



Análisis y comentario

Contribuciones del Laboratorio de Suelos y Foliares al desarrollo de la ciencia del suelo y la sostenibilidad agropecuaria en Costa Rica

Gabriel Garbanzo¹, Bryan Alemán-Montes^{2*}, Róger A. Fallas-Corrales³, Silvia Marin-Araya⁴, María F. Campos-Granados⁵, Juan C. Méndez⁶

*Autor de Correspondencia. Correo electrónico: bryan.aleman@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

²Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

³Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

⁴Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

⁵Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

⁶Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, 11501, San José, Costa Rica. 

DOI: <https://doi.org/10.15517/zv25tb59>

Recibido el 1 de noviembre del 2025; Aceptado el 17 de diciembre 2025

Resumen

Introducción. El Laboratorio de Suelos y Foliares (LSF), adscrito al Área de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Cultivos (AFSNC) del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, se ha consolidado como un referente nacional en el estudio de la relación suelo–planta y la nutrición vegetal. Su labor ha aportado evidencia científica clave para comprender y diagnosticar la fertilidad de los suelos, así como para apoyar la toma de decisiones orientadas a la gestión sostenible de suelos agrícolas. En este contexto, el presente trabajo propone una aproximación para identificar los principales aportes científicos del AFSNC y LSF, las áreas con avances incipientes y las posibles rutas de investigación y/o desarrollo en Costa Rica. **Métodos.** Se realizó un análisis sistemático de 308 publicaciones (1960–2025) vinculadas con el quehacer del AFSNC-LSF, las cuales se clasificaron según área de investigación, cultivo y usos del suelo, orden de suelo y elementos estudiados.

Resultados. Se han realizado investigaciones en ocho órdenes de suelo: Andisoles, Inceptisoles, Ultisoles, Vertisoles, Mollisoles, Entisoles, Alfisoles y Oxisoles. La nutrición de plantas destaca como la principal línea de trabajo (31,7% de los estudios), seguida por la química de suelos, el diagnóstico nutricional y la fertilidad de suelos. En cuanto a cultivos y usos del suelo, las plantaciones forestales y el café fueron los más investigados (16% y el 14% de los estudios, respectivamente). Respecto a los nutrientes y formas químicas, se identificaron investigaciones en 19 elementos. Los elementos más estudiados corresponden a P, Ca, K, Mg y N, reflejando su alta relevancia en la gestión agrícola nacional. **Conclusiones.** Este análisis evidencia líneas potenciales de investigación para el AFSNC en aspectos relacionados con cultivos y usos del suelo, órdenes de suelos, elementos y regiones de Costa Rica, permitiendo orientar estratégicamente futuras.

Palabras clave: análisis de suelos y foliares; fertilidad de suelos; nutrición de plantas; investigación agrícola; cultivos agrícolas y forestales.

Analysis and comment

Abstract

Contributions of the Soil and Foliar Laboratory to Soil Science Development and Agricultural Sustainability in Costa Rica

Introduction. The Soil and Foliar Laboratory (LSF), part of the Soil Fertility and Crop Nutrition Area (AFSNC) of the Agronomic Research Center (CIA) at the University of Costa Rica, has become a national reference in the study of soil–plant relationships and plant nutrition. Its work has provided key scientific evidence for understanding and diagnosing soil fertility, as well as supporting decision-making aimed at the sustainable management of agricultural soils. In this context, the present study offers an approach to identify the main scientific contributions of the AFSNC and LSF, the areas with emerging advances, and potential research and/or development in Costa Rica. **Methods.** A systematic analysis of 308 publications (1960–2025) related to the work of the AFSNC was conducted. Publications were classified according to research area, crop and land use, soil order, and associated elements. **Results.** Research has been conducted on eight soil orders: Andisols, Inceptisols, Ultisols, Vertisols, Mollisols, Entisols, Alfisols, and Oxisols. Plant nutrition stands out as the main research field (31.7% of studies), followed by soil chemistry, nutritional diagnosis, and soil fertility. Regarding crops and land uses, forest plantations and coffee were the most studied (16% and 14% of publications, respectively). Research was identified for 19 chemical elements. The most studied elements were P, Ca, K, Mg, and N, reflecting their high relevance in national agricultural management.

Conclusions. This analysis highlights potential research lines for the AFSNC related to crops and land uses, soil orders, chemical elements, and regions of Costa Rica. These insights can help to strategically guide future research.

Keywords: soil and foliar analyses; soil fertility; plant nutrition; agricultural research; agricultural and forestry crops.

Introducción

El Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica ha contribuido, durante sus 70 años de trayectoria, a la generación y transferencia de conocimiento novedoso para los sectores agrícola, pecuario, ambiental, y forestal, tanto en Costa Rica como a nivel internacional. Su origen se remonta al Laboratorio de Investigaciones Agronómicas, creado con el objetivo de realizar investigaciones y análisis en fertilidad de suelos. Posteriormente, este Laboratorio se transforma en el Área de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Cultivos (AFSNC), la cual constituye una de las cinco áreas actuales del CIA, donde realiza investigación orientada a generar información científica sobre procesos y manejos de la fertilidad de suelos, así como sobre nutrición de cultivos. Sus enfoques involucran investigaciones de laboratorio, invernadero y campo.

Esta área de investigación tiene adscrito el Laboratorio de Suelos y Foliares (LSF), equipado con alta tecnología para realizar análisis químicos relacionados con el diagnóstico de la fertilidad de suelos y nutrición de los cultivos. A lo largo de los años, el LSF se ha consolidado mediante la mejora continua de la calidad analítica y la precisión de los análisis químicos de suelos y tejidos vegetales. Además, brinda un servicio fundamental al desarrollo de la investigación agrícola y de la sociedad costarricense en general al realizar análisis químicos de insumos agrícolas como abonos orgánicos y fertilizantes, y análisis de aguas para fines agrícolas (Corrales *et al.* 2005). El LSF se ha consolidado como el laboratorio de referencia nacional ante la Red Latinoamericana de Laboratorios de Suelos (LATOSOLAN) y la Red Mundial de Laboratorios de Suelos (GLOSOLAN), permitiendo la participación activa en la elaboración y revisión de procedimientos operativos estándar, como por ejemplo el utilizado para la determinación del carbono total del suelo (FAO 2019).

Los aportes científicos realizados por investigadores vinculados al AFSNC y previamente al Laboratorio de Investigaciones Agronómicas, han contribuido de manera sustancial e interdisciplinaria al avance del conocimiento, tanto en el ámbito nacional como internacional.

A partir de estas investigaciones se ha construido una base sólida para la enseñanza de la ciencia del suelo en Costa Rica y su relación con los cultivos, aportando significativamente a la formación de profesionales en agronomía y de otras disciplinas afines, reafirmando el compromiso el LSF con la docencia universitaria como eje transversal a lo largo de su historia (Bertsch 1995, Henríquez y Cabalceta 1999).

La principal contribución del LSF se ha centrado en ofrecer servicios de análisis químicos de alta calidad que generan un impacto directo en el sector agroproductivo nacional y en las áreas sustantivas del quehacer universitario: docencia, investigación, y acción social. Actualmente, el LFS realiza más de 20.000 análisis químicos al año de los cuales entre el 15 y el 20% están relacionados con alguna de las tres áreas sustantivas de la Universidad de Costa Rica.

El presente trabajo ofrece una aproximación histórica y analítica al conocimiento generado por el personal de investigación vinculado al AFSNC y el Laboratorio de Investigaciones Agronómicas, así como su contribución en investigaciones desarrolladas en otras áreas del CIA, con el apoyo analítico del LSF. El estudio enfatiza en las principales áreas de investigación, los cultivos y usos del suelo estudiados, los órdenes de suelo analizados, los elementos asociados, las regiones de Costa Rica abordadas, así como las áreas de conocimiento aún no abordadas y las oportunidades para el desarrollo de futuras investigaciones. Esta información permite resaltar los alcances logrados en el AFSNC, el estado actual del conocimiento, y las líneas de investigación que emergen con potencial de desarrollo dada su relevancia científica y en el contexto agrícola y ambiental nacional. Este estudio tuvo como objetivo realizar un análisis integral de la producción científica generada desde el AFSNC, tanto por el personal adscrito como a través de las contribuciones del LSF en investigaciones desarrolladas en conjunto con otras áreas del CIA, con el fin de identificar sus principales aportes al desarrollo de la ciencia del suelo en Costa Rica, así como para identificar las áreas aún no investigadas y las posibles líneas de investigación y desarrollo que orienten el quehacer científico del área en el futuro.

