

Caracterización de la calidad edáfica en agroecosistemas gestionados por familias campesinas de Pirané, Formosa, Argentina

Caraterização da qualidade edáfica em agroecosistemas gerenciados por famílias de camponeses de Pirané, Formosa, Argentina

Characterization of the edaphic quality in agroecosystems managed by peasant families of Pirané, Formosa, Argentina

Stella Maris Mangione¹; Dennis José Salazar Centeno²; Nora Trejo³; Liliana Rosa Galián⁴

¹Profesora de la Cátedra Libre de Agricultura Familiar y Soberanía Alimentaria. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires. Licenciada en biología por la Universidad Nacional de La Plata. Coordinadora del Centro Agroecológico ASHPA, Presidente Perón, Buenos Aires, Argentina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-8392>. e-mail ceashpa@gmail.com

²Profesor jubilado de la Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. Doctor *agriculturarum* por la Universidad de Leipzig (Leipziger Universität), Leipzig Alemania. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3281-2348>. e-mail dennis.salazar1962@gmail.com

³Profesora de la Cátedra de Microbiología. Facultad de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ingeniera agrónoma por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2045-1186>. e-mail microbiologia@agrarias.unlz.edu.ar

⁴Profesora de la Cátedra de Microbiología. Facultad de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ingeniera agrónoma por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5889-0892>. E-mail: microbiologia@agrarias.unlz.edu.ar

Recibido en: 03 enero 2024 - Aceptado en: 18 jun 2024

RESUMEN

La calidad del suelo puede ser heredada, en relación con los procesos de formación, y dinámica, especialmente debido a aquellos introducidos por la actividad humana. El objetivo de esta investigación consistió en caracterizar la calidad edáfica de cuatro agroecosistemas campesinos a través de indicadores físicos, químicos, biológicos y factores antropogénicos. Esto se planteó como línea de base para el monitoreo de la calidad del suelo y para la implementación de tecnologías y prácticas que promuevan el paradigma agroecológico. La perspectiva metodológica adoptada fue mixta. Se determinó que el pH fuertemente ácido en el suelo de AAA es el factor químico limitante, mientras que la salinidad moderada en ATH y ATD restringe la nutrición vegetal. En los cuatro agroecosistemas, se cuantificaron las Unidades Formadoras de Colonia por gramo de suelo, pertenecientes a microorganismos diazotófos, oxidante de NH_4^+ y NO_2^- , solubilizadores de fósforo, hongos celulolíticos y hongos totales. Estas poblaciones son muy sensibles a las condiciones edafoclimáticas y a los efectos antropogénicos, pero contribuyen a la biofertilización natural, la bioestimulación natural, el control biológico natural y la biorremediación natural, que en conjunto, facilitan la supresión de efectos perjudiciales en estos suelos.

Palabras clave: agroecología, biofertilización, biorremediación, microorganismos edáficos, salud del suelo

RESUMO

A qualidade do solo pode ser herdada, em relação aos processos de formação e dinâmica, especialmente aos associados à atividade humana. O objetivo desta pesquisa foi caracterizar a qualidade do solo de quatro agroecosistemas camponeses por meio de indicadores físicos, químicos, biológicos e fatores antropogênicos. Isso foi proposto, como uma linha de base para o monitoramento da qualidade do solo e para a implementação de tecnologias e práticas na promoção do paradigma agroecológico. A perspectiva metodológica foi mista. Foi determinado que o pH fortemente ácido no solo em AAA é o fator químico limitante, enquanto a salinidade moderada no ATH e no ATD restringe a nutrição das plantas. Nos quatro agroecosistemas, foram quantificadas as Unidades Formadoras de Colônias por grama de solo, pertencentes a microrganismos diazotróficos, oxidantes de NH_4^+ y NO_2^- , solubilizadores de fósforo, fungos celulolíticos e fungos totais. Estas populações são muito sensíveis às condições edafoclimáticas e aos efeitos antropogênicos, mas contribuem para a biofertilização natural, para a bioestimulação natural, para o controle biológico natural e para a biorremediação natural, e que, em conjunto, facilitam a supressão de efeitos prejudiciais nesses solos.

