground and root residue and rhizodeposition of using peanut labeled with ¹⁵N isotope on the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*. 18:3, 571–579. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62112-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62112-4).

Tabla Anexo 2.1. Número de estudios, país, especies de leguminosas, año de experimentación, métodos de medición de la FBN, diseño experimental y características para cada experimento de leguminosas que fue incluido en la base de datos.

N°	Referencia	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
1	Rennie y Dubetz, 1986	Canadá	Lentejas, Arveja, Garbanzo, Haba	1983/84	Dilución isotópica de ^{15}N .	Bloques completos aleatorizados (DBCA)	Efecto de la inoculación. Riego.
2	Schulz et al., 1999	Nepal	Lenteja, Arveja, Haba, Lupino blanco	1994/95	N-Diferencia	DBCA	Fechas de siembra. Riego.
3	Haynes et al., 1993	Nueva Zelanda	Lenteja, Arveja, Haba	1988/89	Dilución isotópica de ^{15}N .	DBCA	Variabilidad anual. Fechas de siembra.
4	Beck et al., 1991	Francia y Siria	Garbanzo, Lenteja, Arveja, Haba	1986/88	Dilución isotópica de ^{15}N .	Parcelas divididas	Variabilidad de la ubicación en Francia y Siria. Fechas de siembra.
5	Ojiem et al., 2007	Kenia	Poroto, Maní	2003	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Ubicaciones. Fertilidad del suelo alta, media y baja.
6	Carranca et al., 1999	Portugal	Arveja, Garbanzo, Haba	1990/92	Dilución isotópica de ^{15}N .	DBCA	Ubicaciones. Efecto de la inoculación.
7	Smith y otros, 1987	Estados Unidos	Arveja, Lenteja, Garbanzo, Haba, Lupino azul	1981/83	Dilución isotópica de ^{15}N .	DBCA	Variabilidad de ubicaciones.
8	Liu y otros, 2019	Canadá	Garbanzo, Lenteja, Arveja, Haba	2014/17	Dilución isotópica de ^{15}N .	DBCA	Variabilidad anual.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
9	Hossain et al., 2016	Canadá	Garbanzo, Poroto, Arveja, Lenteja, Haba	2008/10	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Variabilidad anual.
10	Bado et al., 2006	Burkina Faso	Maní, Caupí	2001	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas	Fertilización N, P y K. Fertilización con estiércol.
11	Kermah et al., 2017	Ghana	Maní, Caupí	2013	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Ubicaciones. Diferente fertilidad de los suelos.
12	Piha y Munns, 1987	Estados Unidos	Poroto, Caupí	1984	N-Diferencia	Parcelas divididas	Genotipos de poroto y caupí. Riego.
13	López-Bellidó et al., 2011	España	Garbanzo, Haba	2001/07	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas divididas	Variabilidad anual. Sistemas de labranza.
14	Scwenke et al., 1998	Australia	Garbanzo, Haba	1995	¹⁵ N Abundancia natural	Experimento observacional	Amplia gama de prácticas agrícolas y condiciones ambientales.
15	Jensen, 1986	Dinamarca	Arveja, Haba	1980/82	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas divididas	Variabilidad anual. Genotipos de arveja y haba.
16	Williams et al., 2014	Canadá	Arveja, Haba, Lupino azul	2008/09	N-Diferencia	DBCA	Variabilidad anual y espacial.
17	McDonagh et al., 1995	Tailandia	Maní, Caupí	1991	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Experimento observacional	Cultivares de maní de ciclo corto. Caupí multipropósito.
18	Denton et al., 2017	Australia	Haba, Lupino azul	2008/10	¹⁵ N Abundancia natural	No se ha informado	Efecto de la inoculación. Diferentes sistemas de aplicación de inoculantes.
19	Espinoza et al., 2012	Chile	Arveja, Lupino azul	2008/09	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Año x ambiente x manejo.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
20	Hatch et al., 2010	Inglaterra	Lupino azul, Arveja	2005	N-Diferencia	DBCA	Genotipos de lupino y arveja. Labranza convencional.
21	Doughton et al., 1993	Australia	Garbanzo	1985	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas DBCA / Parcelas divididas	Manejo de rastrojo de sorgo y fertilización con N.
22	Kurdali, 1996	Siria	Garbanzo	1993/94	Dilución isotópica de ¹⁵ N	No se ha informado	Partición y movilización de N y P.
23	Lee et al., 2010	Estados Unidos	Garbanzo	2005/06	¹⁵ N Abundancia natural	Experimento observacional	Sistemas de labranza y manejo del suelo.
24	Elías y Herridge, 2014	Australia	Garbanzo	2006	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Amplia gama de prácticas agrícolas y condiciones ambientales.
25	Walley et al., 2005	Canadá	Garbanzo	1996/98	N-Diferencia	DBCA	Garbanzo tipo desi y kabuli. Fertilización con N.
26	Ruschel et al., 1982	No se ha informado	Poroto	1979	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Bloques aleatorios	Diferentes cultivares de poroto.
27	Manrique et al., 1993	Perú	Poroto	1988	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Diferentes cultivares de poroto. Riego.
28	Samago et al., 2018	Etiopía	Poroto	2012/13	¹⁵ N Abundancia natural	Parcelas divididas divididas	Efecto de la inoculación. Cepas de <i>Rhizobium</i> .
29	Yadegari y otros, 2010	Irán	Poroto	2006	N-Diferencia	DBCA	Variabilidad espacial. Co-inoculación.
30	Patra y otros, 1986	India	Caupí	1981	Dilución isotópica de ¹⁵ N	No se ha informado	Caupí en intercultivo. Riego.
31	Ofori y otros, 1987	Australia	Caupí	1984/85	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Caupí en intercultivo. Riego.
32	Van Kessel y Roskoski, 1988	Estados Unidos	Caupí	No se ha informado	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas	Caupí en intercultivo. Espaciado entre surcos. Riego.
33	Adjei-Nsiah y otros, 2008	Ghana	Caupí	2003	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Cultivares de caupí. Prácticas de manejo del suelo.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
34	Vesterager et al., 2008	Tanzania	Caupí	1996/97	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Historial de cultivos. Caupí en intercultivo.