Metodología

Este estudio se basó en una búsqueda exhaustiva de documentos cuya autoría correspondiera a personas vinculadas al AFSNC y a su antecesor, el Laboratorio de Investigaciones Agronómicas, abarcando desde las primeras publicaciones científicas de 1960 hasta agosto del 2025. Asimismo, se incluyeron investigaciones desarrolladas por personal de otras áreas del CIA y en las cuales se contó con participación directa del LSF (ver material suplementario). Sobre esa base se realizó un análisis que incluyó artículos en revistas científicas nacionales e internacionales, notas técnicas, libros, capítulos de libros, manuales de laboratorio y docencia, informes y comentarios, entre otros.

Esta diversidad de fuentes permitió integrar tanto publicaciones sometidas a revisión por pares (revistas) y comités editoriales, como documentos técnicos de gran relevancia para la docencia y la investigación. En la **Figura 1** se presenta la distribución de publicaciones según su cobertura (revistas y editoriales nacionales e internacionales) y el sistema de estudio (suelo y planta). En total se analizaron 308 documentos, de los cuales 185 corresponden al ámbito del suelo (133 en medios nacionales y 52 en internacionales) y 118 al ámbito de la planta (88 en medios nacionales y 30 en internacionales) y 5 documentos no incluidos en las categorías anteriores. La información evidencia que la mayoría de las publicaciones se concentran en el ámbito nacional (221), en comparación con las internacionales (82), lo cual demuestra un marcado enfoque de impacto nacional de las investigaciones desarrolladas históricamente.

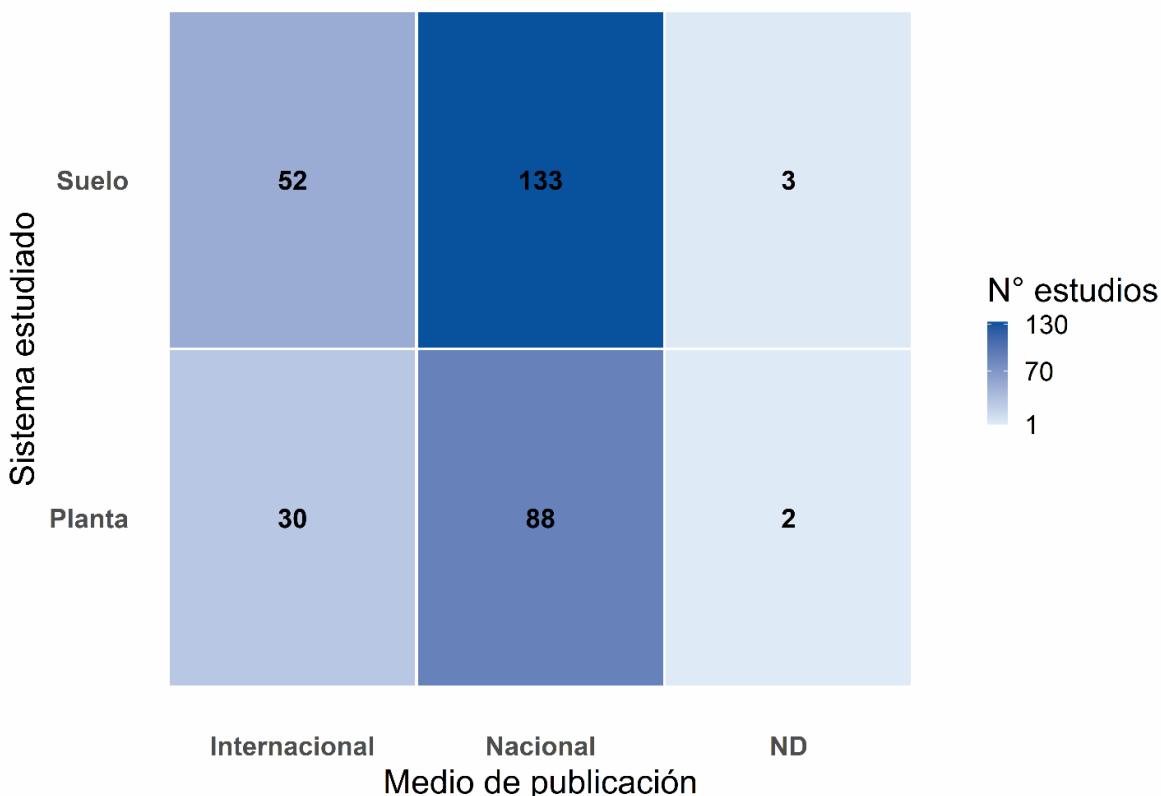


Figura 1. Distribución de estudios vinculados con el Área de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Cultivos (AFSNC), categorizadas según el medio de publicación (nacional e internacional) y por sistema estudiado (suelo o planta). N = 308, ND = no determinado.

Figure 1. Distribution of studies related to the Soil Fertility and Crop Nutrition Area (AFSNC), categorized according to the publication medium (national or international) and by the system studied (soil or plant). N = 308, ND = not determined.

Las principales variables extraídas de los documentos incluyeron título, año de publicación, objetivo, área de investigación, cultivo y usos del suelo, orden de suelo, y nutrimento estudiado, entre otros. Posteriormente, los datos fueron organizados y catalogados en tablas, y analizados mediante el software estadístico R software versión 2024.04.1 (R Core Team 2024), lo cual permitió la sistematizar y visualizar la información de manera clara y comparativa.

Resultados

Se sistematizaron los aportes en investigación publicada en revistas y capítulos de libros del personal adscrito al AFSNC y su antecesor el Laboratorio de Investigaciones Agronómicas, así como los aportes a otras áreas del CIA con aporte analítico del LSF, durante las siete décadas, desde la creación del Centro, en el campo de la ciencia del suelo y la nutrición de plantas desde una perspectiva histórica y contextual. La integración de las distintas fuentes de información permitió identificar tanto los avances alcanzados como las potenciales líneas de investigación que se podrán desarrollar en los años venideros. Estos resultados proporcionan una base sólida para orientar las nuevas preguntas de investigación y fortalecer la vinculación de la producción científica del AFSNC con la sociedad y los sectores productivos.

1) Áreas de investigación

Las contribuciones científicas de las personas que han formado parte del AFSNC, así como aquellas en las que el LSF haya tenido aportes significativos, fueron sistematizadas en 14 categorías, como se muestra en la **Figura 2A**. Entre ellas, destacan nutrición de plantas (31,7%), química de suelos (19,6%), diagnóstico nutricional de los cultivos (18,0%) y fertilidad de suelos (13,7%), que constituyen las más abordadas durante el periodo de investigación. Un segundo grupo de importancia lo conforman variabilidad espacial y general suelos con 4,2% y 3,6%, respectivamente. Las restantes nueve categorías (física de suelos, salinidad de suelos, encalado, revisión de literatura, acción social, fenología, interdisciplinar e hidrología) registraron porcentajes inferiores a 1,6% (**Figura 2A**).

