


Evaluación de la calidad biológica del suelo en sistemas citrícolas mediante cromatografía de Pfeiffer

Evaluation of the biological quality of soil in citrus systems using Pfeiffer chromatography

 **Juan José Monzón Talavera**^{1*}
monzontalaverajuanjose96@gmail.com

 **Didier Gabriel Matey Fajardo**¹
didier.matey@unflep.edu.ni

Fecha de Recepción: 21-11-2025

Fecha de Aprobación: 18-03-2026

RESUMEN

Este estudio utilizó la técnica de cromatografía de Pfeiffer para medir de calidad biológica del suelo cultivado con limón Tahití (*Citrus latifolia*) en Estelí, Nicaragua, aplicando un manejo agroecológico y convencional. Mediante un diseño de evaluación pre y post tratamiento, se realizaron cromas por lote y se describieron patrones morfológicos como: gradiente radial, homogeneidad del halo, ramificaciones, precipitados oscuros y transición cromática centro–borde. Como base, se incorporaron análisis fisicoquímicos (materia orgánica, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y bases) y, como soporte, mediciones eco fisiológicas en planta (SPAD, pH y °Brix en savia, concentración de nutrientes, humedad foliar) así como variables productivas (peso, diámetro y longitud de fruto). Los cromas mostraron mayor estabilidad biológica en el manejo agroecológico (anillos concéntricos definidos, transición continua y menor zona de precipitados), correlacionado con menor densidad aparente, mayor infiltración, pH adecuado y mejor eficiencia de uso de nutrientes. El manejo convencional presentó mejores niveles de materia orgánica, frutos de mayor diámetro y peso, con indicios de salinización y eficiencia fisiológica inferior. Los °Brix en savia variaron por lote (agroecológico superior en uno; convencional en otro). La cromatografía permitió diferenciar claramente los tipos de manejo y evidenciar variaciones en el proceso sobre la calidad biológica del suelo. Los resultados, al ser correlacionados con el resto de los análisis, coincidieron con las tendencias observadas en las propiedades físicas y fisiológicas, lo que indica que es una herramienta cualitativa práctica, visual y económica que complementa los análisis químicos en la agricultura.

Palabras claves: Biología agrícola, fertilidad del suelo, materia orgánica, ecología, fisiología vegetal, nutrición de las plantas

¹Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda. Estelí, Nicaragua

*Autor de correspondencia

ABSTRACT

This study implemented Pfeiffer chromatography for the analysis of the biological soil quality of areas cultivated with Tahiti lime (*Citrus latifolia*) in Estelí, Nicaragua by applying agroecological and conventional management. Using a pre- and post-treatment evaluation design, chromas were performed per plot, and morphological patterns were described such as (radial gradient, halo homogeneity, branching, dark precipitates, and center–edge chromatic transition). As a basis, physicochemical analyses were incorporated (organic matter, available phosphorus, cation exchange capacity, and bases) and, as support, eco-physiological measurements in plants (SPAD, pH and °Brix in sap, nutrient concentration, foliar moisture) and productive variables (fruit weight, diameter, and length). The chromas showed greater biological stability in agroecological management (well-defined concentric rings, continuous transition, and smaller precipitate zones), correlated with lower bulk density, higher infiltration, adequate pH and better nutrient use efficiency. Conventional management showed higher levels of organic matter, fruits with greater diameter and weight, with signs of salinization and lower physiological efficiency. The °Brix in sap varied by batch (agroecological higher in one; conventional in another). Chromatography allowed for clear differentiation of the management types and evidenced variations in the process on the biological quality of the soil. The results, when correlated with the rest of the analyses, matched the trends observed in physical and physiological properties, indicating that it is a practical, visual, and economical qualitative tool that complements chemical analyses in agriculture.

Keywords: Agricultural biology, soil fertility, organic matter, ecology, plant physiology, plant nutrition

Para citar en APA: Monzón Talavera, J. J., & Matey Fajardo, D. G. (2026). Evaluación de la calidad biológica del suelo en sistemas cítricos mediante cromatografía de Pfeiffer. *Wani*, (84), e22363. <https://doi.org/10.5377/wani.v1i84.22363>

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial de los ecosistemas terrestres, albergando aproximadamente una cuarta parte de la biodiversidad del planeta y desempeñando funciones clave en la regulación climática, el reciclaje de nutrientes y la producción de alimentos (Universidad de Buenos Aires [UBA], 2023). No solamente sustenta la producción agrícola, sino que juega un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ecológico.

La actividad biológica edáfica contribuye significativamente a la captura de carbono y a la regulación de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte al suelo en un componente estratégico para la mitigación del cambio climático (Lal, 2020). Sin embargo, la degradación y erosión del suelo avanzan a nivel mundial a un ritmo alarmante, comprometiendo la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola (FAO & ITPS, 2021). En este sentido, evaluar la calidad del suelo es fundamental para poder comprender procesos que determinan su buen funcionamiento y la capacidad productiva.



Frente a este panorama, resulta necesario contar con herramientas que permitan evaluar de manera integral la calidad del suelo, incorporando no solo indicadores químicos, sino también parámetros físicos y biológicos. Los métodos convencionales de análisis, si bien aportan información cuantitativa, presentan limitaciones para reflejar la dinámica ecológica y la interacción entre componentes del suelo (Altieri & Nicholls, 2018).

Desde la perspectiva agroecología, se han promovido alternativas accesibles y de bajo costo que faciliten la evaluación integral del suelo, apoyen la toma de decisiones y fortalezcan la resiliencia de los sistemas agrícolas (Nicholls & Altieri, 2019). Entre estas alternativas, destaca la cromatografía de Pfeiffer, una técnica cualitativa que permite visualizar la estructura biológica, nutricional y física del suelo mediante patrones de colores, zonas y formas asociados a su composición y actividad biológica. Esta metodología ha sido utilizada como herramienta complementaria a los análisis químicos tradicionales permitiendo diferenciar manejos agrícolas y detectar cambios en la calidad del suelo en diversos sistemas productivos (Cercado Quiñonez, 2021).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la utilidad de la cromatografía de Pfeiffer como instrumento de medición de la calidad biológica del suelo en sistemas de producción de limón Tahití (*Citrus latifolia*) bajo manejo agroecológico y convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

Esta investigación se realizó en la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda, ubicada en el kilómetro 166 ½ de la carretera panamericana norte, comunidad Santa Adelaida, Estelí-Nicaragua, específicamente en dos áreas del módulo educativo agrícola donde se encuentran establecidos lotes de limón Tahití; estas áreas son: a.) lote Este: cítrico agrícola (13.2444415-86.3713675), b.) lote Oeste: cítricos ubicados atrás de acuaponía (13.247349, -86.375162) (Google, 2025). El clima de la zona de Estelí está clasificado como tropical seco. La temperatura generalmente varía de 17 °C a 32 °C (Weather Atlas, 2025).