Palavras-chave: agroecologia, biofertilização, biorremediação, microorganismos do solo, saúde do solo

ABSTRACT

Soil quality can be inherited, related to formation processes, and dynamic, especially due to those introduced by human activity. The objective of this research was to characterize the edaphic quality of four peasant agroecosystems through physical, chemical, biological indicators and anthropogenic factors. This was proposed as a baseline for monitoring soil quality and for the implementation of technologies and practices for the promotion of the agroecological paradigm. The methodological perspective adopted was mixed. It was determined that the strongly acidic pH in the soil of AAA is the limiting chemical factor, while moderate salinity in TAG and TAD restricts plant

nutrition. In the four agroecosystems, Colony Forming Units per gram of soil were quantified. These belonged to diazotrophic microorganisms, NH_4^+ and NO_2^- oxidizers, phosphorus solubilizers, cellulolytic fungi and total fungi. These populations are highly susceptible to edaphoclimatic conditions and anthropogenic influences, yet they play a pivotal role in natural biofertilization, natural biostimulation, biological control and natural bioremediation, which collectively facilitate the suppression of detrimental effects on these soils.

Keywords: agroecology, biofertilization, bioremediation, soil health, soil microorganisms

INTRODUCCIÓN

El suelo se considera un “cuerpo natural independiente con morfología propia, producto de la acción conjunta del clima, la vegetación y seres vivos sobre una roca, durante un cierto periodo de tiempo” (Ortiz-Silla, 2015, p. 53). Cantú *et al.* (2007) revelan que, hasta 1992, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) se enfatizó en la urgencia de desarrollar y aplicar metodologías para “determinar el estado del ambiente y monitorear los cambios ocurridos a nivel local, nacional, regional y global” (p. 173). Estos mismos autores resaltan que la aplicación del Capítulo 40 de la Agenda 21 condujo al desarrollo y aplicación de diferentes indicadores e índices, entre los cuales los referidos a determinar la calidad de los suelos. El concepto de calidad de suelo fue definido, por primera vez, por Soil Science Society of America (Karlen *et al.*, 1997), que se evalúa con indicadores. Un indicador “es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifique, mida y comunique, en forma comprensible, información relevante” (Cantú *et al.*, 2007, p. 174). En este sentido, se han propuestos indicadores cuantitativos y cualitativos para la evaluación de la calidad del suelo (Doran & Parkin, 1997; García; Ramírez; Sánchez, 2012; Grupo Operativo Leñosost, 2020).

Tanto la calidad como la dinámica del suelo pueden heredarse. La primera se refiere a los procesos de formación del suelo (cambios a largo plazo) y la segunda al uso y manejo del suelo por el hombre (cambios a corto y mediano plazo), que originó el concepto de salud del suelo (Ortiz-Silla, 2015), que implica que el suelo compromete su salud o calidad por la influencia antrópica. La calidad o salud del suelo se evalúa por indicadores físicos, químicos y biológicos y sus interacciones; por lo cual, es necesario analizarlos de manera conjunta (Afanador-Barajas *et al.*, 2020). Sin embargo, sólo en tiempos recientes se planteó que los suelos contienen un componente biológico activo,

que contribuye a su sostenibilidad (Moreira; Huising; Bignell, 2012) y permite dimensionarlo como ‘sistema viviente’ (Sánchez de Prague *et al.*, 2007) visión que, “suma a la salud del planeta, a la calidad de los alimentos y la permanencia del suelo en el tiempo” (Sánchez de Prague *et al.*, 2012, p. 26). Ante esta situación, surgió la Iniciativa para la Conservación y Uso Sostenible de la Biodiversidad del Suelo, que enfatizó la importancia de la evaluación y manejo de la diversidad del suelo a largo plazo (FAO, 2020).

La Carta Mundial del Suelo establece que los suelos saludables son un requisito previo básico para satisfacer las diversas necesidades de alimentos, biomasa (energía), fibra, forraje y otros productos, y para garantizar la prestación de los servicios ecosistémicos esenciales en todas las regiones del mundo (FAO, 2015). Se han definido nueve límites planetarios que afectan la seguridad de la biosfera, y, por ende, a la sustentabilidad de los agroecosistemas y a los servicios ecosistémicos (Rockström *et al.*, 2009), de los cuales cinco se relacionan con la producción de alimentos, que son: cambio climático, cambio del uso del suelo, los flujos bioquímicos de nitrógeno (N) y fósforo (P), la integridad de la biosfera y el uso del agua dulce (Salazar-Centeno; Jürgen; Marroquín, 2023). Estas realidades demandan que se caracterice la calidad edáfica de los agroecosistemas gestionados por familias campesinas y que dé pautas para fomentar el paradigma de la agroecología. Es decir, que garantice servicios ecosistémicos esenciales para mantener la calidad de vida de los seres humanos y la conservación de la biodiversidad (Kibblewhite; Ritz; Swift, 2007).