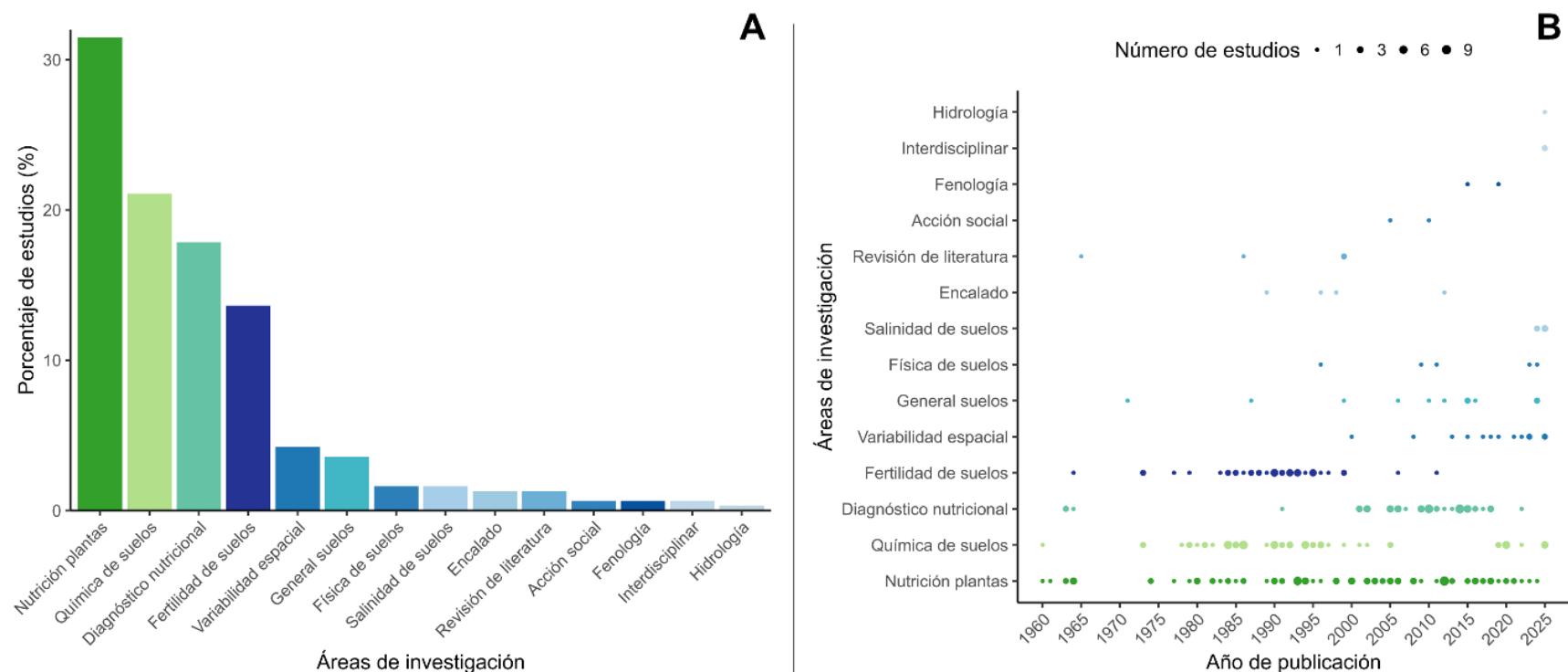


Figura 2. Distribución porcentual de los estudios por áreas de investigación (A). Tendencia temporal de la cantidad de estudios por áreas de investigación (B).

Figure 2. Percentage distribution of studies by research areas (A). Temporal trend in the number of studies by research areas (B).

Las áreas de investigación han sido abordadas con distinta intensidad a lo largo del período evaluado, como se muestra en la **Figura 2B**. La investigación en nutrición de plantas constituye el único campo con aportes constantes durante todo el periodo (Carvajal 1960, Bornemisza *et al.* 1984, Cabalceta y Cordero 1991, Molina 2000a, Bertsch *et al.* 2009, Alvarado y Thiele 2012, Garbanzo-León *et al.* 2024). En contraste, otras áreas, como fertilidad de suelos y diagnóstico nutricional, registraron sus mayores contribuciones entre 1980 y 2000, y entre 2000 y 2020, respectivamente (Sánchez *et al.* 1985, Salas *et al.* 1995, Fallas *et al.* 2014a, Garbanzo-León y Vargas-Gutiérrez 2017). La química de suelos concentró el mayor número de sus aportes antes de 2005 y después de 2019 (Briceño y González 1981, Bornemisza *et al.* 1990, Bertsch *et al.* 2005, Mendez y Hiemstra 2020, Fallas-Corrales *et al.* 2025, Campos-Granados y Méndez 2025), mientras que los estudios sobre variabilidad espacial muestran un incremento en sus contribuciones a partir de 2010 (Henríquez *et al.* 2013, Alemán-Montes *et al.* 2019, Alemán-Montes *et al.* 2025). Estos patrones temporales se originan por dos razones principales: primero, la capacidad de adaptación del área de trabajo a las necesidades emergentes de investigación en los sectores agrícola y ambiental; y segundo, los relevos generacionales ocurridos a través de las décadas, lo que propicia el surgimiento de enfoques de investigación distintos a los anteriores. Por otra parte, las áreas restantes presentan una trayectoria más aleatoria, lo que dificulta identificar patrones evidentes en la evolución de sus aportaciones científicas (**Figura 2B**).

2) Cultivos y usos del suelo

Las investigaciones en plantaciones forestales y café destacan como los cultivos y usos del suelo más estudiados, con un 16% y un 14,3%, respectivamente (**Figura 3A**). Cabe señalar que muchas de las contribuciones en investigaciones sobre plantaciones forestales se han llevado a cabo por investigadores del Laboratorio de Recursos Naturales del CIA (LRN), con apoyo analítico del LSF (Montagnini *et al.* 1996, Alvarado y Raigosa 2012). Por su parte, el arroz y la caña de azúcar han sido objeto de estudio en aproximadamente el 7% de las investigaciones. Otros cultivos investigados incluyen palmito, sorgo, frijol, pastos, banano y palma aceitera, con proporciones que oscilan entre el 5% y el 3,3% de los estudios analizados. Finalmente, se identificaron otros cultivos y usos del suelo con porcentajes de aparición inferiores al 3% (**Figura 3A**).

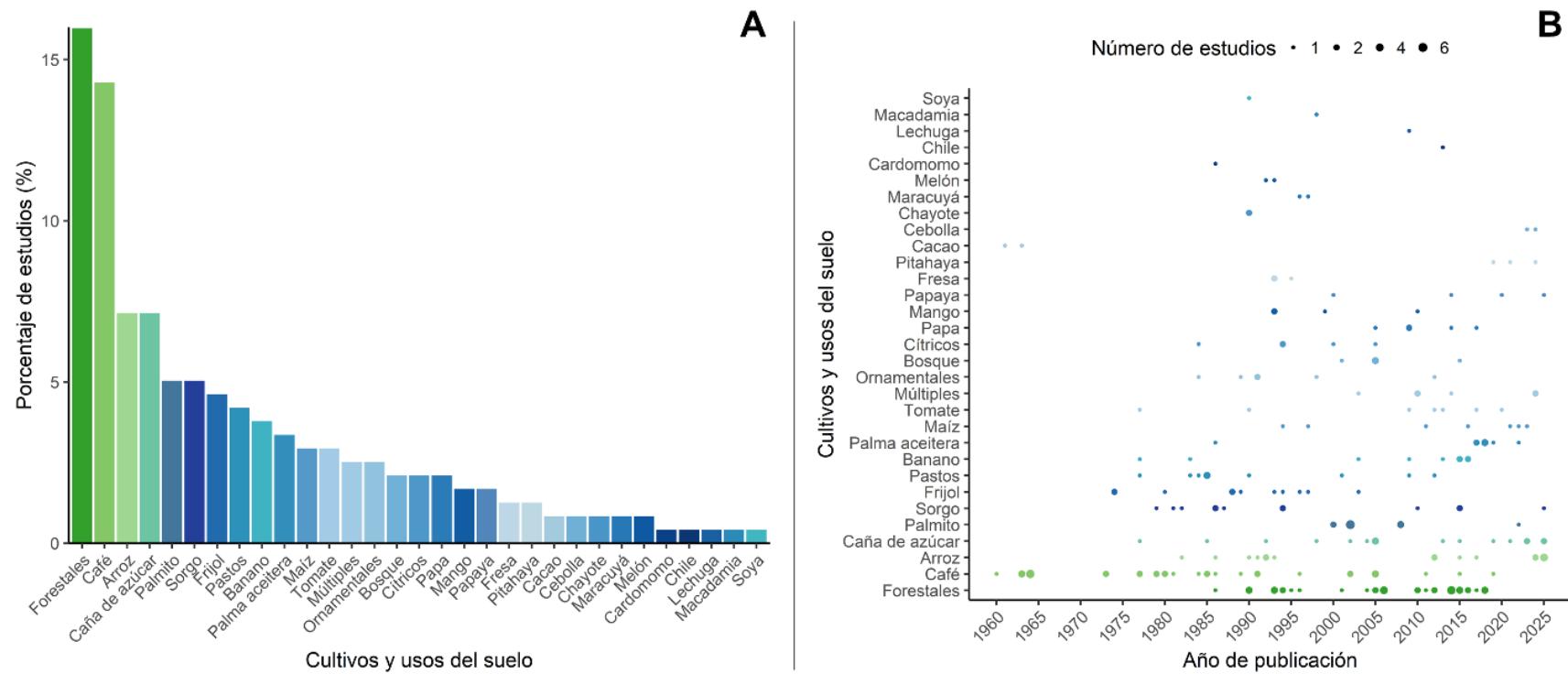


Figura 3. Distribución porcentual de los estudios por cultivos y usos del suelo (A). Tendencia temporal de la cantidad de estudios por cultivos y usos del suelo (B).