Enfoque de la investigación

La investigación fue aplicada con enfoque mixto y diseño cuasiexperimental. El componente cuantitativo se basó en la medición y análisis de variables físicas, químicas y biológicas del suelo, así como indicadores fisiológicos en plantas de *citrus latifolia*. El componente cualitativo se fundamentó en la observación e interpretación de los patrones cromatográficos obtenidos mediante la cromatografía, permitiendo evaluar diferencias visuales y estructurales relacionadas a la dinámica biológica del suelo.

El estudio se desarrolló bajo un paradigma positivista o empírico-analítico, orientado a la medición, análisis e interpretación de variables edáficas y fisiológicas en condiciones reales a nivel de campo, comparando los sistemas de manejos y evaluando cambios en las condiciones del suelo antes y después de la implementación de los manejos en las áreas de estudio.

Procedimiento de muestreo y evaluación cromatográfica

Durante el desarrollo de esta investigación, se realizaron procesos para evaluar, describir y analizar las condiciones físicas, químicas y biológicas presentes en el suelo en cada una de las dos áreas donde se encontraban establecidos cultivos de *Citrus latifolia*. Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizaron mediciones e interpretaciones tanto antes como después de la implementación los manejo agroecológico y convencional (ver tabla 1) con un intervalo aproximado de cinco meses entre ambas evaluaciones. Este enfoque mixto permitió identificar diferencias evidentes en parámetros como el vigor de las plantas entre otras variables que se observaron mediante la separación de componentes del suelo con la cromatografía de Pfeiffer y otras pruebas de laboratorio. Cabe resaltar que los resultados de los análisis representadas en las gráficas coincidieron con las diferencias observadas previamente al visitar las parcelas.

Las unidades experimentales analizadas en esta investigación fueron árboles de cítricos considerados adultos, cultivados aproximadamente nueve años antes del inicio del estudio. Los árboles se localizaron en dos áreas del módulo educativo de frutales de la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP) identificadas como área agrícola y área mac.

Cada una de las áreas se dividieron en dos lotes para aplicar ambos tipos de manejo en los dos ambientes, tanto convencional como agroecológico. En cada lote se seleccionaron cuatro árboles para un total de ocho por área para un universo de 16 árboles que fueron seleccionados para el levantamiento de datos.

Previo al inicio de la aplicación de los tratamientos, se pospusieron labores durante un mes con el fin de prevenir o mitigar la variabilidad en los resultados asociada a residuos de fertilizaciones previas. Es importante señalar que meses antes se realizó una poda severa de formación y sanitaria, lo que pudo incidir en los resultados de la estimulación, debido al tiempo que el árbol requiere para restablecer sus procesos fisiológicos, los cuales dependen de la cantidad de hojas y ramas para procesos como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes. De acuerdo con estudios previos, la poda de una planta estimulará el crecimiento vigoroso de los brotes y retrasará el desarrollo de flores y frutos. La duración del retraso, por supuesto, dependerá de la especie podada y de la severidad de la poda (Horton, 2022).

Para la selección de cada unidad experimental se consideraron los siguientes criterios de exclusión: espacios que no cumplieron con el número de árboles, áreas recién establecidas, árboles con síntomas de virus de la tristeza de los cítricos y lotes recién fertilizados. Los análisis y mediciones se realizaron antes, durante y después de la aplicación de los manejos, abarcando etapas fenológicas que iniciaron desde la estimulación floral hasta la cosecha.



Número de tratamientos

En las áreas estudiadas se aplicaron dos tipos de tratamientos para evaluar efectos del manejo convencional - agroecológico sobre las características del suelo y la respuesta fisiológica del cultivo de *Citrus latifolia*.

Tabla 1

Tipos de manejo evaluados en los sistemas citrícolas agroecológico y convencional

Tipo de Manejo	Descripción	Abreviatura
Manejo Convencional	Parcelas de cítricos manejadas según las prácticas habituales del productor, con fertilización química de síntesis, uso de herbicidas y plaguicidas comerciales, sin incorporación de abonos orgánicos.	TMC
Manejo Agroecológico	Parcelas de cítricos establecidas bajo prácticas de conservación y restauración de suelos, con aplicación de biofertilizantes líquidos y sólidos (lombricompost), manejo integrado de arvenses mediante control mecánico.	TMA

Manejo del experimento

La aplicación de los tratamientos se llevó a cabo durante la época de verano que comprendió del mes de diciembre al mes de abril del año 2025. En cada una de estas áreas experimentales se seleccionaron lotes pareados con árboles adultos. Previo al estudio, las áreas se sometieron a descanso para evitar la incidencia de los residuos de fertilizaciones anteriores en los resultados. Además, se realizó control mecánico de malezas en ambas áreas con equipo desmalezadora en lotes con manejo agroecológico y, por otra parte, con herbicida sintética en lotes convencionales. En las parcelas con manejo agroecológico, este control se mantuvo de forma manual y periódica, mientras que en las parcelas convencionales se emplearon herbicidas sintéticos.

El manejo nutricional tanto vía edáfica como foliar en el tratamiento agroecológico comprendió la incorporación de lombricomposta y bioinsumos líquidos elaborados en una biofábrica artesanal correspondiente al módulo educativo bioinsumos de la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda. Estas fueron complementadas con microorganismos eficientes para mejorar la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del suelo. En cambio, en el manejo convencional, se aplicaron fertilizantes sintéticos granulados y foliares en dosis comunes utilizados por productores citrícolas.

En este proceso se emplearon técnicas observacionales y registro sistemático tanto en campo como a nivel de laboratorio. Asimismo, se recolectaron datos en dos momentos: previo a la aplicación de los manejos en las áreas y al final de la etapa fenológica del cultivo, comprendido dentro de un periodo de 5 meses.