35	Belane y Dakora, 2009	Ghana	Caupí	2006	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Genotipos de caupí.
36	Rusinamhodzi et al., 2006	Zimbabwe	Caupí	2003/04	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Labranza convencional. Caupí en intercultivo.
37	Awonaike et al., 1990	Nigeria	Caupí	1986	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Genotipos de caupí. Caupí inoculado y no inoculado. Cepas de <i>Rhizobium</i> .
38	De Freitas et al., 2012	Brasil	Caupí	2004	Dilución isotópica de ^{15}N	Parcelas divididas	Variedades locales de caupí. Caupí inoculado y no inoculado. Fertilización con N.
39	Abaidoo et al., 2017	Nigeria	Caupí	2010/11	Ureidos	DBCA	Rotación de cultivos. Genotipos de caupí.
40	Hardarson et al., 1991	Austria	Haba	1985/87	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Variabilidad anual. Fertilización con N.
41	Rochester y otros, 2001	Australia	Haba	1995/96	^{15}N Abundancia natural	Parcelas divididas	Variabilidad anual. Riego.
42	López-Bellidó et al., 2006	España	Haba	2001/03	Dilución isotópica de ^{15}N y abundancia natural de ^{15}N .	DBCA	Sistemas de labranza.
43	Denton et al., 2013	Australia	Haba	2009	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Haba inoculada y no inoculada. Dosis de inoculación.
44	Van Zwieten y otros, 2015	Australia	Haba	2008/09	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Fertilización orgánica e inorgánica.
45	Sulas y otros, 2013	Italia	Haba	2001/06	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Labranza convencional. Variabilidad temporal y espacial.
46	Nebiyu et al., 2014	Etiopía	Haba	2009/10	^{15}N Abundancia natural	Parcelas divididas	Genotipos de haba. Fertilización con P.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
47	Giambalvo et al., 2012	Italia	Haba	2006/08	Dilución isotópica de ^{15}N	Parcelas divididas	Sistemas de labranza. Variabilidad anual.
48	Habtegebrial y otros, 2007	Etiopía	Haba	2004	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Efecto de la inoculación. Fertilización con S. Riego.
49	Waterer et al., 1994	Canadá	Arveja	1990/91	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Arveja en intercultivo. Fertilización con N.
50	Soon et al., 2004	Canadá	Arveja	1997/98	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Fijación de N y control de malezas.
51	Pronto y Arshad, 2004	Canadá	Arveja	1997/98	N-Diferencia	DBCA	Variabilidad anual.
52	Corre-Hellou y Crozat, 2005	Francia	Arveja	1999/00	^{15}N Abundancia natural	No se ha informado	Cultivares de arveja. Manejo orgánico.
53	Kumar y Goh, 2000	Nueva Zelanda	Arveja	1993	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Estudio de crecimiento de arveja. Riego.
54	O'Connor et al., 1993	Australia	Arveja	1988/89	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Variabilidad temporal y espacial. Fechas de siembra.
55	Habtegebrial y Singh, 2006	Etiopía	Arveja	2004	Dilución isotópica de ^{15}N	DBCA	Arveja inoculada y no inoculada. Fertilización con P. Riego.
56	Ghaley y otros, 2005	Dinamarca	Arveja	2002	^{15}N Abundancia natural	Parcelas divididas	Lenguado y arveja de campo intercalada. N Fertilización.
57	Corre-Hellou et al., 2006	Francia	Arveja	2001/03	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Arveja en intercultivo. Fertilización con N.
58	Bourion et al., 2007	Francia	Arveja	2002	Dilución isotópica de ^{15}N	Bloques aleatorios	Genotipos de arveja. Riego.
59	Drew et al., 2007	Australia	Arveja	2003/04	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Efecto de herbicidas sobre la fijación de N.
60	Jannoura et al., 2014	Alemania	Arveja	2010	N-Diferencia	Parcelas divididas	Arveja en intercultivo. Fertilización orgánica.
61	Chapagain y Riseman, 2014	Canadá	Arveja	2011/12	^{15}N Abundancia natural	DBCA	Arveja en intercultivo. Manejo orgánico.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
62	Gollner et al., 2019	Austria	Arveja	2002/04	N-Diferencia	Parcelas divididas	Genotipos de arveja. Manejo orgánico.
63	Enrico et al., 2020	Argentina	Arveja	2012/18	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Siembra directa. Textura de suelos y variabilidad de anual.
64	Clayton et al., 2004 (a) Clayton et al., 2004 (b)	Canadá	Arveja	1995/96	N-Diferencia	DBCA	Efecto de la inoculación. Distintas formulaciones de inoculantes.
65	Soon y Lupwayi, 2008	Canadá	Arveja	2002/04	N-Diferencia	DBCA	Variabilidad temporal y espacial. Genotipos de arveja. Efecto de la inoculación. Variabilidad temporal y espacial.
66	McDonagh et al., 1993	Tailandia	Maní	No se ha informado	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas	Genotipos de maní.
67	Giller et al., 1987	India	Maní	1981/82	Dilución isotópica de ¹⁵ N	No se ha informado	Genotipos de maní. Riego.
68	Toomsan et al., 1995	Tailandia	Maní	1991/92	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Variabilidad espacial. Genotipos de maní.
69	Phoomthaisong y otros 2003	Tailandia	Maní	1999/00	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Genotipos de maní.
70	Hemwong y otros, 2008	Tailandia	Maní	2004	Dilución isotópica de ¹⁵ N	Parcelas divididas	Manejo del rastrojo de caña de azúcar antes de la siembra de maní. Labranza convencional. Corrección de la acidez del suelo.
71	Mokgehle et al., 2014	Sudáfrica	Maní	2009	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Genotipos de maní. Variabilidad espacial. Riego.
72	Oteng Frimpong y Dakora, 2018	Ghana	Maní	2012/13	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Año x ubicación x genotipo.
73	Van Kessel, 1994	Canadá	Lenteja	No se ha informado	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Partición de N. Riego.
74	Hafeez y otros, 2000	Pakistán	Lenteja	No se ha informado	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Labranza convencional. Genotipos de lenteja.