Figure 3. Percentage distribution of studies by crops and land uses (A). Temporal trend in the number of studies by crops and land uses (B).

La cantidad de estudios durante el período evaluado, considerando los cultivos y usos del suelo, muestra una tendencia clara para las plantaciones forestales, cuyas principales contribuciones se registraron entre 1990 y 2018 (**Figura 3B**) (Montagnini y Sancho 1995, Alvarado 2006, Fernández-Moya *et al.* 2015). En contraste, las investigaciones en café presentan una trayectoria irregular, alcanzando el mayor número de publicaciones antes de 1965 y entre 1975 y 2005 (Carvajal 1963, Bertsch *et al.* 1991, Ramírez *et al.* 2002, Henríquez 2015). Por su parte, las investigaciones en arroz y caña de azúcar han sido intermitentes desde 1976 hasta la actualidad (Cordero y Murillo 1990, Valerio y Molina 2012, Velázquez *et al.* 2015, Alemán-Montes *et al.* 2023), mientras que en palmito las principales aportaciones se concentraron entre 2000 y 2008 (Molina 2000b, Molina *et al.* 2002a, Boniche *et al.* 2008). En el caso de frijol, pastos y banano, la producción científica ha sido limitada en la última década, como se evidencia en la **Figura 3B**. Finalmente, los estudios sobre otros cultivos y usos del suelo presentan una alta inconsistencia a lo largo de todo el período analizado.

3) Órdenes de suelo

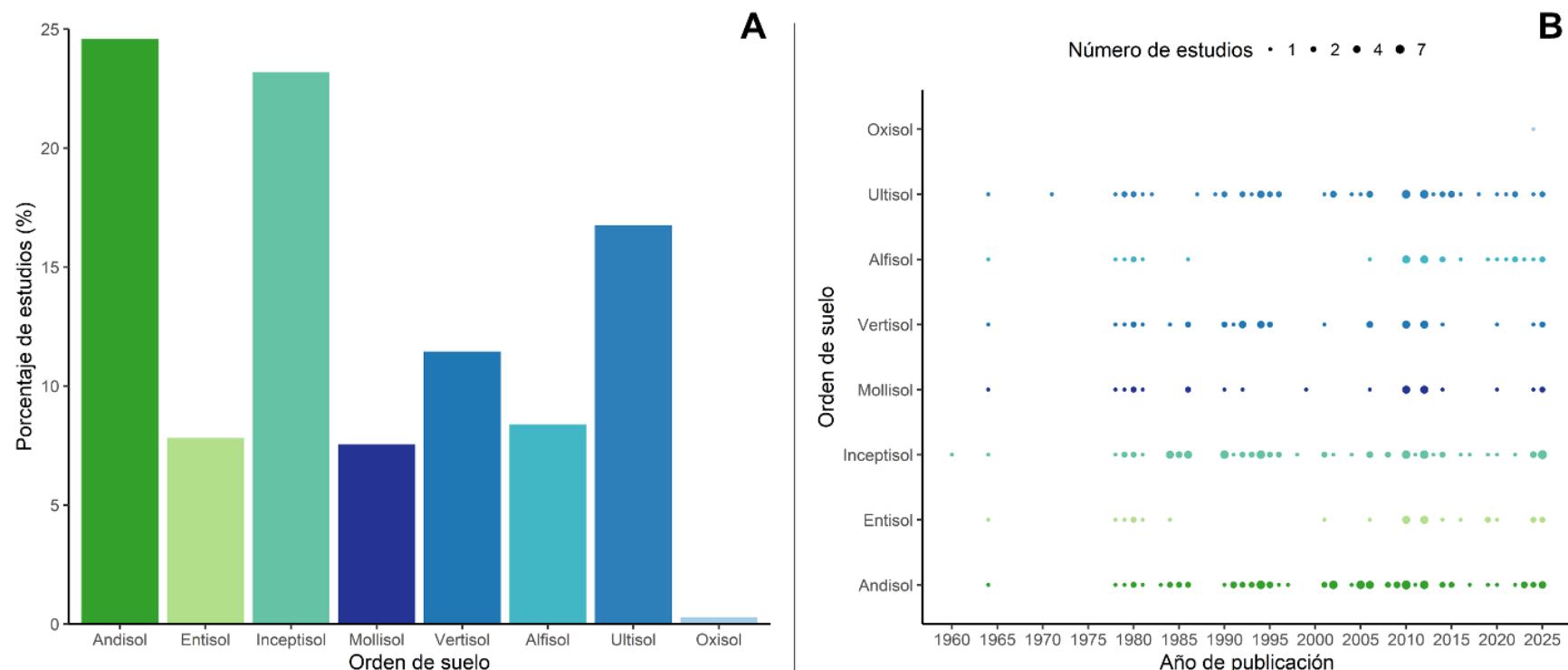
Los estudios interdisciplinarios que han contado con el apoyo analítico del LSF como referencia para la cuantificación de nutrientes han documentado investigaciones en ocho órdenes de suelos (**Figura 4A**). Estos corresponden, en orden ascendente de desarrollo pedogenético, a Andisoles, Entisoles, Inceptisoles, Mollisoles, Vertisoles, Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles. Los órdenes de suelos más estudiados en el país han sido los Andisoles e Inceptisoles, seguidos por los Ultisoles y Vertisoles, con una representación aproximada del 24%, 23%, 16% y 12%, respectivamente. Estos cuatro órdenes de suelo representan aproximadamente 69,6% del territorio nacional (Mata *et al.* 2022). En menor proporción han sido estudiado los Entisoles, Mollisoles y Alfisoles, alcanzando porcentajes inferiores al 10%.

Cabe destacar que la colaboración entre distintos laboratorios del CIA, específicamente el LSF y el LRN, ha permitido el desarrollo de metodologías analíticas más precisas y eficientes para la identificación y el estudio de los Oxisoles en Costa Rica (**Figura 4A**) (Camacho *et al.* 2021; Camacho-Umaña *et al.* 2024a). Hasta la fecha, solo se han registrado dos estudios relacionados con este orden de suelo en colaboración con el LSF, lo que constituye un desafío que debería abordarse en futuras investigaciones, dada su relevancia para actividades como la producción de caña de azúcar, la ganadería y la producción forestal. En la **Figura 4B** se observa que la mayoría de los órdenes de suelo han sido estudiados de manera continua desde 1977 hasta la actualidad (Sauerbeck *et al.* 1979, Salas y Pacheco 1985, Vargas *et al.* 1992, Molina *et al.* 2002b, Araya *et al.* 2015, Marín-Araya y Villatoro-Sánchez 2023). Sin embargo, a partir del 2005, se evidencia un incremento en los estudios que abarcan simultáneamente la mayoría de los órdenes de suelos del país (Cabalceta 2010; Méndez y Bertsch 2012), con excepción de los Oxisoles, cuya presencia en publicaciones se registra únicamente en los últimos años (Camacho *et al.* 2021; Camacho-Umaña *et al.* 2024b). Es relevante señalar que entre 2010 y 2015 se alcanzó una densidad significativa de investigaciones con participación de personas vinculadas al AFSNC, registrándose al menos tres estudios por cada orden de suelo durante ese periodo.