Hasta el presente, en la provincia de Formosa, Argentina, no fue caracterizada la calidad del suelo de agroecosistemas campesinos, que integre indicadores físicos, químicos, microbiológicos, sus interacciones y el efecto antropogénico. Para la mayoría de los indicadores biológicos, hay poca evidencia disponible que relacione directamente el valor del indicador con la productividad o el riesgo de impacto ambiental negativo (Videla y Picone, 2017). En la región Pampeana, se han realizado estudios, en diferentes condiciones climáticas y manejos agronómicos, de calidad del suelo con indicadores biológicos y/o físicos, y/o químicos (Baridón, 2015; De Luca; Salazar-Martínez; Pérez, 2018; Faggioli y Symanczik, 2018; Fernández *et al.*, 2018).

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la calidad edáfica de agroecosistemas campesinos mediante un diagnóstico que emplea indicadores físicos, químicos, microbiológicos y la influencia antropogénica en cuatro agroecosistemas del municipio Villa Dos Trece, Pirané Sur, Formosa, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de los agroecosistemas y periodo de realización del estudio

El estudio se realizó en cuatro agroecosistemas (uno agroecológico, uno convencional y dos en transición) durante el periodo de agosto 2018 a septiembre 2019 (Tabla 1). Los agroecosistemas son gestionados por familias campesinas que integran colonias agrícolas, de la Jurisdicción Villa Dos Trece- Departamento Pirané, ubicadas en el lote 20 y Colonia km 210, provincia de Formosa, Argentina (Figura 1).

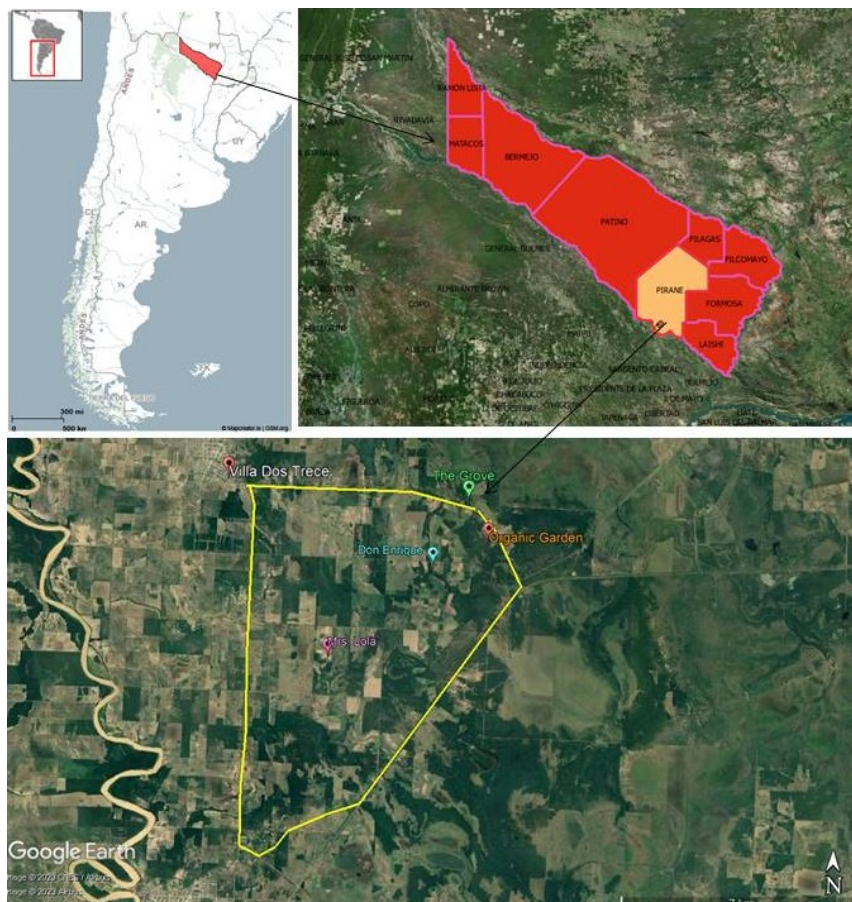


Figura 1. Ubicación de los agroecosistemas Jurisdicción Villa Dos Trece, Pirané, Formosa, Argentina.
Fuente: Plataforma Mapcreator, QGIS 2.8.1 y Google Earth Pro 2023.

El Departamento Pirané se ubica en la Ecorregión Chaco húmedo (Burkart *et al.*, 1999), y se encuentra dividido en dos zonas productivas, Pirané Sur y Pirané Norte. Pirané Sur posee una superficie total de 3 136 km² y comprende las localidades de Palo Santo, El Colorado, Mayor Edmundo Villafañe y Villa Dos Trece (Schaller, 2013).