Tabla Anexo 2.1. Continuación

N°	Referencias	País	Especies	Año	Método de medición de la FBN	Diseño	Características principales
75	Shah y otros, 2003	Pakistán	Lenteja	1995/98	¹⁵ N Abundancia natural	Parcelas divididas	Manejo del rastrojo. Variabilidad anual.
76	Zakeri et al., 2012	Canadá	Lenteja	2008	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Genotipos de lenteja.
77	Badarneh y Ghawi, 1994	Jordania	Lenteja	1988/90	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Variabilidad anual y genotípica. Ensayos de inoculación.
78	Bremer et al., 1990	Canadá	Lenteja	1986/87	Dilución isotópica de ¹⁵ N y diferencia de N	Parcelas divididas	Genotipos de lenteja. Variabilidad espacial. Efectos de la inoculación. Cepas de <i>Rhizobium</i> .
79	Schmidtke y otros, 2004	Alemania	Lenteja	2000/01	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA	Lenteja en intercultivo. Manejo orgánico.
80	Zakeri et al., 2012	Canadá	Lenteja	2006/07	¹⁵ N Abundancia natural	DBCA/ Parcelas divididas	Genotipos de lenteja. Variabilidad espacial.
81	Larson et al., 1989	Estados Unidos	Lupino blanco	1985/86	N-Diferencia	DBCA	Labranza convencional. Efectos de la inoculación. Genotipos de lupino. Riego.
82	Evans et al., 1987	Australia	Lupino azul	1983/84	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Rotación de cultivos. Fertilización con N.
83	Kalembasa et al., 2020	Polonia	Lupino blanco	2016	Dilución isotópica de ¹⁵ N	DBCA	Fechas de siembra.

Referencias de la base de datos

- Abaidoo, R., Dare, M. O., Killani, S., Opoku, A., 2017. Evaluation of early maturing cowpea (*Vigna unguiculata*) germplasm for variation in phosphorus use efficiency and biological nitrogen fixation potential with indigenous rhizobial populations. *The Journal of Agricultural Science*, 155, 102-116. <https://doi:10.1017/S002185961500115X>.
- Adjei-Nsiah, S., Kuyper, T.W., Leeuwis, C., Abekoe, M. K., Cobbinah, J., Sakyi-Dawson, O., Giller, K. E., 2008. Farmers' agronomic and social evaluation of productivity, yield and N₂-fixation in different cowpea varieties and their subsequent residual N effects on a succeeding maize crop. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80, 199-299. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9133-3>.
- Awonaiké, K.O., Kumarasinghe, K.S., Danso, S.K.A., 1990. Nitrogen fixation and yield of cowpea (*Vigna unguiculata*) as influenced by cultivar and *Bradyrhizobium* strain. *Field Crops Research*, 24, 163-171. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90035-A](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90035-A).
- Badarneh, D.M.D., Ghawi, I.O., 1994. Effectiveness of inoculation on biological nitrogen fixation and water consumption by lentil under rainfed conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 1-5. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90189-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90189-9).
- Bado, B.V., Bationo, A., Cescas, M.P., 2006. Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biology and Fertility of Soils*, 43, 171-176. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0076-7>.
- Beck, D.P., Wery, J., Saxena, M.C., Ayadi, A., 1991. Dinitrogen fixation and nitrogen balance in cool-season food legumes. *Agronomy Journal*, 83, 334-341. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020015x>.
- Belane, A.K., Dakora, F.D., 2009. Measurement of N₂ fixation in 30 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes under field conditions in Ghana, using the ¹⁵N natural abundance technique. *Symbiosis*, 48, 47–56. <https://doi.org/10.1007/BF03179984>.
- Bourion, V., Laguerre, G., Depret, G., Voisin, A. S., Salon, C., Duc, G., 2007. Genetic variability in nodulation and root growth affects nitrogen fixation and accumulation in Pea. *Annals of Botany*, 100, 589-598. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm147>.
- Bremer, E., Van Kessel, C., Nelson, L., Rennie, R.J., Rennie, D.A., 1990. Selection of *Rhizobium leguminosarum* strains for lentil (*Lens culinaris*) under growth room and field conditions. *Plant and Soil*, 121, 47–56. <https://doi.org/10.1007/BF00013096>.
- Carranca, C., de Varennes, A., Rolston, D., 1999. Biological nitrogen fixation by fababeans, pea and chickpea, under field conditions, estimated by the ¹⁵N isotope dilution technique. *European Journal of Agronomy*, 10, 49-56. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00049-5).
- Chapagain, T., Riseman, A., 2014. Barley–pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Research*, 166, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.014>.
- Clayton, G.W., Rice, W.A., Lupwayi, N.Z., Johnston, A.M., Lafond, G.P., Grant, C.A., Walley, F., 2004 (a). Inoculant formulation and fertilizer nitrogen effects on field pea: Nodulation, N₂ fixation and nitrogen partitioning. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 79-88. <https://doi.org/10.4141/P02-089>.
- Clayton, G.W., Rice, W.A., Lupwayi, N.Z., Johnston, A.M., Lafond, G.P., Grant, C.A., Walley, F., 2004 (b). Inoculant formulation and fertilizer nitrogen effects on field pea: Crop yield and seed quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 89-96. <https://doi.org/10.4141/P02-090>.
- Corre-Hellou, G., Crozat, Y., 2005. N₂ fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.). *European Journal of Agronomy*, 22, 449-458. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.05.005>.
- Corre-Hellou, G., Fustec, J., Crozat, Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea–barley intercrops. *Plant and Soil*, 282, 195-208. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-5777-4>.
- de Freitas, A.D.S., Fernandes Silva, A., de Sá Barretto Sampaio, E.V., 2012. Yield and biological nitrogen fixation of cowpea varieties in the semi-arid region of Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 45, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.017>.