4) Elementos analizados

En las publicaciones académicas con participación del AFSNC se han analizado 19 elementos. Estos incluyen: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, Al, C, B, Na, Si, Mo, As, Pb y Cl (**Figura 5A**). Entre ellos, los elementos con mayor frecuencia de aparición en las investigaciones fueron P (11,3%), seguido en orden decreciente por Ca (10,1%), K (9,7%), Mg (9,2%) y N (8,6%) (**Figura 5A**). Este patrón refleja un marcado interés en la generación de investigaciones relacionadas con los nutrientes de mayor relevancia para el crecimiento de los cultivos y que constituyen la limitante más frecuente para la productividad agrícola. Específicamente, el P y el N son los elementos que con mayor frecuencia representan una limitación nutricional en los suelos agrícolas de Costa Rica, mientras que la importancia del Ca y Mg se evidencia en su uso común como enmiendas para corregir los problemas de acidez, los cuales están presentes aproximadamente el 50% de las muestras de suelos agrícolas de Costa Rica (Méndez y Bertsch 2012).

1



2

3 **Figura 4.** Contribución porcentual y temporal de las investigaciones realizadas por el personal adscrito al AFSNC y otras áreas del CIA con apoyo
4 analítico del LSF por órdenes de suelo. Distribución porcentual de estudios por orden de suelo (A). Línea de tiempo que evidencia la
5 continuidad y los vacíos de investigación (B).

6 **Figure 4.** Percentage and temporal contribution of research conducted by personnel affiliated with the AFSNC and other divisions of the CIA, with
7 analytical support from the LSF, classified by soil orders. Percentage distribution of studies by soil order (A). Timeline showing the
8 continuity and gaps in research (B).

9

10

Otros elementos, como Mn, Zn, Cu, Fe, Al, S, B y C, se reportaron en porcentajes que oscilan entre 8% y 3,3% de las investigaciones. Finalmente, los elementos menos estudiados correspondieron, en orden decreciente, a Na, Si, Mo, As, Cl y Pb, los cuales estuvieron presentes en menos del 1% de los estudios.

La trayectoria temporal de las publicaciones revela una densidad constante de estudios desde 1985 hasta la actualidad (**Figura 5B**). Este comportamiento puede asociarse con la implementación a gran escala de los análisis químicos de rutina realizados por el LSF, los cuales incluyen evaluaciones químicas completas de suelo y planta que, desde mediados de la década de 1980, se ofrecen tanto al público en general como a los proyectos de investigación desarrollados en el propio Laboratorio (Sancho y Cordero 1984, Subirós y Molina 1992, Cabalceta y Molina 2006, Méndez y Bertsch 2011, Fallas *et al.* 2014b, Garbanzo-León *et al.* 2017). Asimismo, aunque en décadas anteriores se exploraron elementos como As, Pb y Cl (Pereira y Yamaguchi 1964), en la actualidad no se reportan nuevos estudios sobre ellos. En contraste, durante los últimos diez años, el LSF ha incorporado líneas de investigación enfocadas en nutrientes y formas químicas menos tradicionales, como Si y Na, lo cual evidencia un creciente interés por comprender el papel de estos elementos y su dinámica en los suelos (Garbanzo *et al.* 2018, Garbanzo *et al.* 2025).

5) Áreas relevantes para futuras investigaciones

Las contribuciones científicas con participación del AFSNC abarcan diversas aristas del conocimiento, lo que refleja el carácter interdisciplinario de sus aportaciones. Sin embargo, dada la naturaleza del área de investigación, resulta necesario fortalecer nuevamente las líneas de investigación relacionadas con el diagnóstico nutricional y la fertilidad de suelos, incorporando nuevos avances en el conocimiento y tecnologías que anteriormente no estaban disponibles o no se implementaban a nivel nacional, por ejemplo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección y la cuantificación y modelización del movimiento de solutos (por ejemplo nutrientes) en medios porosos como suelo o sustratos.

Asimismo, a partir de este análisis se identifica que la mayor parte de las investigaciones han sido dirigidas a sistemas agrícolas, mientras que se constata una notable y una limitada presencia de estudios en el ámbito ambiental. Esta brecha representa un nicho de alto impacto para desarrollar aportes focalizados en esta dimensión.

En esta dirección, el fortalecimiento de la investigación en la calidad química de suelos, bajo el enfoque de la multifuncionalidad de este recurso, se perfila como una línea estratégica a desarrollar en el futuro. Para la consolidación de esta línea, los aportes del LSF serán esenciales en el desarrollo y validación de metodologías, por ejemplo, en la determinación de diferentes fracciones de materia orgánica en el suelo y en la cuantificación de fracciones de metales pesados con distintos grados de disponibilidad.

El análisis de las contribuciones por cultivos y usos del suelo evidencia los múltiples aportes en cultivos estratégicos para la economía nacional y la seguridad alimentaria, destacando el café, el arroz y la caña de azúcar como los más investigados. Asimismo, sobresalen estudios en palmito, frijol, pastos, banano y palma aceitera, indicando que la mayoría de las investigaciones se han centrado en cultivos extensivos. No obstante, se identifica la necesidad de continuar generando aportes en estos cultivos e iniciar investigaciones en cultivos de alto impacto económico y social, como hortalizas y tubérculos, dado que los aportes científicos en estos casos son limitados o solamente han quedado plasmados en documentos de tesis o trabajos finales de graduación que no necesariamente se publicaron en revistas con revisión por pares. De igual manera, se observa la ausencia de publicaciones del AFSNC en el cultivo de piña, lo que constituye una oportunidad relevante para futuras investigaciones, considerando el impacto social y económico que este cultivo tiene en múltiples regiones rurales del país.