El clima es subtropical-subhúmedo, con precipitaciones entre 600 y 1 200 mm anuales. De acuerdo al mapa fisiográfico, integra la unidad de paisaje denominada Antiguo delta del río Bermejo, que comprende una llanura de origen aluvial caracterizada por la alternancia de albardones, interfluvios anegables, planicies disectadas por paleocauces y paleovalles con cauces divagantes (Schulz; Rodríguez; Moretti, 2017). Los sedimentos de este sector son mayormente coloidales, compuestos de minerales de arcilla y materia orgánica en diferentes estadios de degradación (Schulz; Rodríguez; Moretti, 2017).

Enfoque, alcance, diseño metodológico y criterios de selección de los agroecosistemas

La perspectiva metodológica adoptada fue mixta, con enfoque cuantitativo, complementada con enfoque cualitativo que corresponde a un estudio de caso múltiple (Yin, 2003). El alcance del enfoque cuantitativo es descriptivo y correlacional, con un diseño no experimental transeccional. La perspectiva metodológica cualitativa consistió en la combinación entre el interaccionismo simbólico, cuyo método y técnica fueron la entrevista semiestructurada individual y el enfoque etnográfico, cuyo método y técnica fueron la observación participante, que contribuyó a la caracterización de subsistemas y manejos de los agroecosistemas, que se apoyó con un análisis documental. Los criterios de selección de los cuatro agroecosistemas se cimentaron en los formulados por Mangione y Salazar-Centeno (2021). Los agroecosistemas fueron (Tabla 1): Agroecosistema Agroecológico la Arboleda (AAA); Agroecosistema Convencional Don Enrique (ACD), Agroecosistema en Transición Huerta orgánica (ATH); Agroecosistema en Transición Doña Lola (ATD).

Muestreo de suelo para los indicadores físicos y químicos

El muestreo de suelo en los subsistemas con producción hortícola fue aleatorio. Se obtuvieron muestras homogenizadas para cada agroecosistema a una profundidad de 0 a

15 cm (Mendoza-Corrales y Espinoza, 2017). Los parámetros físicos y químicos fueron: textura por el método de Bouyoucos; pH (pasta), método potenciométrico; conductividad eléctrica en dS m^{-1} (Ce) por conductimetría del extracto de saturación (25°C); porcentaje de Nitrógeno total (Nt%) por el método Micro-Kjeldahl; porcentaje de Carbono orgánico (CO%) y porcentaje de Materia orgánica (MO%) con el método Oxidación húmeda de Walkley-Armstrong Black; Nitrógeno de nitratos (NO_3^-) en ppm por colorimetría del ácido fenol-disulfónico; Fósforo elemental disponible en ppm (P) por el método Bray-Kurtz modificado; Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) método Lavado de bases con acetato de amonio 1N pH 7,0 y evaluación del nitrógeno retenido por el método de Kjeldahl.

Tabla 1. Principales características de los agroecosistemas estudiados (2018-2019).

Agroecosistemas	Enfoque productivo	Coordenadas	Superficie (ha)	Subsistemas y manejo del suelo	
La Arboleda	Agroecológico (AAA)	26°11'48.1"S 59°17'28.1"W	50	Subsistema huerto-frutales cítricos de variedades no injertadas	Hortalizas bajo sombráculo, con incorporación de mantillo de bosque. Monte frutal de cítricos, suelos cubiertos de pasto.
Don Enrique	Convencional (ACD)	26°12'49.7"S 59°18'04.1"W	52	Subsistema huerto	Diseño en policultivo de hortalizas, suelo de desmonte y manejo natural
Huerta Orgánica	Transición (ATH)	26°12'50.5"S 59°17'31.7"W	25	Subsistema huerto	Hortalizas de hoja bajo sombráculo con mantillo de materia orgánica
Doña Lola	Transición (ATD)	26°14'18.1"S 59°19'52.0"W	50	Subsistema huerto	Hortalizas de hoja bajo sombráculo. Policultivo de hortalizas a campo, suelos desnudos

Fuente: Mangione y Salazar-Centeno, 2021

Muestreo de suelo para la cuantificación de los grupos funcionales de microorganismos edáficos

El muestreo fue al azar en el horizonte arable Ap (0-15 cm) de los subsistemas con producción hortícola (hortalizas bajo sombráculo y a campo) (Tabla 1) y se pesó una muestra de suelo compuesta de un kg, que se colocó en una bolsa de nylon rotulada, manteniéndola en conservadora durante el traslado; posteriormente en heladera (Trejo *et al.*, 2020). Las muestras de suelo se colocaron en bandejas de cartón, en condiciones ambientales, hasta peso constante para su procesamiento. De cada muestra se pesaron 10g de suelo seco, que se diluyeron en 90ml de agua estéril con Tween 0.005 %

(dilución 10^{-1}) en un Erlenmeyer de 250 ml. Posteriormente, se realizaron diluciones sucesivas hasta 10^{-8} , de las que se sembró un ml.