Las diferentes variables fueron registradas mediante instrumentos especializados con los que cuenta la universidad. Como instrumento de apoyo en la recolección de datos se diseñaron hojas de campo, lo cual permitió recolectar de forma ordenada cada uno de los datos por parcela evaluada. Esto garantizó la confiabilidad, trazabilidad y sistematicidad de los datos recolectados.

Reactivos, materiales y equipos

- Hidróxido de sodio (NaOH) 1 % en agua destilada
- Nitrato de plata (AgNO_3) 0.5 % en agua destilada, conservado en frasco color ámbar protegido de la luz
- Papel filtro Whatman número 4, discos de 15 cm de diámetro; pabilos de filtro (2×2 cm) elaborados con el papel filtro
- Aros de PET (2 cm de grosor) y taparrosca como depósito
- Jeringa de 5 mL con aguja, probetas, balanza (gr, mortero, coladeras (gruesa y extrafina)
- Caja de cartón forrada con papel aluminio (secado en sombra)

Preparación de extracto de suelo

- Tamizado y pulverización: El suelo seco se tamizó (coladera gruesa) y se molió en mortero; luego se pasó por coladera extrafina.
- Suspensión y agitación: Se pesaron 5 g de suelo de cada muestra y se añadieron 50 mL de Hidróxido de sodio NaOH 1 %. Se agitó en ciclos (seis giros a la derecha y seis a la izquierda, tres repeticiones), con reposos de 15 min y 45 min entre ciclos.
- Homogenización: Se dejó en reposo 6 h y se empleó solo el sobrenadante para el desarrollo cromatográfico.

Preparación del papel impregnado con nitrato de plata AgNO_3

En ambiente con baja iluminación, se impregnó el disco de papel filtro con AgNO_3 0.5 % por capilaridad a través del pabilo hasta alcanzar la marca de 4 cm de radio. Se retiró el pabilo y se dejó secar en sombra dentro de la caja de cartón 4–5 h.

Desarrollo de los cromatogramas (Pfeiffer)

Figura 1

Procedimiento de impregnación y registro de cromatogramas (Pfeiffer) en laboratorio.

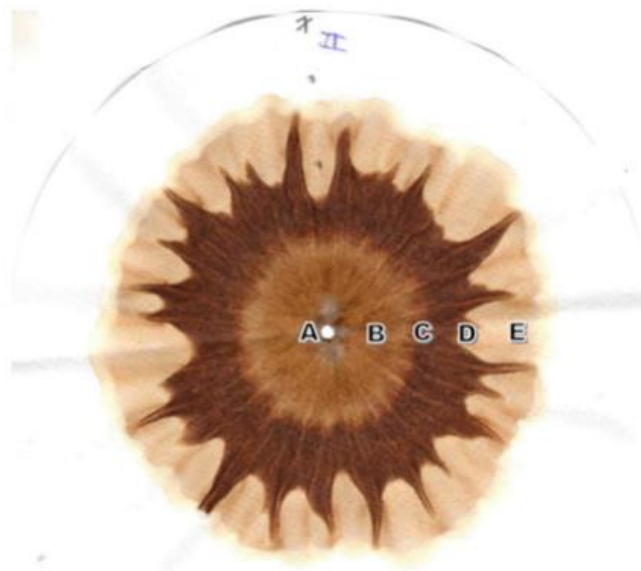


1. Impregnado con extracto de suelo: Se recolocó el pabilo en el centro del disco ya impregnado con nitrato de plata AgNO_3 y se depositaron 5 mL del sobrenadante de suelo en el taparrosca. Se permitió la subida por capilaridad y se retiró el papel antes de la marca de 6 cm.
2. Secado del cromatograma: Los discos se dejaron secar a la sombra (sin luz directa) hasta 10 días para permitir la expresión completa de zonas.
3. Registro: Los cromas se fotografiaron en alta resolución y se codificaron por área, manejo y momento (antes/después).
4. Control de calidad y seguridad: Se aplicaron condiciones constantes de luz indirecta y temperatura ambiente en impregnación y secado evitando vibración durante la capilaridad.
5. Aplicación de Nitrato de plata AgNO_3 e Hidróxido de sodio NaOH : Se manipularon con protección básica (guantes, gafas) y resguardo de luz.

El procedimiento descrito se realizó siguiendo las orientaciones del método de cromatografía circular para evaluación de la calidad del suelo (Pfeiffer, 1984).

Figura 2

Cromatograma de suelo con identificación de zonas (A-E)



Lectura e indicadores cualitativos

Los cromas se interpretaron cualitativamente considerando las diferentes zonas estructurales. De acuerdo con Pfeiffer (1984) y Restrepo Rivera y Pinheiro (2011), cada zona del cromatograma refleja características específicas relacionadas con la calidad del suelo:

1. A-Zona central: Representa la fracción mineral básica; indica la cohesión y estructura inicial del suelo.

2. B-Zona interior o mineral: Muestra el equilibrio de nutrientes y sales; refleja la disponibilidad y balance mineral.
3. C-Zona intermedia: Evidencia la actividad biológica y transformación de la materia orgánica.
4. D-Zona externa: Se asocia con la estructura, porosidad y aireación del suelo.
5. E-Zona periférica: Refleja la estabilidad global y madurez biológica del sistema edáfico.

Lectura e indicadores cuantitativos

Para complementar la interpretación cualitativa de los cromatogramas, se elaboró una matriz de ponderación que permitió asignar valores numéricos a los patrones observados en cada zona del cromograma.

Tabla 2

Matriz de ponderación para la lectura cuantitativa de cromatogramas de Pfeiffer por zonas (0–10).