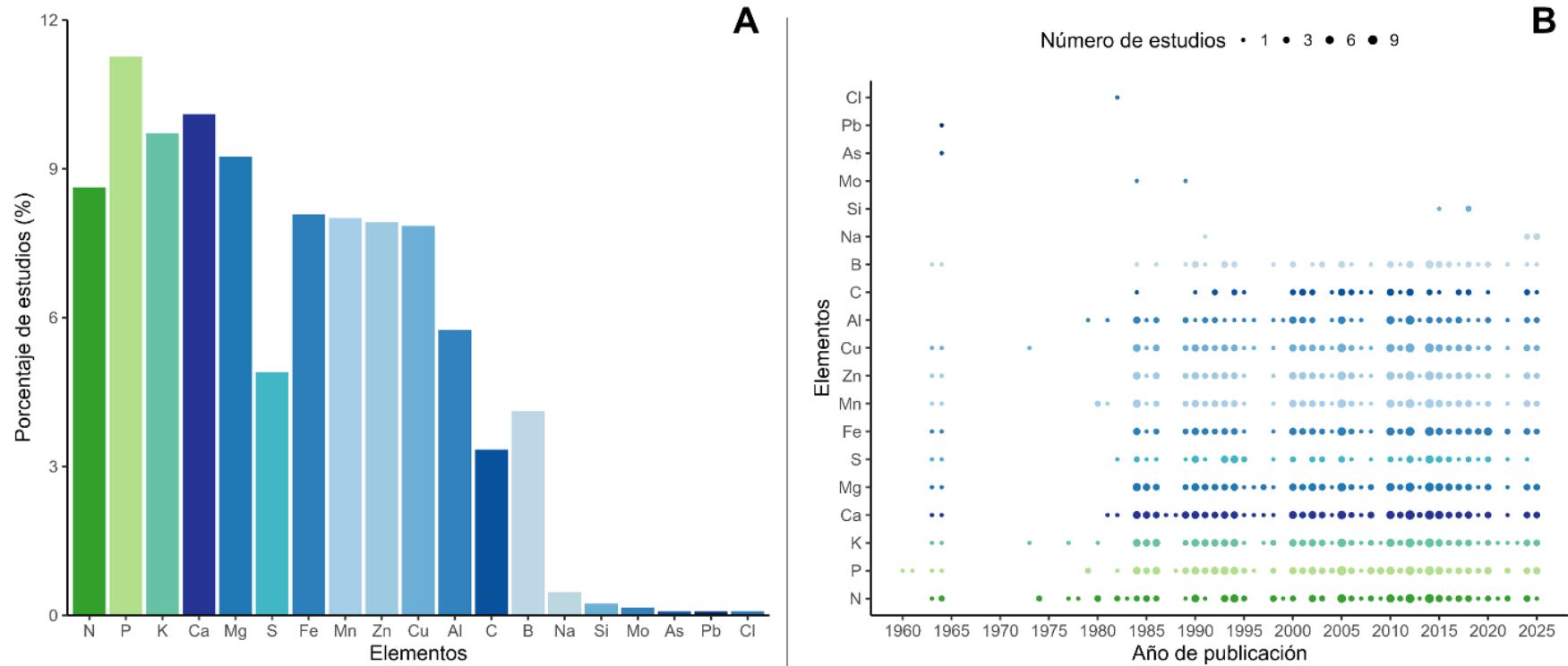


Figura 5. Elementos analizados en estudios realizados por personal adscrito al AFSNC o con apoyo analítico del LSF, indicando su frecuencia relativa de análisis (A). Evolución temporal de los estudios de los diferentes elementos en el LSF entre 1960 y 2025 (B).

Figure 5. Elements analyzed in studies conducted by personnel affiliated with the AFSNC or with analytical support from the LSF, indicating their relative frequency of analysis (A). Temporal evolution of studies on the different elements at the LSF between 1960 and 2025 (B).

Al analizar los estudios sobre elementos en el suelo y formas químicas, permitió identificar dos áreas con alto potencial para futuras investigaciones, las relacionadas con la interacción suelo–planta y las vinculadas con nutrientes esenciales para la nutrición vegetal (**Figura 6A**). En el primer grupo, referente a elementos no esenciales para las plantas, se encontró que el arsénico (As), el plomo (Pb) y el sodio (Na) requieren mayor atención investigativa en el país, debido a la necesidad de comprender sus interacciones en el suelo y la planta. En cuanto al segundo grupo, relativo a elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, se identificó que los cloruros (Cl^-), el molibdeno (Mo) y el níquel (Ni) aún presentan una marcada carencia de estudios, estos dos últimos elementos relevantes en procesos de fijación simbiótica de N y en el metabolismo del N en las plantas. Estos hallazgos ponen en evidencia la necesidad de realizar investigaciones en Mo y Ni, dado su papel fundamental en la productividad de los cultivos y en la salud de las plantas.

El análisis por provincias y órdenes de suelo reveló que Puntarenas, Limón, Guanacaste y Heredia presentan la menor frecuencia de investigaciones (**Figura 6B**). Asimismo, se observó una mayor producción de publicaciones y colaboraciones a nivel nacional en comparación con las publicadas en el extranjero. Respecto a los órdenes de suelo, los más investigados en el país han sido los Andisoles e Inceptisoles, mientras que Vertisoles, Ultisoles, Alfisoles, Entisoles y Mollisoles presentan una menor representación. Cabe destacar que Guanacaste, además de ser una de las provincias con menor número de estudios, constituye la única región en la que se han reportado investigaciones en Entisoles y Mollisoles. Por el contrario, Andisoles, Inceptisoles y Ultisoles han sido estudiados en la mayoría de las provincias del país, lo que evidencia la relevancia de cada orden de suelo para la producción agropecuaria y forestal en las distintas regiones del país.

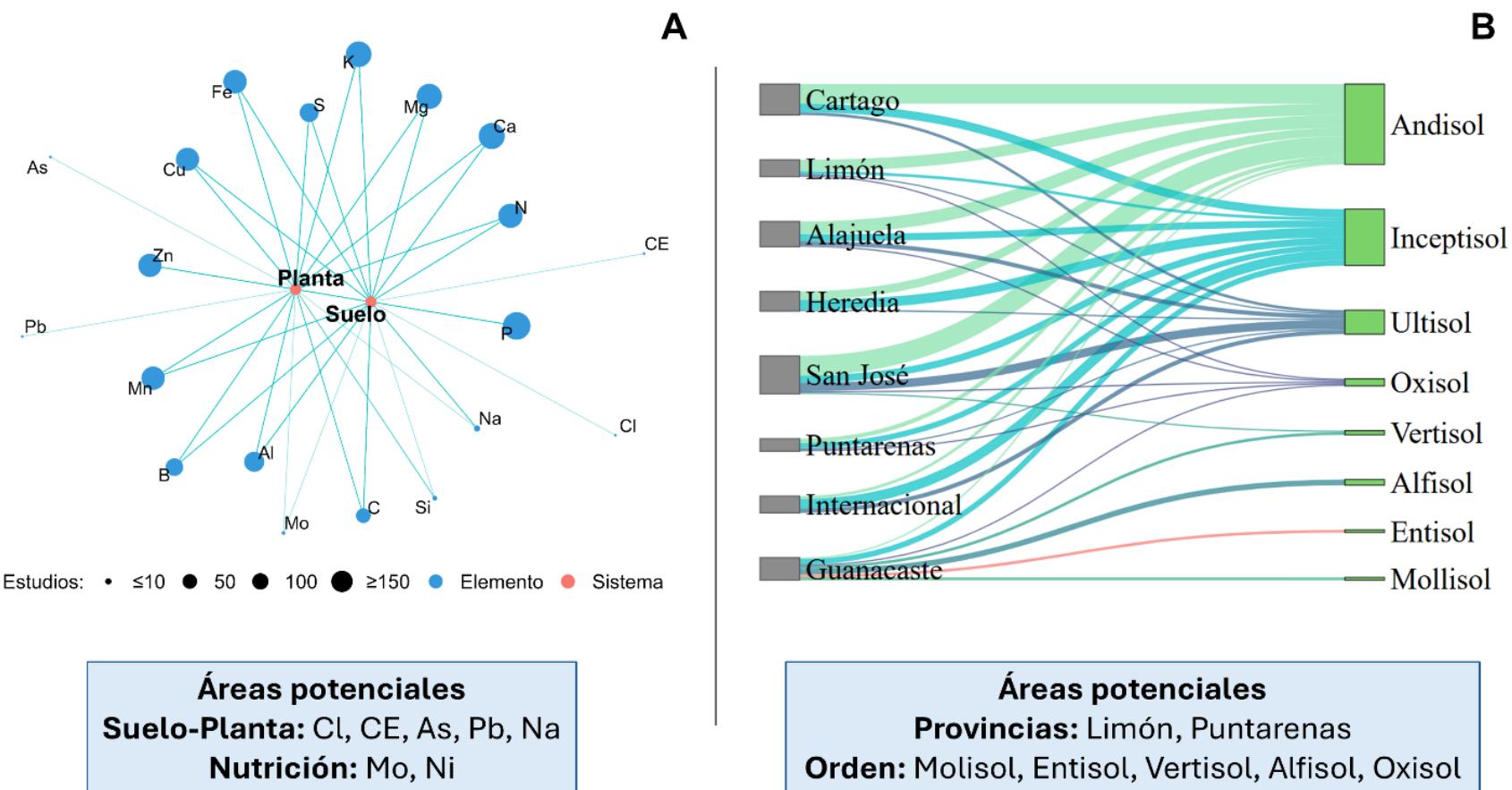


Figura 6. Red de relaciones suelo–planta–elemento (A). Los elementos más cercanos a cada sistema corresponden a los más estudiados. Frecuencia de estudios realizados en provincias de Costa Rica por órdenes de suelo (B). El grosor de las barras, gris para las provincias y verde para los órdenes de suelo, indica la densidad de estudios realizados.

Figure 6. Soil–plant–element relationship network (A). Elements closest to each system correspond to those most frequently studied. Frequency of studies conducted in provinces of Costa Rica by soil orders (B). The thickness of the bars, gray for provinces and green for soil orders, indicates the density of studies conducted.