- Denton, M.D., Pearce, D.J., Peoples, M.B., 2013. Nitrogen contributions from faba bean (*Vicia faba* L.) reliant on soil rhizobia or inoculation. *Plant and Soil*, 365, 363-374. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1393-2>.
- Denton, M.D., Phillips, L.A., Peoples, M.B., Pearce, D. J., Swan, A. D., Mele, P. M., Brockwell, J., 2017. Legume inoculant application methods: effects on nodulation patterns, nitrogen fixation, crop growth and yield in narrow-leaf lupin and faba bean. *Plant and Soil*, 419, 25-39. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3317-7>.
- Doughton, J.A., Vallis, I., Saffigna, P.G., 1993. Nitrogen fixation in chickpea. I. Influence of prior cropping or fallow, nitrogen fertilizer and tillage. *Australian Journal of Agricultural Research*, 44, 1403-1413. <https://doi.org/10.1071/AR9931403>.
- Drew, E.A., Gupta, V.V.S.R., Roget, D.K., 2007. Herbicide use, productivity, and nitrogen fixation in field pea (*Pisum sativum*). *Australian Journal of Agricultural Research*, 58, 1204-1214. <https://doi.org/10.1071/AR06394>.
- Elias, N.V., Herridge, D.F., 2014. Crop-available water and agronomic management, rather than nitrogen supply, primarily determine grain yield of commercial chickpea in northern New South Wales. *Crop and Pasture Science*, 65, 442-452. <https://doi.org/10.1071/CP13397>.
- Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvagiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *European Journal of Agronomy*, 115, 126016. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126016>.
- Espinoza, S., Ovalle, C., Zagal, E., Matus, I., Tay, J., Peoples, M.B., del Pozo, A., 2012. Contribution of legumes to wheat productivity in Mediterranean environments of central Chile. *Field Crops Research*, 133, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.006>.
- Evans, J., O'Connor, G.E., Turner, G.L., Bergersen, F.J., 1987. Influence of mineral nitrogen on nitrogen fixation by lupin (*Lupinus angustifolius*) as assessed by ¹⁵N isotope dilution methods. *Field Crops Research*, 17, 109-120. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90086-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90086-4).
- Ghaley, B.B., Hauggaard-Nielsen, H., Høgh-Jensen, H., Jensen, E.S., 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 73, 201-212. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-2475-9>
- Giambalvo, D., Ruisi, P., Saia, S., Di Miceli, G., Frenda, A.S., Amato, G., 2012. Faba bean grain yield, N₂ fixation, and weed infestation in a long-term tillage experiment under rainfed Mediterranean conditions. *Plant and Soil*, 360, 215-227. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1224-5>.
- Giller, K.E., Nambiar, P.T.C., Srinivasa Rao, B., Dart, P.J., Day, J.M., 1987. A comparison of nitrogen fixation in genotypes of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) using ¹⁵N-isotope dilution. *Biology and Fertility of Soils*, 5, 23-25. <https://doi.org/10.1007/BF00264341>.
- Gollner, G., Starz, W., Friedel, J.K., 2019. Crop performance, biological N fixation and pre-crop effect of pea ideotypes in an organic farming system. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 115, 391-405. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10021-4>.
- Habtegebrial Habtemichial, K., Singh, B. R., Aune, J. B., 2007. Wheat response to N₂ fixed by faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by sulfur fertilization and rhizobial inoculation in semi-arid Northern Ethiopia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170, 412-418. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625006>.
- Habtegebrial, K., Singh, B.R., 2006. Wheat responses in semiarid Northern Ethiopia to N₂ fixation by *Pisum sativum* treated with phosphorous fertilizers and inoculant. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 75, 247-255. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9031-0>.
- Hafeez, F., Shah, N., Malik, K., 2000. Field evaluation of lentil cultivars inoculated with *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* strains for nitrogen fixation using nitrogen-15 isotope dilution. *Biology and Fertility of Soils*, 31, 65-69. <https://doi.org/10.1007/s003740050625>.
- Hardarson, G., Danso, S.K.A., Zapata, F., Reichardt, K., 1991. Measurements of nitrogen fixation in fababeans at different N fertilizer rates using the ¹⁵N isotope dilution and 'A-value' methods. *Plant and Soil*, 131, 161-168. <https://doi.org/10.1007/BF00009445>.
- Hatch, D. J., Joynes, A., Stone, A., 2010. Nitrogen uptake in organically managed spring sown lupins and residual effects on leaching and yield of a following winter cereal. *Soil Use and Management*, 26, 21-26. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00252.x>.