La determinación de bacterias diazotróficas se realizó mediante el método de diluciones seriadas por triplicado (Döbereiner and Day, 1976). Se incubó a 30° C por 48 a 72 horas. Las UFC g^{-1} de suelo de las bacterias oxidantes del amonio (NH_4^+) y de oxidantes de nitritos (NO_3^-) se obtuvieron por siembra en caldos específicos. Se incubaron por 30 días en agitación continua en un ORBITAL SHEKER a 300 r.p.m. y se cuantificaron utilizando la técnica del número más probable (Alef and Nannipieri, 1995). Las UFC g^{-1} de suelo de los microorganismos solubilizadores de fósforo (P) se realizaron por triplicado en placa Petri, con medio NBRIP sólido (Nautiyal, 1999). Las UFC g^{-1} de suelo de hongos celulolíticos se realizó en caldo con agregado de papel de celulosa (Alef and Nannipieri, 1995), utilizando la técnica del número más probable. Se incubó 30 días en agitación continua.

Las UFC g^{-1} de suelo de hongos totales se determinaron en diluciones seriadas de 10^{-3} a 10^{-5} en cajas de Petri, por triplicado (Alef and Nannipieri, 1995). Se incubó a $28 \pm 2^{\circ}$ C durante 72 horas. Transcurrido ese período se determinaron las UFC g^{-1} de suelo con un microscopio óptico, con 400x de aumento, se examinaron las macros y micros estructuras reproductivas para su identificación.

Análisis de los datos

En cada agroecosistema, se promediaron las UFC g^{-1} de suelo de los grupos funcionales y se calculó el promedio general de cada grupo funcional con su respectiva desviación estándar para cuantificar el coeficiente de variación en porcentaje (CV%). Se seleccionó como indicador de la calidad o salud del suelo de los agroecosistemas la relación hongos-bacterias mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Relación hongos/bacterias} = \frac{\text{UFC } g^{-1} \text{ de suelo de hongos totales}}{\sum \text{UFC } g^{-1} \text{ de suelo de bacterias diazotróficas oxidantes de } NH_4 \text{ y } NO_2}$$

Los resultados de las variables edáficas físicas y químicas de cada agroecosistema se presentan en una tabla y su interpretación es agroecológica con apoyo de la revisión documental.

RESULTADOS

Características edáficas físicas y químicas de los agroecosistemas

Desde la perspectiva agronómica, el pH del AAA es fuertemente ácido (5.24) y se refleja en menores valores de la CIC (14.7 meq. en 100 g de suelo) y del nitrógeno total (0.22 %) por lo que es muy probable que el número de cationes del complejo de cambio (Orgánicos e inorgánicos) con la solución del suelo sea menor (Tabla 2). El pH del suelo del ACD (7.37) lo tipifica como un suelo muy levemente alcalino porque supera en 0.37 al umbral de siete (Tabla 2). En estos dos agroecosistemas, la salinidad de sus suelos no restringe el crecimiento de los vegetales porque la C_e es de 0.93 dS m^{-1} y 0.7 dS m^{-1} (Tabla 2). El suelo del ATH y del ATD es moderadamente ácido y ligeramente ácido con un pH de 5.96 y 6.40, respectivamente (Tabla 2), valores que se ubican en el rango óptimo de este indicador químico para que los nutrientes estén más disponibles para la biodiversidad productiva vegetal. La salinidad de estos suelos es moderada con 2.62 dS m^{-1} y 2.67 dS m^{-1} (Tabla 2), que puede restringir el crecimiento y rendimiento de las plantas cultivadas.

Los suelos de los cuatro agroecosistemas pertenecen a Unidades Cartográficas (CU) distintas (Tabla 3), pero con un paisaje relativamente homogéneo por lo que comparten características físicas y químicas similares (**Tablas 2 y 3**). La clase textural predominante es franco limosa, son bien provistos de P soluble, con una relación C/N de la MO inferior a 10 (10C:1N) que es de lenta descomposición y con mucha estabilidad. Entre las limitantes agronómicas de estas lomas altas tendidas se resaltan la profundidad efectiva, acidez, alcalinidad, erosión hídrica y retención de agua.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno

Los grupos funcionales de microorganismos edáficos que contribuyen al CBN y que son muy importantes para la nutrición nitrogenada de la biodiversidad productiva vegetal y auxiliar, en los cuatro agroecosistemas, se ilustran en la Tabla 4. Uno de estos grupos funcionales son las bacterias diazotróficas (BD) de vida libre, cuyas unidades formadoras de colonias por gramo (UFC g^{-1}) de suelo oscilaron entre $3.5 \cdot 10^6$ y $1.1 \cdot 10^8$, que representaron las mayores cuantías de UFC g^{-1} de suelo, referente a los otros grupos

funcionales, en cada agroecosistema (**Tabla 4**). En este grupo funcional se determinó la mayor variabilidad respecto a su promedio ($3.6E+07$), cuyo coeficiente de variación (CV) se estimó en 140 % .