Oportunidades de investigación del AFSNC y apertura para cooperación público/privado

El LSF se ha consolidado como un referente nacional en el estudio de la fertilidad de suelos y la nutrición vegetal, gracias a la rigurosidad de sus análisis de suelos y tejidos vegetales que contribuyen a la gestión agropecuaria, forestal y ambiental del país, así como a las aportaciones académicas constantes de las personas vinculadas al AFSNC. No obstante, este análisis evidenció algunos vacíos de conocimiento que representan oportunidades estratégicas de investigación. Entre ellos destacan el estudio de elementos poco abordados, como los micronutrientes y metales pesados en suelos, cuya ausencia limita la comprensión integral de la nutrición y salud vegetal, su comportamiento en el suelo, y las implicaciones desde el punto de vista de sostenibilidad ambiental.

Los trabajos científicos del AFSNC asociados con los órdenes de suelo requieren de una integración entre unidades de investigación. Esto con el fin de integrar conocimientos y enriquecer las contribuciones científicas con abordajes interdisciplinarios que favorezcan la integración de conocimientos. Se destaca la gran importancia de estudiar de forma interdisciplinaria la limitada cobertura en provincias como Puntarenas, Limón, Guanacaste y Heredia, abriendo un campo de acción para fortalecer la investigación regional y generar información más representativa para la toma de decisiones agro-productivas del país.

Actualmente, el fortalecimiento del LSF también se proyecta hacia la incorporación de nuevas tecnologías y metodologías en desarrollo, que incrementan la precisión analítica y la capacidad de investigación del personal académico asociado a las distintas áreas de investigación del CIA. El área a través de su laboratorio tiene el potencial de ampliar sus líneas acción hacia la determinación de metales pesados y contaminantes emergentes, al mismo tiempo que impulsa la generación de contribuciones académicas con mayor impacto nacional e internacional. La incorporación de personal científico con experiencia académica y de investigación en distintos contextos internacionales, en conjunto con colaboraciones entre instituciones de diferentes países, representa una oportunidad estratégica para potenciar la generación y difusión del conocimiento científico.

Asimismo, la aplicación de herramientas avanzadas de ciencia de datos, como el aprendizaje automático (*machine learning*), junto con el uso de la geoinformación, el análisis de la variabilidad espacial, el estudio del comportamiento geoquímico y de la movilidad solutos en el suelo, abre nuevas perspectivas para comprender la complejidad de la fertilidad de los suelos en el país. Esta convergencia de capacidades humanas, tecnológicas y analíticas posicionará al AFSNC como un nodo de innovación abierto a la colaboración entre instituciones nacionales e internacionales, con el propósito de generar impacto tanto en el desarrollo agrícola nacional como en los debates científicos internacionales.

Finalmente, las oportunidades de cooperación entre el sector público y privado resultan fundamentales para consolidar estas líneas de investigación. La visión del AFSNC enfatiza la articulación del conocimiento generado en instituciones académicas, entidades estatales, empresas agrícolas, industrias de fertilizantes, organismos internacionales y agricultores, con el fin de ampliar la base de información y fortalecer la capacidad analítica para diversificar el impacto de los futuros estudios sobre fertilidad de suelos y nutrición de plantas en el país. A su vez, la creación de alianzas estratégicas favorecerá la transferencia tecnológica, el financiamiento de proyectos y la formación de recursos humanos especializados. De esta forma, el AFSNC fortalecería su papel como ente académico, consolidando su impacto en la innovación y sostenibilidad del sector agroalimentario costarricense.

Agradecimientos

Las personas autoras expresan su más sincero agradecimiento al personal del LSF, tanto a quienes actualmente forman parte de la institución como a quienes en el pasado contribuyeron con su labor. Su trabajo y compromiso cotidiano han sido fundamentales para fortalecer la gestión agropecuaria del país y para impulsar el desarrollo de investigaciones de gran relevancia científica. Asimismo, manifiestan su gratitud hacia quienes han estado vinculados al AFSNC, por sus aportes y por la consolidación de los cimientos de esta área de investigación. De igual manera, extienden su reconocimiento a las demás áreas que conforman el CIA (Recursos Naturales, Biotecnología de Plantas, Microbiología Agrícola y Tecnología Poscosecha) así como a la Escuela de Agronomía, por sus contribuciones en la consolidación del AFSNC.

Literatura citada

Alemán-Montes, B; Búcaro-González, A; Henríquez-Henríquez, C; Largaespada-Zelaya, K. 2019. Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 43(2):157-166.

Alemán-Montes, B; Serra, P; Zabala, A; Masó, J; Pons, X. 2025. A Near Real-Time Spatial Decision Support System for improving Sugarcane Monitoring Through a Satellite Mapping Web Browser. *Smart Agricultural Technology* 101084.

Alemán-Montes, B; Zabala, A; Henríquez, C; Serra, P. 2023. Modelling Two Sugarcane Agro-Industrial Yields Using Sentinel/Landsat Time-Series Data and Their Spatial Validation at Different Scales in Costa Rica. *Remote Sensing* 15(23):5476.

Alvarado, A. 2006 Nutrición y fertilización de la teca. *Informaciones Agronómicas* 61:1–8

Alvarado, A; Thiele, H. 2012. Nutrición y fertilización del eucalipto (*Eucalyptus spp.*). In Alvarado, A; Raigosa, J (Eds.). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. p. 257–280.

Alvarado, A; Raigosa, J. 2012. *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 415 p.

Araya, MA; Camacho, ME; Molina, E; Cabalceta, G. 2015. Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero. *Agronomía Costarricense* 39(2):47-60.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.

Bertsch, F; Bejarano, JA; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142.

Bertsch, F; Henríquez, C; Cabalceta, G. 1991. Respuesta del cafeto a la modificación de los cocientes catiónicos en el suelo en dos zonas cafetaleras de Costa Rica. Agronomía Costarricense 15(1/2):113–121.

Bertsch, F; Ramírez, F; Henríquez, C. 2009. Evaluación del fosfato como fuente fertilizante de fósforo vía radical y foliar Agronomía Costarricense 33 (2): 249-265.

Boniche, J; Alvarado, A; Molina, E; Smyth, TJ. 2008. Descomposición y liberación de carbono y nutrientos de los residuos de cosecha en plantaciones de pejibaye para palmito en Costa Rica. Agronomía Costarricense 32(1):73-86.

Bornemisza, E; Hernández, R; Cascante, X; Donatti, L. 1984. Variación anual de los contenidos minerales foliares en tres cultivares de naranja en Orotina y Alajuela. Agronomía Costarricense 8(2):105-110.

Bornemisza, E; Morúa, J. E; Villalobos, C. 1990. Movimiento de la diciandiamida, un inhibidor de nitrificación en Andisoles y Ultisoles. Agronomía Costarricense 14(2):151-156.

Briceño, JA; González, MA. 1981. Formas de manganeso en 20 suelos cafetaleros de Costa Rica. II. Comparación entre muestras de bandas y entrecalles. Ingeniería y Ciencia Química 5(2):59-60.

Cabalceta, G. 2010. Análisis de suelos y su interpretación en zonas tropicales. En Usón, A; Boixadera, J; Bosch, A; Enrique, A. (Eds.). Tecnología de suelos: estudio de casos. Zaragoza, Estaña. Prensas Universidad de Zaragoza. p. 351-370.

Cabalceta, G; Cordero, A. 1991. Efectos de salinidad en arroz bajo riego en Guanacaste. Agronomía Costarricense 15(1):167-172.

Cabalceta, G; Molina, E. 2006. Niveles críticos de nutrientes en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. Agronomía Costarricense 30(2):31-44.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Víquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. Catena, 197, 104992.

Camacho-Umaña, ME; Quesada-Román, A; Villaturo-Sánchez, M; Alemán-Montes, B; Mata, R; Henríquez-Henríquez, C; Céspedes-Rivera, J; Alvarado, A. 2024a. Highly weathered landscapes of Costa Rica. In Quesada-Román, A. (Ed). Landscapes and Landforms of Costa Rica. Cham, Switzerland. Springer. p. 431-451.