- Haynes, R.J., Martin, R.J., Goh, K.M., 1993. Nitrogen fixation, accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for some field-grown legume crops. *Field Crops Research*, 35, 85-92. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90141-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90141-9).
- Hemwong, S., Cadisch, G., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Vityakon, P., Patanothai, A., 2008. Dynamics of residue decomposition and N₂ fixation of grain legumes upon sugarcane residue retention as an alternative to burning. *Soil and Tillage Research*, 99, 84-97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.003>.
- Hossain, Z., Wang, X., Hamel, C., Knight, J. D., Morrison, M. J., Gan. Y., 2016. Biological nitrogen fixation by pulse crops on semiarid Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 97, 119-131. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0185>.
- Jannoura, R., Joergensen, R. G., Bruns, C., 2014. Organic fertilizer effects on growth, crop yield, and soil microbial biomass indices in sole and intercropped peas and oats under organic farming conditions. *European Journal of Agronomy*, 52, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.001>.
- Jensen, E.S., 1986. Symbiotic N₂ fixation in pea and field bean estimated by ¹⁵N fertilizer dilution in field experiments with barley as a reference crop. *Plant and Soil*, 92, 3-13. <https://doi.org/10.1007/BF02372260>.
- Kalembasa, S., Szukala, J., Faligowska, A., Kalembasa, D., Symanowicz, B., Bacher, M., Gebus-Czupyt, B., 2020. Quantification of biologically fixed nitrogen by white lupin (*Lupinus albus* L.) and its subsequent uptake by winter wheat using the ¹⁵N isotope dilution method. *Agronomy*, 10, 1392. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091392>.
- Kermah, M., Franke, A.C., Adjei-Nsiah, S., Ahiabor, B.D.K., Abaidoo, R.C., Giller, K.E., 2017. N₂-fixation and N contribution by grain legumes under different soil fertility status and cropping systems in the Guinea savanna of northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 261, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.028>.
- Kumar, K., Goh, K.M., 2000. Biological nitrogen fixation, accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for white clover (*Trifolium repens* L.) and field pea (*Pisum sativum* L.) grown for seed. *Field Crops Research*, 68, 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00109-X).
- Kurdali, F., 1996. Nitrogen and phosphorus assimilation, mobilization and partitioning in rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Research*. 47, 81-92. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00034-2](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00034-2).
- Larson, K.J., Cassman, K.G., Phillips, D. A., 1989. Yield, dinitrogen fixation, and aboveground nitrogen balance of irrigated white lupin in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*, 81, 538-543. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100030029x>.
- Lee, J., Six, J., van Kessel, C., 2010. Dinitrogen fixation by winter chickpea across scales in waterlogged soil in a Mediterranean climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197, 135-145. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00452.x>.
- Liu, L., Knight, J.D., Lemke, R.L., Farrell, R. E., 2019. A side-by-side comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume crops. *Plant and Soil*, 442, 169-182. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04167-x>.
- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Redondo, R., Benítez, J., 2006. Faba bean nitrogen fixation in a wheat-based rotation under rainfed Mediterranean conditions: Effect of tillage system. *Field Crops Research*, 98, 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.03.001>.
- López-Bellido, R. J., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, F. J., Redondo, R., 2011. Chickpea and faba bean nitrogen fixation in a Mediterranean rainfed Vertisol: Effect of the tillage system. *European Journal of Agronomy*, 34, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.01.005>.
- Manrique, A., Manrique, K., Nakahodo, J., 1993. Yield and biological nitrogen fixation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Peru. *Plant and Soil*, 152, 87-91. <https://doi.org/10.1007/BF00016336>.
- McDonagh, J.F., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Giller, K. E., 1995. Grain legumes and green manures as pre-rice crops in Northeast Thailand. *Plant and Soil*, 177, 111-126. <https://doi.org/10.1007/BF00010342>.

- McDonagh, J.F., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Giller, K.E., 1993. Estimates of the residual nitrogen benefit of groundnut to maize in Northeast Thailand. *Plant and Soil*, 154, 267–277. <https://doi.org/10.1007/BF00012532>.
- Mokgehle, S.N., Dakora, F.D., Mathews, C., 2014. Variation in N₂ fixation and N contribution by 25 groundnut (*Arachis hypogaea* L.) varieties grown in different agro-ecologies, measured using ¹⁵N natural abundance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 195, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.014>.
- Nebiyu, A., Vandorpe, A., Diels, J., Boeckx, P., 2014. Nitrogen and phosphorus benefits from faba bean (*Vicia faba* L.) residues to subsequent wheat crop in the humid highlands of Ethiopia. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 98, 253–266. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9609-x>.
- O'Connor, G.E., Evans, J., Fettell, N.A., Bamforth, I., Stuchberry, J., Heenan, D.P., Chalk, P. M., 1993. Sowing date and varietal effects on the N₂ fixation of field pea and implications for improvement of soil nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research*, 44, 151-163. <https://doi.org/10.1071/AR9930151>.
- Ofori, F., Pate, J.S., Stern, W.R., 1987. Evaluation of N₂-fixation and nitrogen economy of a maize/cowpea intercrop system using ¹⁵N dilution methods. *Plant and Soil*, 102, 149-160. <https://doi.org/10.1007/BF02370697>.
- Ojiem, J.O., Vanlauwe, B., de Ridder, N., Giller, K.E., 2007. Niche-based assessment of contributions of legumes to the nitrogen economy of Western Kenya smallholder farms. *Plant and Soil*, 292, 119-135. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9207-7>.
- Oteng-Frimpong, R., Dakora, F.D., 2018. Selecting elite groundnut (*Arachis hypogaea* L) genotypes for symbiotic N nutrition, water-use efficiency and pod yield at three field sites, using ¹⁵N and ¹³C natural abundance. *Symbiosis*, 75, 229-243. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0524-1>.
- Patra, D.D., Sachdev, M.S., Subbiah, B.V., 1986. ¹⁵N studies on the transfer of legume-fixed nitrogen to associated cereals in intercropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2, 165-171. <https://doi.org/10.1007/BF00257596>.
- Phoomthaisong, J., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Cadisch, G., Patanothai, A., 2003. Attributes affecting residual benefits of N₂-fixing mungbean and groundnut cultivars. *Biology and Fertility of Soils*, 39, 16-24. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0676-4>.
- Piha, M.I., Munns, D.N., 1987. Nitrogen fixation capacity of field-grown bean compared to other grain legumes. *Agronomy Journal*, 79, 690-696. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900040022x>.
- Rennie, R.J., Dubetz, S., 1986. Nitrogen-15-determined nitrogen fixation in field-grown chickpea, lentil, fababean, and field pea. *Agronomy Journal*, 78, 654-660. <https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800040020x>.
- Rochester, I.J., Peoples, M.B., Hulugalle, N.R., Gault, R.R., Constable, G.A., 2001. Using legumes to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems. *Field Crops Research*, 70, 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00151-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00151-9).
- Ruschel, A.P., Vose, P.B., Matsui, E., Victoria, R.L., Tai Saito, S.M., 1982. Field evaluation of N₂-fixation and N-utilization by phaseolus bean varieties determined by ¹⁵N isotope dilution. *Plant and Soil*, 65, 397–407. <https://doi.org/10.1007/BF02375060>.
- Rusinamhodzi, L., Murwira, H.K., Nyamangara, J., 2006. Cotton–cowpea intercropping and its N₂ fixation capacity improves yield of a subsequent maize crop under Zimbabwean rain-fed conditions. *Plant and Soil*, 287, 327-336. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9080-9>.
- Samago, T.Y., Anniye, E.W., Dakora, F.D., 2018. Grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties is markedly increased by rhizobial inoculation and phosphorus application in Ethiopia. *Symbiosis*, 75, 245–255. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0529-9>.
- Schmidtke, K., Neumann, A., Hof, C., Rauber, R., 2004. Soil and atmospheric nitrogen uptake by lentil (*Lens culinaris* Medik.) and barley (*Hordeum vulgare* ssp. *nudum* L.) as monocrops and intercrops. *Field Crops Research*, 87, 245-256. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.11.006>.
- Schulz, S., Keatinge, J.D.H., Wells, G.J., 1999. Productivity and residual effects of legumes in rice-based cropping systems in a warm-temperate environment I. Legume biomass production and N fixation. *Field Crops Research*, 61, 23-35. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00146-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00146-4).