Tabla 2. Valores de las variables químicas analizadas en cada agroecosistema y su perfil típico, Villa Dos Trece, Pirané, Argentina, 2019.

Agroecosistemas	pH	Ce (dS m ⁻¹)	Nt (%)	CO (%)	MO (%)	C/N	P (ppm)	CIC meq. en 100 g de suelo
La Arboleda Agroecológico (AAA) Rango	5.24 Fuertemente ácido	0.93 Efecto despreciable salinidad	0.22 Medianamente provisto	1.9	3.2 Bien provistos	8.5 Buena	28 Provisto	14.7 Moderada
UC 22 Con. Pc Hapludol ácuico	6		0,270	2,68	Bien provistos	10	70,1	Moderadamente alta
Don Enrique Convencional (ACD) Rango	7.37 Neutro	0.70 Efecto despreciable salinidad	0.39 Bien provisto	2.7	4.6 Muy bien provistos	6.9 Buena	24.5 Provisto	19.4 Alta
UC 7 Con. Cb Argiudol ácuico	4.7		0,370	3,81	Bien provistos	10	58.8	Alta
Huerta Orgánica Transición (ATH) Rango	5.96 Medianamente ácido	2.62 Rendimiento cultivos restringido	0.25 Medianamente provisto	1.7	2.9 Medianamente provistos	6.7 Buena	206 Provisto	16.9 Moderada
UC 25 Con. Sa Hapludol éntico	5.9		0,228	2,06	Regularmente provistos	9	40,3	Media
Doña Lola Transición (ATD) Rango	6.40 Ligeramente ácido máxima disponibilidad de nutrientes	2.67 Rendimiento cultivos restringido	0.45 Muy bien provisto	2.3	4 Bien provistos	5.2 Buena	217 Provisto	15.7 Moderada
UC 80 Aso. Pb Hapludol éntico	5.6		0,281	2.85	Bien provistos	10	38.2	Moderadamente alta

Fuente: Mangione, 2023

En el AAA, gestionado por los agricultores Miguel y Paulo Gauliski; en el ACD, gestionado por Delia Caballero y Enrique Kemper; y en el ATD, gestionado por Lola Céspedes y Ernesto Bubrosky, se cuantificaron el mayor número de UFC g⁻¹ de suelo con $1.5 \cdot 10^7$, $1.4 \cdot 10^7$ y $1.1 \cdot 10^8$, respectivamente (**Tabla 4**). Las menores UFC g⁻¹ de suelo se determinaron en el agroecosistema ATH, gestionado por Rosa Bustos e hijos, con $3.5 \cdot 10^6$, por lo que es más probable que el proceso de fijación biológica del N₂ atmosférico sea menos intenso en el suelo del ATH.

Tabla 3. Composición de las Unidades Cartográficas (UC) de suelos de los agroecosistemas, serie, ubicación de los suelos en el paisajes y limitantes productivas.

Agroecosistemas	Unidad cartográfica (UC)	Composición, serie y taxonomía	Ubicación de los suelos en el paisaje	Limitantes principales
La Arboleda Agroecológico (AAA)	UC 22 Con. Pc	Consociación Potrero Norte, Serie Potrero Norte, Hapludol ácuico	Lomas altas tendidas	Profundidad efectiva, fertilidad natural, acidez, fragipán
Don Enrique Convencional (ACD)	UC 7 Con. Cb	Consociación Coatí, Serie Coatí, Argiudol ácuico	Lomas altas tendidas	Erosión hídrica, acidez, alcalinidad
Huerta Orgánica Transición (ATH)	UC 25 Con. Sa	Consociación Saladillo, Serie Saladillo, Hapludol éntico	Lomas altas tendidas	Acidez, retención de agua
Doña Lola Transición (ATD)	UC 80 Aso. Pb	XII Asociación Perín XII, Serie Perín, Hapludol éntico	Lomas altas tendidas	Profundidad efectiva, erosión hídrica, acidez

Fuente: Schulz; Rodríguez; Moretti, 2017.

Tabla 4. Unidades formadoras de colonias por gramo (UFC g⁻¹) de suelo de grupos funcionales de la microbiota edáfica que coadyuban a los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno (N), Fósforo (P) y Carbono (C), y relación hongos bacterias en cuatro agroecosistemas, Villa Dos Trece, Pirané, Argentina, 2019.