Camacho-Umaña, ME; Quesada-Román, A; Villatoro-Sánchez, M; Alemán-Montes, B; Mata, R; Henríquez-Henríquez, C; Céspedes-Rivera, J; Céspedes-Rivera, M; Alvarado, A. 2024b. Agricultural Landscapes of Costa Rica. In Quesada-Román, A. (Ed). Landscapes and Landforms of Costa Rica. Cham, Switzerland. Springer. p. 431-451

Campos-Granados, MF; Méndez, JC. 2025. Relación entre metodologías de determinación de conductividad eléctrica y concentración de cationes solubles en suelos de Costa Rica. Agronomía Costarricense 49(01) <https://doi.org/10.15517/vf5xpa16>

Carvajal, JF. 1960. Estudio de las deficiencias de nitrógeno, potasio, magnesio, boro y manganeso, en plantas de café (*Coffea arabica var. typica*). Biología Tropical 8(2):165-179.

Carvajal, JF. 1963. La toma de muestras foliares en cafetos para fines de diagnóstico. Café 5:25-33.

Cordero, A; Murillo, JI. 1990. Remoción de nutrientes por el cultivar de arroz CR-1821 bajo inundación. Agronomía Costarricense 14(1):79-84.

Corrales, M; Bertsch, F; Bejarano, JA. 2005. Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: Informe del comité de laboratorios de análisis de suelos, plantas y aguas. Agronomía Costarricense 29(3):125-135.

FAO (Food Agriculture Organization). 2019. Procedimiento operativo estándar para la determinación de carbono total del suelo - Método de combustión seca Dumas. Consultado en noviembre de 2026: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7781es>

Fallas, R; Bertsch, F. 2014a. Análisis del estado nutrimental del cultivo de la papa en Costa Rica con base en información existente. Agronomía Costarricense 38(1):199-206.

Fallas, R; Bertsch, F; Barrientos, M. 2014b. Curvas de absorción de nutrientes en papaya (*carica papaya L.*) cv. “Pococí” en las fases de crecimiento vegetativo, floración e inicio de cosecha. Agronomía Costarricense 38(2):43-54.

Fallas-Corrales, RA; Mendez, JC; Meeussen, JC. 2025. Boron adsorption and interaction with phosphate in a volcanic soil from the humid tropic. Journal of Plant Nutrition and Soil Science <https://doi.org/10.1002/jpln.70012>.

Fernández-Moya, J; Alvarado, A; Mata, R; Thiele, H; Segura, JM; Vaides, E; San Miguel-Ayanz, A; Marchamalo-Sacristán, M. 2015. Soil fertility characterisation of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. Soil Research 53:423–432.

Garbanzo, G; do Rosário Cameira, M; Paredes, P; Temudo, M; Ramos, TB. 2025. Modeling soil water and salinity dynamics in mangrove swamp rice production system of Guinea Bissau, West Africa. Agricultural Water Management 313:109494.

Garbanzo, G; Molina, E; Cabalceta, G; Serrano, E; Ramírez, F. 2018. Evaluación de Si aplicado al suelo en el crecimiento, absorción y severidad de enfermedades en vivero de palma aceitera. Agronomía Costarricense 42(1):91-114.

Garbanzo-León, G; Alemán-Montes, B; Alvarado-Hernández, A; Henríquez-Henríquez, C. 2017. Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. Investigaciones Geográficas (93):20-41.

Garbanzo-León, G; Vargas-Gutiérrez, M. 2017. Actividad microbial en sustratos y análisis de crecimiento en almácigos de tomate en Guanacaste, Costa Rica. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 11(1):159-169.

Garbanzo-León, G; Vargas-Rojas, JC; Vega-Villalobos, EV. 2024. Crecimiento y absorción de nutrientes del cultivo de pitahaya (*Hylocereus costaricensis* y *H. monocanthus*) de Costa Rica. Agronomía Mesoamericana 35(1):57493.

Henríquez, C. 2015. Efecto del uso del suelo sobre las formas de fósforo de un andisol. *Agronomía Costarricense* 39(3):79-85.

Henríquez, C; Méndez, JC; Masís, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis kriging y su validación. *Agronomía costarricense* 37(2):71-82.

Henríquez, CH; Cabalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 112 p.

Marín-Araya, S; Villatoro-Sánchez, M. 2023. Efecto de tres implementos de labranza sobre propiedades físicas de un suelo Andisol en Tierra Blanca, Cartago. *Agronomía Costarricense* 47(2):95-110.

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, DA; Vindas, E; Alemán, B. 2022. Órdenes de suelos de Costa Rica [mapa digital]. Escala 1:200000. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>

Méndez, JC; Bertsch, F. 2011. Contenido total y disponibilidad de nutrientes en dos muestras de cenizas expulsadas en enero del 2010 por el volcán Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35(2):97-104.

Méndez, JC; Bertsch, F. 2012. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos en Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 108 p.

Mendez, JC; Hiemstra, T. 2020. Surface area of ferrihydrite consistently related to primary surface charge, ion pair formation, and specific ion adsorption. *Chemical Geology* 532:119304.

Molina, E. 2000a. Nutrición y fertilización de la naranja. *Informaciones agronómicas* 40:5-11.

Molina, E. 2000b. Manual de suelos y nutrición de pejibaye para palmito. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 47 p.

Molina, E; Alvarado, A; Boniche, J; Smyth, TJ. 2002a. Acumulación de biomasa y nutrientes en plantaciones de palmito en Guápiles, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(2):53-62.

Molina, E; Alvarado, A; Smyth, TJ; Boniche, J; Alpízar, D; Osmond, D. 2002b. Respuesta del pejibaye para palmito (*Bactris gasipaes*) al nitrógeno en Andisoles de Costa Rica. Agronomía Costarricense 26(2):31-42.

Montagnini, F; González, E; Sancho, F. 1996. Relación entre área basal arbórea y propiedades químicas del suelo en un bosque tropical secundario de 10 años de edad. Revista Yvyraretá 7(7):47-56.

Montagnini, F; Sancho, F. 1995. Nutrientes en plantaciones jóvenes con árboles nativos. Vetas 155:54-58.

Pereira, RP; Yamaguchi, S. 1964. Absorption and translocation of arsenate arsenic by coffee plants. Turrialba, 14:91–92.

Ramírez, F; Boniche, J; Bertsch, F; Mora, L. 2002. Consumo de nutrientes por los frutos y bandolas de café caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica. Agronomía Costarricense 26(1):33-42.

R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Salas, R; Pacheco, R. 1985. Estudio de la fertilidad de suelos dedicados a potreros en la zona Norte de Heredia, mediante la técnica del elemento faltante. Agronomía Costarricense 9(2):181-185.

Salas, R; Molina, E; Castro, A. 1995. Efecto de dosis y fuentes de fertilizantes nitrogenados de inmediata y lenta liberación en el cultivo de la fresa (*Fragaria x ananassa* cv. Chandler). Agronomía Costarricense 19(2):1-6.

Sánchez, JM; Coward, J; Jiménez, C; Sossa, R; López, C. 1985. Efecto de la fertilización nitrogenada en la época seca sobre producción y valor nutritivo del pasto kikuyo bajo pastoreo en el cantón de Coronado. Agronomía Costarricense 9(2):219-227.

Sancho, F; Cordero, A. 1984. Evaluación de la fertilidad de diez suelos del pacífico seco de Costa Rica mediante la técnica del elemento faltante o aditivo. Agronomía Costarricense 8(2):111-118.

Sauerbeck, DR; Gonzalez, MA; Carvajal, JF. 1979. Fósforo foliar absorbido del fertilizante por plantas de café (*Coffea arabica L.*). *Agronomía Costarricense* 3(1):29-33.

Subirós, JF; Molina, E. 1992. Efecto de la aplicación de vinazas en la producción de caña de azúcar y en las características químicas de un Inceptisol de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 16(1):55-60.

Valerio, JM; Molina, E. 2012. Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento del arroz en un Ultisol de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 36(1):89-96.

Vargas, M; Bertsch, F; Cordero, A. 1992. Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en Vertisoles de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 16(1):115-123.

Velázquez, J; Rosales, A; Rodríguez, H; Salas, R. 2015. Determinación de las etapas de inicio de macollamiento, inicio de primordio, floración y madurez en la planta de arroz, con el sistema S, V y R correlacionado con la sumatoria térmica. *Agronomía Costarricense* 39(2):121-130.