- Schwenke, G.D., Peoples, M.B., Turner, G.L., Herridge, D.F., 1998. Does nitrogen fixation of commercial, dryland chickpea and faba bean crops in north-west New South Wales maintain or enhance soil nitrogen? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 61-70. <https://doi.org/10.1071/EA97078>.
- Shah, Z., Shah, S.H., Peoples, M.B., Schwenke, G.D., Herridge, D.F., 2003. Crop residue and fertiliser N effects on nitrogen fixation and yields of legume–cereal rotations and soil organic fertility. *Field Crops Research*, 83, 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00005-4).
- Smith, S.C., Bezdicsek, D.F., Turco, R.F., Cheng, H.H., 1987. Seasonal N₂ fixation by cool-season pulses based on several ¹⁵N methods. *Plant and Soil*, 97, 3-13. <https://doi.org/10.1007/BF02149818>.
- Soon, Y.K., Arshad, M.A., 2004. Contribution of di-nitrogen fixation by pea to the productivity and N budget of a wheat-based cropping system. *Journal of Agricultural Science*, 142, 629-637. <https://doi.org/10.1017/S002185960500482X>.
- Soon, Y.K., Harker, K.N., Clayton, G.W., 2004. Plant competition effects on the nitrogen economy of field pea and the subsequent crop. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 552-557. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.5520>.
- Soon, Y.K., Lupwayi, N.Z., 2008. Influence of pea cultivar and inoculation on the nitrogen budget of a pea-wheat rotation in northwestern Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 88, 1-9. <https://doi.org/10.4141/CJPS06055>.
- Sulas, L., Roggero, P.P., Canu, S., Seddaiu, G., 2013. Potential nitrogen source from field bean for rainfed Mediterranean cropping systems. *Agronomy Journal*, 105, 1735-1742. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0030>.
- Toomsan, B., McDonagh, J.F., Limpinuntana, V., Giller, K.E., 1995. Nitrogen fixation by groundnut and soyabean and residual nitrogen benefits to rice in farmers' fields in Northeast Thailand. *Plant and Soil*, 175, 45-56. <https://doi.org/10.1007/BF02413009>.
- van Kessel, C., 1994. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen by lentil. *Plant and Soil*, 164, 69-76. <https://doi.org/10.1007/BF00010112>.
- van Kessel, C., Roskoski, J.P., 1988. Row spacing effects of N₂-fixation, N-yield and soil N uptake of intercropped cowpea and maize. *Plant and Soil*, 111, 17-23. <https://doi.org/10.1007/BF02182032>.
- Van Zwieten, L., Rose, T., Herridge, D., Kimber, S., Rust, J., Cowie, A., Morris, S., 2015. Enhanced biological N₂ fixation and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) in an acid soil following biochar addition: dissection of causal mechanisms. *Plant and Soil*, 395, 7-20. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2427-3>.
- Vesterager, J.M., Nielsen, N.E., Høgh-Jensen, H., 2008. Effects of cropping history and phosphorus source on yield and nitrogen fixation in sole and intercropped cowpea–maize systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 80, 61-73. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9121-7>.
- Walley, F.L., Kyei-Boahen, S., Hnatowich, G., Stevenson, C., 2005. Nitrogen and phosphorus fertility management for desi and kabuli chickpea. *Canadian Journal of Plant Science*, 85, 73-79. <https://doi.org/10.4141/P04-039>.
- Waterer, J.G., Vessey, J.K., Stobbe, E.H., Soper, R.J., 1994. Yield and symbiotic nitrogen fixation in a pea-mustard intercrop as influenced by N fertilizer addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 447-453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90176-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90176-7).
- Williams, C.M., King, J.R., Ross, S. M., Olson, M.A., Hoy, C.F., Lopetinsky, K.J., 2014. Effects of three pulse crops on subsequent barley, canola, and wheat. *Agronomy Journal*, 106, 343-350. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0274>.
- Yadegari, M., Rahmani, H.A., Noormohammadi, G., Ayneband, A., 2010. Plant growth promoting rhizobacteria increase growth, yield and nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Plant Nutrition*, 33, 1733-1743. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2010.503776>.
- Zakeri, H., Bueckert, R.A., Schoenau, J.J., Vandenberg, A., Lafond, G.P., 2012. Controlling indeterminacy in short season lentil by cultivar choice and nitrogen management. *Field Crops Research*, 131, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.027>.
- Zakeri, H., Lafond, G. P., Schoenau, J.J., Hadi Pahlavani, M., Vandenberg, A., May, W.E., Holzapfel, C. B., Bueckert, R.A., 2012. Lentil performance in response to weather, no-till

duration, and nitrogen in Saskatchewan. *Agronomy Journal*, 104, 1501-1509.
<https://doi.org/10.2134/agronj2011.0339>