Agroecosistemas	Grupos funcionales que participan en los ciclos biogeoquímicos				
	Diazótrofos	Nitrógeno		Fósforo	Carbono
		Oxidantes del NH ₄ ⁺	Oxidantes del NO ₂ ⁻	Solubilizadores de fósforo	Hongos celulolíticos
La Arboleda Agroecológico (AAA)	1.50E+07	1.40E+05	1.40E+04	1.90E+06	1.20E+06
Don Enrique Convencional (ACD)	1.40E+07	7.00E+04	6.00E+03	1.90E+06	2.00E+06
Huerta Orgánica Transición (ATH)	3.50E+06	1.10E+04	1.70E+04	9.00E+04	1.40E+06
Doña Lola Transición (ATD)	1.10E+08	1.40E+06	1.70E+04	1.50E+05	1.40E+05
Promedio	3.6E+07	4.1E+05	1.4E+04	1.0E+06	1.2E+06
DS	4.99E+07	6.65E+05	5.20E+03	1.03E+06	7.75E+05
CV (%)	140	164	38	102	65

Fuente: Autores, 2023

Las UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias oxidantes del catión NH₄⁺ osciló entre 1.1*10⁴ y 1.4*10⁶, cuyo promedio se cuantificó en 4.1*10⁵ con un CV de 164 % (Tabla 4), que representó el mayor valor de esta medida de dispersión. En el suelo del ATD y del AAA se contabilizaron las mayores UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias oxidantes del catión NH₄⁺ con 1.4*10⁶ y 1.4*10⁵, respectivamente. Las UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias

oxidantes del anión NO_2^- varió entre $6 \cdot 10^3$ y $1.7 \cdot 10^4$, que representaron las menores cantidades de UFC g^{-1} de suelo con el menor CV con 38 % (Tabla 4), que se atribuyó a que las condiciones edafoclimáticas y la gestión que realizan las familias campesinas en los agroecosistemas ejercen menor influencia sobre la reproducción de las bacterias oxidantes del NO_2^- por lo que es de esperar que la oxidación del anión NO_2^- al anión NO_3^- sea muy similar. A mayor porcentaje del coeficiente de variación, es más marcada la influencia de las condiciones edafoclimáticas y la gestión de las familias agricultoras en sus agroecosistemas.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del fósforo

Las UFC g^{-1} de suelo por microorganismos que pertenecen al grupo funcional solubilizadores de P varió $9.0 \cdot 10^4$ a $1.9 \cdot 10^6$ (Tabla 4), cuyo promedio general se cuantificó en $1.0\text{E}+06$ y su CV% en 102 %. En los suelos de AAA y de ACD se cuantificaron las mayores UFC g^{-1} de suelo con $1.9 \cdot 10^6$, respectivamente. Estos resultados permiten inferir que la actividad metabólica de estos microorganismos edáficos puede ser más intensa en estos agroecosistemas en comparación con la que acontece en los suelos de ATH y ATD, que implica que las poblaciones de este grupo funcional son muy sensibles a las condiciones edafoclimáticas y a la gestión del agroecosistema por parte de las familias campesinas.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del carbono

Las UFC g^{-1} de suelo de hongos celulolíticos que participan en CBC oscilaron entre $1.4 \cdot 10^5$ a $2.0 \cdot 10^6$, cuyo promedio general se estimó en $1.2 \cdot 10^6$ con un CV de 65 % (Tabla 4), que supera, únicamente al CV de las bacterias oxidantes del anión NO_2^- (CV= 38 %). Estos resultados conducen a inferir que las poblaciones de las bacterias oxidantes del anión NO_2^- son más estables, seguidas por las poblaciones de los hongos celulolíticos. Es muy probable que en el suelo de ACD acontezca una mayor actividad metabólica de hongos capaces de producir el complejo enzimático para convertir la celulosa en glucosa porque en este agroecosistema se cuantificó el mayor número de UFC g^{-1} de suelo ($2.0 \cdot 10^6$). Bajo este supuesto, en ATD existe una menor capacidad de