PONDERACIÓN	0–2	3–4	5–6	7–8	9–10
Zona central (aireación)	Centro negro, gris o ceniza; compactación, sin oxígeno ni actividad microbiana.	Centro oscuro o blanco irregular; exceso de estiércoles crudos.	Centro pardo, leve diferenciación; inicio de aireación.	Centro crema con bordes suaves; oxigenación moderada y presencia de MO.	Centro crema uniforme que se desvanece; óptima aireación y alta actividad biológica.
Zona interior (mineral)	Homogénea y negruzca; suelo erosionado, sin estructura.	Presente pero oscura; mineralización excesiva.	Anillo visible pero poco diferenciado; proceso intermedio.	Café claro con radiación suave; integración mineral-biológica.	Dorada, integrada y armónica; buena mineralización y estructura.
Zona intermedia (materia orgánica)	Ausente; suelo destruido por mecanización o químicos.	Débil o bloqueada; materia orgánica cruda.	Ondas tenues; materia orgánica en transformación.	Ondas y nubes definidas; actividad microbiana alta.	Nubecillas rítmicas, balanceadas; abundancia y diversidad nutricional.
Zona exterior (enzimática)	Ausente; sin actividad biológica.	Escasa, tenue o discontinua; enzimas bajas.	Presente pero poco definida; transición incompleta.	Ondulaciones y lunares suaves; buena relación MO-minerales.	Borde en explosión, lunares finos y vivos; alta actividad enzimática.

Radiación / forma radial	Sin radiación; suelo destruido o compactado.	Líneas rectas y cortas; baja estructura.	Caminos visibles, pero poco ramificados.	Penachos de plumas con diversidad media.	Radiación desarrollada, múltiple y armónica; estructura biológica ideal.
---------------------------------	--	--	--	--	--

Nota. Elaboración a partir de criterios de interpretación cromatográfica de suelos descritos por Pfeiffer (1984) y Restrepo Rivera & Pinheiro (2011).

Tratamiento de datos y correlaciones

Los resultados en cada cromograma (antes–después; manejo agroecológico vs. convencional) se sistematizaron en matrices cualitativas y cuantitativas y se correlacionaron posteriormente con variables independientes.

Se tomaron medidas a nivel foliar en las mismas parcelas (como niveles de clorofila, monitoreo de diferentes nutrientes con lectores de Horiba, grados °Brix y temperatura, en savia en la parte productiva grosor de cáscara, largo, diámetro y peso del fruto).

Se realizaron medidas a nivel edáfico para las evaluaciones del estudio en suelo utilizando pH, conductividad eléctrica, infiltración, densidad aparente, análisis con triángulos de textura y análisis con tablas de colorimetría según Munsell.

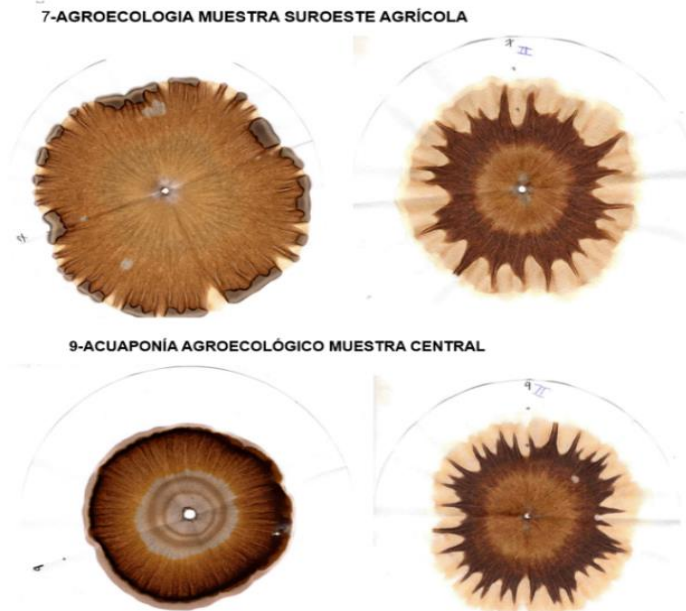
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cromogramas agroecológicos presentan como resultado de las aplicaciones una estructura integrada, con tonos dorado color miel y un centro claro y oxigenado que evidencia humificación y actividad biológica. Las ondas intermedias son continuas y los bordes muestran radiación abierta, signos de buena agregación y circulación del agua. Se percibe transición fluida entre todas las zonas, lo que denota un mejor equilibrio físico biológico entre materia orgánica y fracción mineral (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

El color ámbar y la simetría radial indican mejoras en la vitalidad microbiana y materia orgánica humificada, mientras que la aplicación de lombrihumus, estiércol y biofertilizantes reactivó la respiración y aireación del suelo. Esto promueve una red microbiana a nivel de suelo funcional y una estructura estable capaz de retener humedad y liberar nutrientes; condiciones que en cítricos se reflejan en mejoras a nivel foliar y calidad del fruto (Pilon et al., 2018; Reganold & Wachter, 2016).

Figura 3

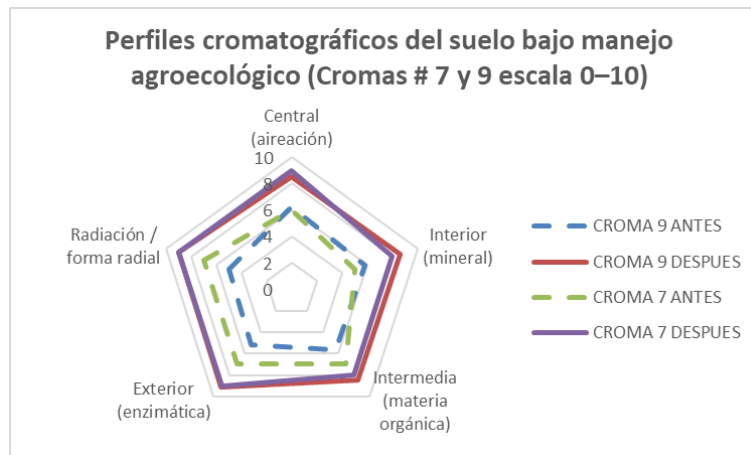
Cromatogramas del área agroecológica: (antes vs. después) Agrícola – muestra Suroeste (croma 7) y Acuaponía – muestra Central (croma 9).



Aunque los cromas muestren progreso hacia la regeneración, el suelo aún está en transición agroecológica, es necesario mejorar con densidad coloidal mayor y una radiación más homogénea. La continuidad de la aplicación de estas prácticas agroecológicas (compost maduro, bioinsumos y microorganismos) permitirá alcanzar madurez ecológica plena, con suelo autorregulado y resiliente frente al estrés climático (FAO, 2017).

Figura 4

Radar cromatográfico (escala 0–10) de los suelos bajo manejo agroecológico en dos sitios (Cromas 7 y 9), comparando antes y después del ciclo de aplicaciones con bioinsumos.