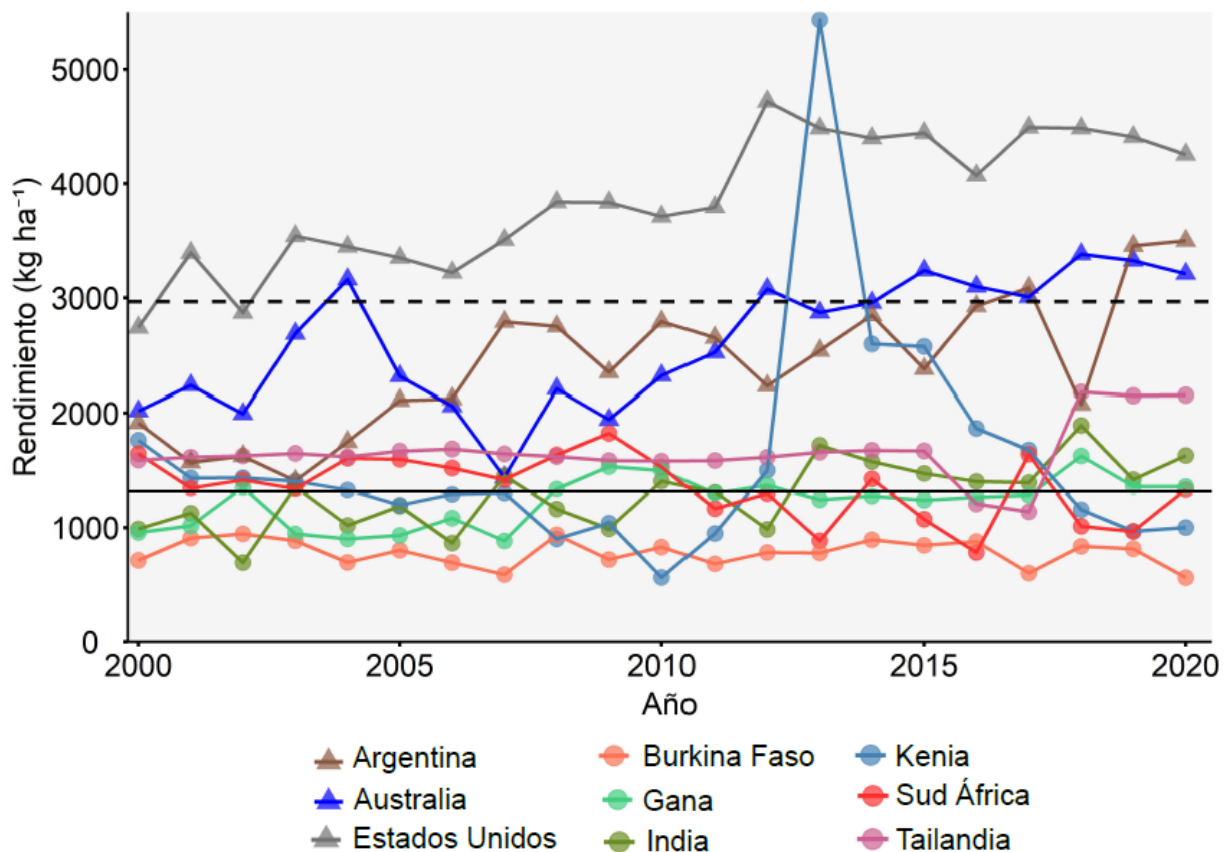
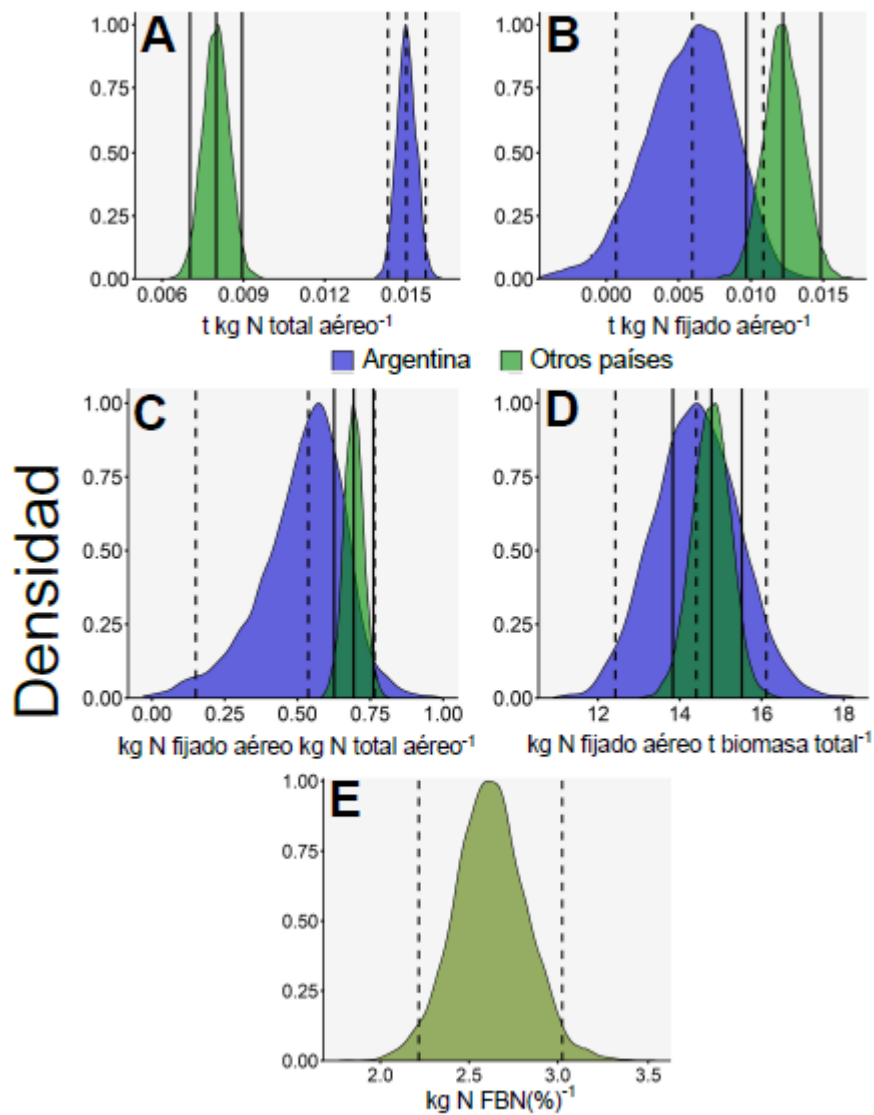