Después de realizar las diferentes aplicaciones en el manejo agroecológico (figura 4), ambos cromas se ven más simétricos, con mejor radiación y un tono dorado y crema más parejo. En el radar eso se traduce en puntajes más altos en aireación central, anillo mineral más integrado, ondas intermedias continuas y borde enzimático más ancho. Además, el color cálido se expandió en el terreno, señales clásicas de un suelo que respira y está activo (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera, 2021).

1. Centro crema definido mejor oxigenación y respiración microbiana (Pfeiffer, 1984).
2. Anillo mineral dorado y continuo equilibrio mineral-biológico y mayor estabilidad coloidal; los minerales conversan con la biota (Restrepo Rivera, 2021).
3. Ondas intermedias más claras materia orgánica en proceso de humificación e integración al complejo arcilla húmica (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera, 2021).
4. Borde enzimático amplio y radial alta actividad enzimática y microbiana, reflejo de alimentación orgánica y buen manejo de coberturas (Pilon et al., 2018).

El patrón que se observa en los cromas es consistente con reactivación microbiana y maduración del humus, que en el radar sube las calificaciones de 0-10 especialmente en aireación, mineral y enzimática (Pfeiffer, 1984; Pilon et al., 2018). El suelo va en transición positiva; se muestran rasgos de 7-9 y 10, pero todavía se notan ligeras diferencias en radiación y en el anillo mineral. Para que el croma sea aún más simétrico, conviene seguir realizando buenas prácticas agrícolas:

1. Mantener cobertura viva/muerta y mínima labranza para no romper agregados.
2. Sostener compost maduro, lixiviados/bioles y extractos vegetales para alimentar la biota.
3. Vigilar pH y CE y evitar exceder fertilizaciones sintéticas con altas concentraciones de sales o insumos que bloqueen la Materia Orgánica.

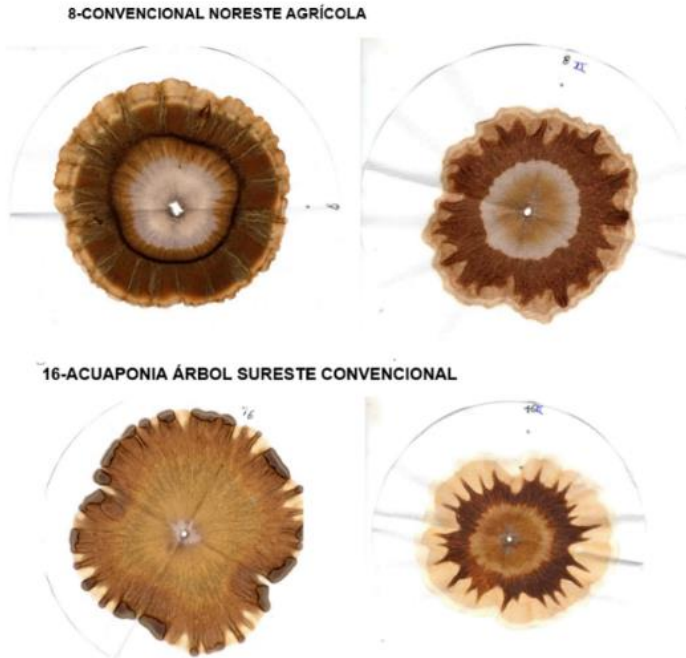
Con este manejo, lo normal es que el patrón siga avanzando hacia un suelo autorregulado, estable y con mejor retención de agua, justo lo que exigen los cítricos aquí en Nicaragua (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011; Pilon et al., 2018).

Por otra parte, en la figura 6 se puede observar que luego de las aplicaciones convencionales, los resultados demuestran que en los cromas predomina un centro pardo gris compacto con halos concéntricos, anillo mineral oscuro y rígido, zona intermedia densa sin nubecillas rítmicas y borde enzimático grueso/irregular; tras las aplicaciones aparece una “estrella” más oscura y espiculada, con radios cortos y poco armónicos, sin finura periférica (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera, 2021).

Asimismo, el conjunto morfológico refleja oxigenación limitada, humus poco funcional y mineralización tensa asociada al uso de biocidas y sales (p. ej., cúpricos, herbicidas), que disminuyen la diversidad microbiana y “endurecen” el anillo mineral. La mayor actividad posterior es reactiva, no diversa, por lo cual no aparecen dorados claros ni bordes finos (Pfeiffer, 1984; Soiltech Solutions, 2018; Restrepo Rivera, 2021).

Figura 5

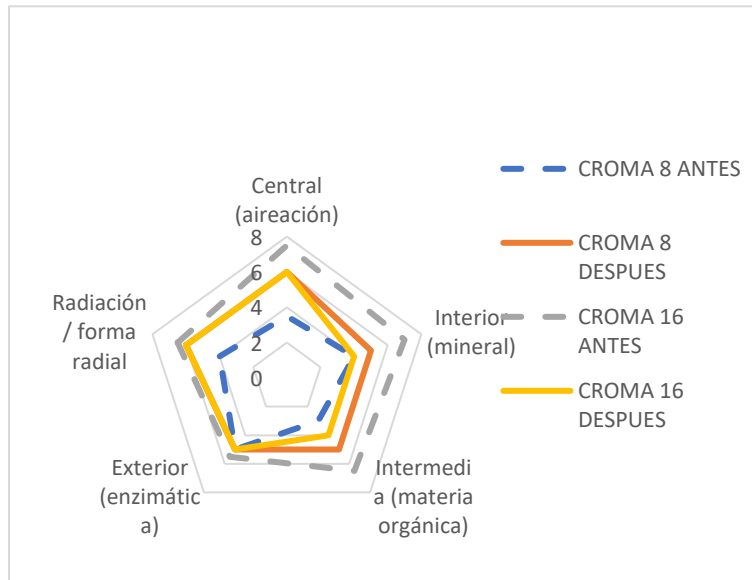
Cromatogramas del área convencional (antes vs. después): Agrícola – Noreste (croma 8) y Acuaponía – Sureste (croma 16).



El estudio también refleja una situación forzada; la productividad se sostiene por insumos en un sistema con baja autorregulación. Para revertirla, es necesario reducir la aplicación de herbicidas sintéticos y productos a base de cobre, corregir CE/pH y sodio; aportar compost, ácidos húmicos y fúlvicos; sumar cobertura viva, inoculantes (*Trichoderma*, *Bacillus*), labranza mínima y equilibrar la relación Ca–Mg–K. El resultado esperado con el cambio a prácticas más amigables con el medio reflejaría cromas con centro crema difuso, anillo dorado integrado, nubecillas rítmicas y borde fino continuo (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera, 2021; Soiltech Solutions, 2018).

Figura 6

Perfiles cromatográficos del suelo bajo manejo convencional (cromas 8 y 16; antes vs. después; escala 0–10).



La figura 5 muestra un ligero ascenso en aireación y radiación, aunque el borde permanece grueso y el patrón carece de equilibrio. En el Croma 16, el anillo mineral se tensa y la zona orgánica disminuye; la figura se vuelve menos uniforme, con menor continuidad radial y centro menos cremoso, rasgos típicos de compactación y pérdida de actividad biológica (Lal, 2020).

Esto indica un efecto reactivo temporal, producto del uso de fertilizantes solubles que estimulan la oxidación sin consolidar la humificación. Además, se evidencia retroceso biológico: menor mineralización equilibrada y posible disminución de enzimas del suelo como fosfatasa y β -glucosidasa, indicadoras de estrés químico (Karaca et al., 2010; Trasar-Cepeda et al., 2008). En general, las variables expresan una pérdida de resiliencia microbiana y una reducción del carbono activo, condiciones frecuentes en suelos manejados intensivamente (FAO, 2017).

Finalmente, los resultados del radar confirman que el sistema convencional mantiene productividad, pero a costa de la pérdida de las características biológica del suelo. Su regeneración exige labranza mínima, coberturas permanentes y bioinsumos equilibrados para recuperar simetría cromática y estabilidad coloidal. El objetivo es lograr un patrón con centro crema difuminado, anillo dorado integrado y borde fino radiante, indicador de un suelo funcional y resiliente (ITPS-FAO, 2022; Bünemann et al., 2018).

Caracterización de los suelos de los módulos educativos

Tabla 3

Evaluación visual del suelo por tratamiento y área de estudio (textura, porosidad, color y calificación del indicador).

Tratamiento	Área de estudio	Textura del suelo	Interpretación de calidad del suelo	Porosidad	Color	Calificación del indicador
T1(Manejo convencional)	Área Agrícola	Franco Arcilloso	Suelo Moderado	Buena	Negro	17
	Área Mac	Arcilloso	Suelo Moderado	Buena	Marrón Muy Oscuro	21
T2(Manejo Agroecológico)	Área Agrícola	Franco Arcilloso	Suelo Moderado	Buena	Marrón Pálido	26
	Área Mac	Arcilloso	Suelo Moderado	Buena	Gris Oscuro	23

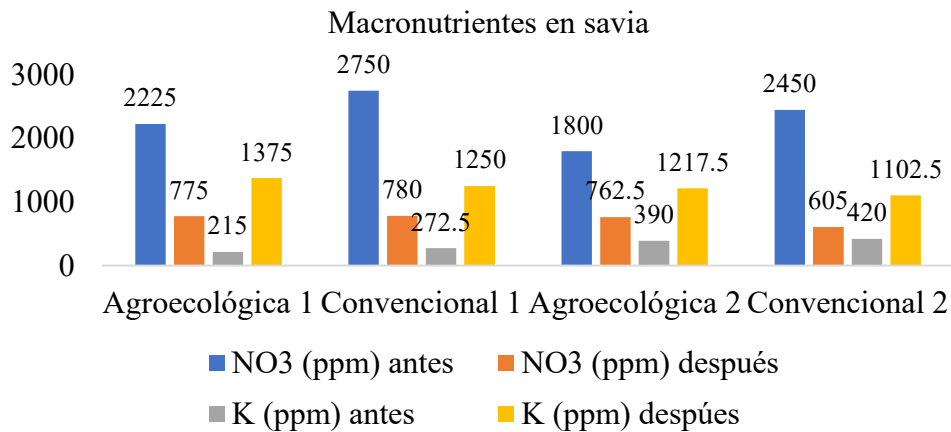
En la tabla 3, el resultado evidencia que los suelos bajo manejo convencional y agroecológico presentaron texturas entre franco arcillosa y arcillosa. La calidad del suelo se interpretó como moderada en la mayoría de los casos y buena únicamente en el área agrícola con manejo agroecológico, la porosidad fue clasificada como buena en todas las parcelas, mientras que el color varió entre negro, marrón muy oscuro, marrón pálido y gris oscuro. En cuanto a la calificación numérica, los valores oscilaron entre 17 y 26 puntos, siendo los más altos para el manejo agroecológico lo que indica una mejora en las condiciones edáficas relativas vinculadas a un manejo sostenible del suelo (FAO, 2017; Lal, 2020; Bünemann et al., 2018).

Parámetros fisiológicos de la planta

Figura 7

Concentración de macronutrientes (NO_3^- y K^+) en savia antes y después del manejo agroecológico y convencional.

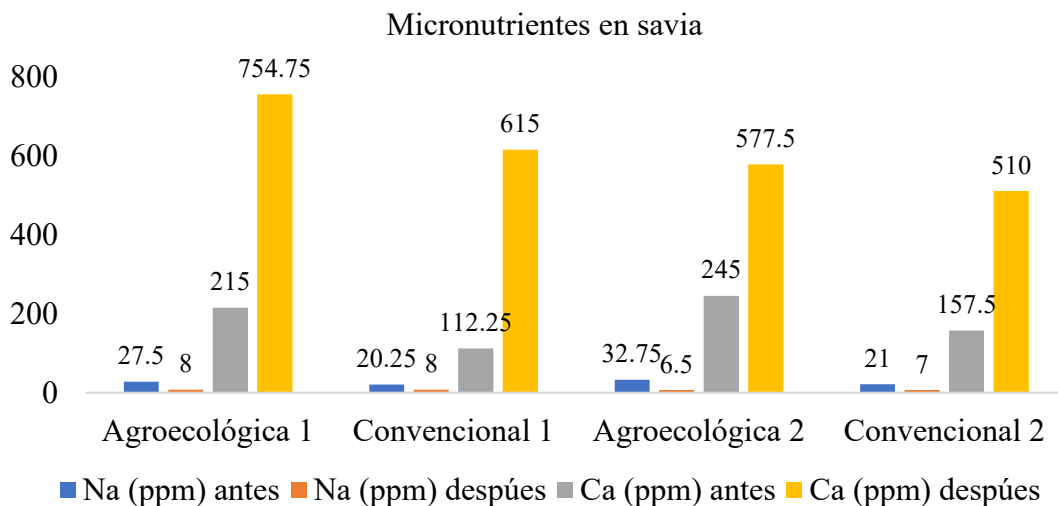
En el análisis nutricional a nivel de savia (figura 7) realizado antes de iniciar el manejo en el área destinada al área convencional, se presentaron mayores niveles de NO_3^- (hasta 2750 ppm) en comparación con al área agroecológica (1800–2225 ppm).