Figura Anexo 3. 1. Rendimiento del cultivo de maní en función de los años para distintos países con mayor adopción de tecnología (Argentina, Australia, Estados Unidos) y con baja adopción de tecnología (Burkina Faso, Ghana, India, Kenia, Sud África, Tailandia). La línea punteada marca el rendimiento promedio de Argentina, Australia y Estados Unidos (2968 kg ha⁻¹), y la línea sólida indica el rendimiento promedio de Burkina Faso, Ghana, India, Kenia, Sud África, Tailandia (1368 kg ha⁻¹). Burkina Faso, Ghana, India, Kenia, Sud África y Tailandia fueron los países considerados en la base datos de maní presentada en el Capítulo 1 de esta tesis. Lo datos para la elaboración de la presente figura fueron tomados de FAOSTAT (2021)(<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>).



Pendiente

Figura Anexo 3. 2. Distribución empírica de los valores estimados para las pendientes de la relación entre (A) el rendimiento y el N total aéreo, (B) el rendimiento y el N fijado aéreo, (C) el N fijado aéreo y el N total aéreo, (D) el N fijado aéreo y la biomasa total para la base de datos del maní producido en Argentina (azul) y el maní producido en otros países (verde). En (E), distribución empírica de los valores estimados para las pendientes de relación entre el balance parcial de N y la proporción de N fijada (FBN%) para el cultivo de maní producido en Argentina. En (A), (B), (C), (D) y (E), las líneas rayadas verticales indican los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha) para el maní producido en Argentina, mientras que las líneas verticales sólidas lo indican para el maní producido en otros países.

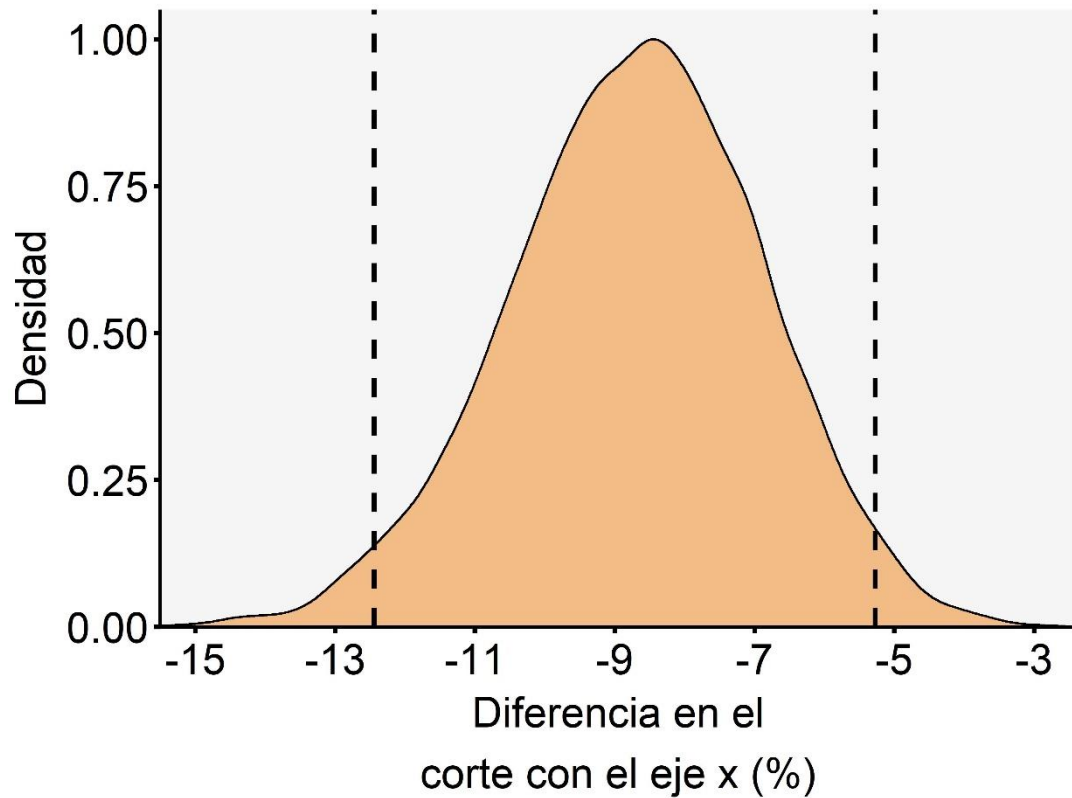


Figura Anexo 3. 3. Distribución empírica de la diferencia de los cortes con el *eje x* entre los modelos ajustados para el balance parcial de $N(y)$ (sin considerar el aporte de N por raíces) y el balance de $N(y)$ (considerando el aporte de N por raíces) con la proporción de N fijada $(FBN\%)(x)$. Las líneas verticales rayadas muestran los percentiles empíricos 2,5% (izquierda) y 97,5% (derecha).