Luego del manejo, los niveles de nitrato disminuyeron en todos los casos, con reducciones más marcadas en los convencionales, lo que sugiere pérdidas o desbalances de nitrógeno (N). En cambio, los sistemas agroecológicos mantuvieron valores estables y un uso más eficiente del nitrógeno observado visualmente, coherente con su asimilación hacia tejidos de crecimiento y fructificación (Marschner, 2012).

El potasio (K⁺), aunque inicialmente bajo, aumentó de forma significativa tras las aplicaciones, especialmente en los tratamientos convencionales, aunque los agroecológicos lograron niveles comparables. Este comportamiento concuerda con el papel del potasio como regulador osmótico y promotor del llenado de frutos (Taiz et al., 2015). En conjunto, los resultados demuestran que los biofertilizantes y extractos microbianos empleados en el manejo agroecológico mantienen la nutrición vegetal y contribuyen a un equilibrio nutrimental sostenible en cítricos.

Figura 8
 Concentración de micronutrientes (Na⁺ y Ca²⁺) en savia antes y después del manejo agroecológico y convencional.

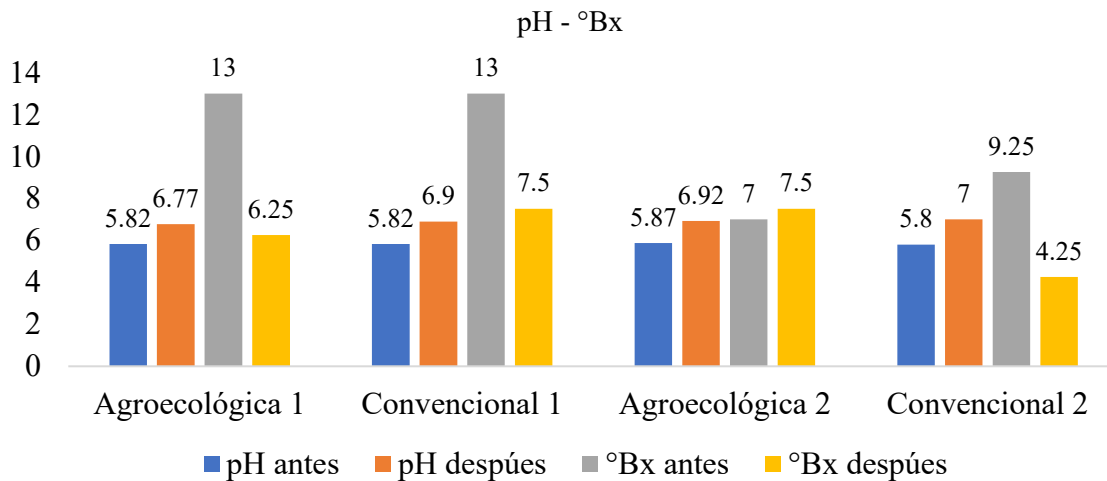


En la figura 8 se observa que, en ambos tratamientos, el sodio (Na^+) bajó considerablemente respecto al análisis previo a las aplicaciones, registrándose niveles entre 6 y 8 ppm; en cambio, el calcio (Ca^{2+}) aumentó considerablemente, en los agroecológicos, donde se llegó a los niveles más elevados. La disminución del sodio y el incremento del calcio nos indica que las plantas se estaban alimentando de forma más uniforme y eficiente, evitando la tensión nutricional que generan las sales. El calcio contribuye a fortalecer las paredes celulares de los órganos de la planta, resultando en frutos de tamaños más apropiado, cáscara más uniforme y textura más firme en general (Hocking et al., 2016; White & Broadley, 2003).

El área con manejo agroecológico, por su parte, demostró un mejor equilibrio nutricional, ya que no solamente se evitó la salinidad, sino que también se mejoró la absorción de calcio por medio del uso de microorganismos y bioinsumos. Esto se presenta en suelos más vivos y una planta más saludable, al igual que frutos con mayor vida de anaquel y firmeza, lo cual refuerza que el enfoque agroecológico genera resultados sostenibles y de alta calidad (Altieri & Nicholls, 2018; Bünemann et al., 2018).

Figura 9

Valores de pH y grados °Brix en savia antes y después del manejo agroecológico y convencional.



Los niveles de pH a nivel de savia en todas las áreas subieron luego de los tratamientos, reflejando una mejor condición metabólica y menor acidez. En contraste, los valores de °Brix disminuyeron en todos los casos, pero la disminución fue más fuerte en los convencionales, especialmente en el segundo lote, donde descendieron de 9.25 a 4.25. (Ver figura 10.)

Por otro lado, los valores de °Brix reflejan el contenido de azúcares solubles y la energía disponible en la savia, indicadores asociados al vigor fisiológico de las plantas. En este estudio, los árboles bajo manejo agroecológico mantuvieron valores más estables en comparación con los sistemas convencionales, lo que sugiere un mejor equilibrio fotosintético y nutricional. La disminución

observada en el manejo convencional podría estar vinculada a condiciones de estrés fisiológico o desequilibrios nutricionales que afectan el metabolismo vegetal (Cai et al., 2024).

Diversos autores señalan que plantas con mayor contenido de azúcares presentan mayor capacidad de defensa frente a ataques de plagas y enfermedades (Tripathi et al., 2022). En este sentido, los resultados sugieren que los manejos agroecológicos contribuyen a mantener una mayor estabilidad fisiológica del cultivo.

Finalmente, el estudio confirma que el uso del refractómetro para medir °Brix es un método práctico y confiable para el monitoreo del estado nutricional y metabólico de las plantas.

CONCLUSIONES

El manejo con prácticas agroecológicas ayuda a que el suelo se regenere paulatinamente. Los suelos manejados con bioinsumos presentaron menor compactación, mejor infiltración del agua y buena aireación, condiciones que permiten vida activa de microorganismos y raíces más saludables. Esos resultados se reflejaron también en las plantas a nivel de savia ya que mantuvieron niveles estables de parámetros como pH, nitratos, potasio y calcio, señales de nutrición equilibrada. Cabe destacar que la cromatografía de Pfeiffer fue clave para entender esta dinámica.

Los cromas agroecológicos mostraron centros con estructura bien definidas colores vivos y transiciones armónicas hacia las zonas posteriores, indicando suelos con energía y mejoras en la biota. No obstante, los cromas convencionales presentaron lo contrario. se observaron cromas apagados con tonalidades oscuras sin armonización en la transición hacia las zonas, indicando un suelo en proceso de salinización, asociado al uso intensivo de fertilizantes sintéticos aplicados y a la baja actividad microbiana, siendo estos signos de cansancio y menor actividad enzimática.

Al comparar los resultados de suelo, savia y frutos, se vio clara la relación: un suelo suelto y vivo produce plantas más equilibradas y frutos de mejor calidad. Los tratamientos agroecológicos no solo evitaban el exceso de sales, sino que además favorecieron la absorción de calcio y potasio, resultando en frutos más firmes y consistentes. En cambio, los convencionales lograron más peso, pero con menor equilibrio interno y mayor desgaste del suelo.

Por lo anterior expuesto, el estudio confirma que la cromatografía de Pfeiffer no solo es una técnica atractiva por las formas y coloración en cada uno de ellos, sino una herramienta muy útil, que puede ser usada para monitorear los procesos de transición a medida del tiempo, dependiendo del tipo de práctica en nuestras unidades productivas, posibilitando observar el comportamiento del suelo. Este tipo de análisis, al correlacionarse con los resultados de laboratorio y la calidad de los frutos obtenidos, ayudó a comprender el estado real del agroecosistema, demostrando que con las prácticas agroecológicas no solo mejora la producción, sino que ayuda a la regeneración de la vida del suelo.

Finalmente, entre las limitaciones del estudio se puede mencionar el tamaño muestral y el carácter cualitativo de la cromatografía de Pfeiffer, sugiriendo la necesidad de estudios complementarios que integren análisis microbiológicos y evaluaciones multivariadas para profundizar en la comprensión de la dinámica biológica del suelo. Futuras investigaciones podrían incorporar análisis microbiológicos moleculares y evaluaciones longitudinales que permitan profundizar en la dinámica biológica del suelo bajo distintos sistemas de manejo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2018). *Agroecología: Ciencia y política*. SOCLA, Icaria. <https://www.socla.coop/publicaciones/libros/agroecologia-ciencia-y-politica/>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology & Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cai, Q., Liu, J., Li, X., Sun, J., & Yang, R. (2024). *Effects of nutritional stress on soil fertility and antioxidant enzyme activities in rice*. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1471682. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1471682>
- Cercado Quiñonez, E. A. (2021). *Evaluación cualitativa de suelos de la parroquia Colonche mediante cromatografía de Pfeiffer* [Trabajo de integración curricular, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/bb194e68-ea63-41ea-8387-9495d310eec4/content>
- FAO. (2017). *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Recuperado el 10 de diciembre de 2025, de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/I8894EN>
- FAO & ITPS. (2021). *Global status of salt-affected soils*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/I8894EN>
- Google. (2025). *Google Maps*. Recuperado el 10 de diciembre de 2025, de <https://maps.google.com>
- Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A., & Gilliam, M. (2016). Fruit calcium: Transport and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 7, 569. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00569>
- Horton, D. (2022). *Home fruit orchard pruning techniques* (Circular C 1087). University of Georgia Cooperative Extension. <https://fieldreport.caes.uga.edu/publications/C1087/home-fruit-orchard-pruning-techniques/>
- Intergovernmental Technical Panel on Soils & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The status of the world's soil resources: Technical summary update 2022*. <https://www.fao.org/3/cb9910en/cb9910en.pdf>

- Karaca, A., Cetin, S. C., Turgay, O. C., & Kizilkaya, R. (2010). Shukla & A. Varma (Eds.), Soil enzymology (pp. 119–148). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7
- Lal, R. (2020). Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A–32A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Elsevier / Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780123849052>
- Nicholls, C. I., & Altieri, M. A. (2019). *Bases agroecológicas para la adaptación de la agricultura al cambio climático. Cuadernos de Investigación UNED*, 11(1), S55–S61. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v11n1/1659-4266-cinn-11-01-55.pdf>
- Pfeiffer, E. E. (1984). *Chromatography applied to quality testing* (4th ed.). Biodynamic Farming & Gardening Association. <https://steinerbooks.org/products/9780938250210-chromatography-applied-to-quality-testing>
- Pilon, L. C., Cardoso, J. H., & Medeiros, F. S. (2018). *Guia práctico de cromatografía de Pfeiffer* (Documentos 455). Embrapa Clima Temperado. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1097113>
- Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2(1), 15221. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- Restrepo Rivera, J. (2021). *Manual práctico de agricultura regenerativa. Fundación Agricultura Regenerativa Latinoamérica*.
- Restrepo Rivera, J., & Pinheiro, S. (2011). *Cromatografía: Imágenes de vida y destrucción del suelo*. Impresora Feriva. <https://morralcampesino.files.wordpress.com/2016/03/cromatografia-restrepo-pinheiro.pdf>
- Soiltech Solutions. (2018). Guía técnica para la interpretación de cromas de Pfeiffer. Soiltech Solutions.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Oxford University Press.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., & Gil-Sotres, F. (2008). Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils: Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(10), 2146–2155. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K. P., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A. K., De Corato, U., & Sansinenea, E. (2022). Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant connection. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 883970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970>
- Universidad de Buenos Aires. (2023). *Biodiversidad del suelo: funciones ecológicas y relevancia ambiental*. <https://www.uba.ar>
- Weather Atlas. (2025). *Estelí, Nicaragua — clima y tiempo*. Recuperado el 10 de diciembre de 2025, de <https://www.weather-atlas.com/en/nicaragua/esteli>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>