convertir la celulosa en glucosa porque las UFC g⁻¹ de suelo son las menores (1.4*10⁵). Estos resultados, aparentemente, son contradictorios, porque la gestión que implementa la familia del primer agroecosistema es convencional (ACD) y la del segundo es en transición agroecológica (ATD). El pH (7.37) del ACD favorece la actividad enzimática de este grupo funcional referente a un suelo ligeramente ácido, como el catalogado del ATD (6.4). En síntesis, la gestión que realizan las familias campesinas en su agroecosistema y el pH del suelo influyen sobre la capacidad de establecer UFC g⁻¹ de suelo de los hongos celulolíticos. También, es meritorio resaltar que las UFC g⁻¹ de suelo de los hongos celulolíticos superan a las UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias que oxidan a los iones NH₄⁺ y NO₂⁻ (Tabla 4), cuyos promedios obtienen valores de 1.2*10⁶, 4.1*10⁵ y 1.4*10⁴, respectivamente. El promedio de las UFC g⁻¹ de suelo de los hongos celulolíticos es muy similar con el de las UFC g⁻¹ de suelo de la microbiota edáfica que es capaz de solubilizar el P (1.0*10⁶ vs 1.2*10⁶).

Relación de hongos-bacterias como indicador de calidad o salud del suelo

El promedio de la relación de las UFC g⁻¹ de suelo de los hongos totales con las UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias que fijan el nitrógeno atmosférico (Diazotróficas) y las bacterias nitrificadoras (Oxidantes NH₄⁺ y NO₂⁻) es de 0.26 con un CV de 789 % (Tabla 5). El rango de esta relación osciló entre 0.002 y 0.794 (Tabla 5), que significa que las comunidades fúngicas pueden representar del 2 al 79.9 % de la microbiota edáfica de estos agroecosistemas. El menor valor de la relación hongos-bacterias se cuantificó en ATD, mientras que el mayor en ATH. El 9.9 % y el 14.9 % de las UFC g⁻¹ de suelo corresponde a los hongos en los AAA y ACD, respectivamente (**Tabla 5**) que son los agroecosistemas con un mejor balance de la relación hongos-bacterias.

DISCUSIÓN

Características edáficas físicas y químicas de los agroecosistemas

De acuerdo con la carta de suelos de la República Argentina el pH fuertemente ácido del suelo es un indicador limitante para la nutrición de los vegetales (Schulz; Rodríguez; Moretti, 2017). Por tanto, se recomienda la práctica de encalado, en AAA, considerando las relaciones catiónicas para la selección de la fuente del Ca (Jürgen-Pohlan; Salazar; Torrico, 2020; Marroquín-Agreda *et al.*, 2023). Por el contrario, un pH entre 6-7 se considera el adecuado para que los nutrientes estén en niveles razonables de

disponibilidad (Cremona y Enríquez, 2020). La salinidad moderada del suelo de ATH y ATD reduce la disponibilidad de agua para las plantas, mediante el efecto desecante que provoca con la retención del agua en la matriz del suelo, que no permite que las plantas la absorban (Cremona y Enríquez, 2020), principalmente, durante sequías prolongadas en la provincia de Formosa como consecuencia del cambio climático. Estos resultados conducen a afirmar que la salinidad moderada de los suelos de ATH y ATD es el factor limitante para el crecimiento y rendimiento de los vegetales que conforman la biodiversidad productiva y auxiliar, mientras que el pH del suelo, en AAA, es el factor limitante para una adecuada nutrición de los vegetales.

Tabla 5. Relación del total de las UFC g⁻¹ de suelo de los hongos con las UFC g⁻¹ de suelo de las bacterias que participan en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Diazótrofas + oxidantes de NH₄⁺ + oxidantes de NO₂⁻), en cuatro agroecosistemas, Villa Dos Trece, Pirané, Argentina, 2019.

Agroecosistemas	UFC g ⁻¹ de suelo		Relación Hongos/Bacterias
	Bacterias diazótrofas + bacterias oxidantes de NH ₄ ⁺ + bacterias oxidantes de NO ₂ ⁻	Hongos totales del suelo	
La Arboleda Agroecológico (AAA)	1.52E+07	1.50E+06	0.099
Don Enrique Convencional (ACD)	1.41E+07	2.10E+06	0.149
Huerta Orgánica Transición (ATH)	3.53E+06	2.80E+06	0.794
Doña Lola Transición (ATD)	1.11E+08	1.90E+05	0.002
Promedio	3.60E+07	1.6E+06	0.26
DS	5.05E+07	1.11E+06	0.36
CV (%)	140	67	789

Fuente: Autores, 2023

Las familias campesinas han observado que la clase textural franco limosa favorece la formación de costras superficiales, sus agregados son firmes, se rompen bajo presión moderada, con buena retención de agua y aptos para cultivarlos. Los suelos de estos agroecosistemas se localizan en un paisaje de lomas altas tendidas con limitantes agronómicas (Tabla 3) por lo que es muy importante que la gestión agroecológica del suelo contribuya a su restauración y mejoramiento. Para contrarrestar los aspectos negativos de estas lomas altas tendidas desde el punto de vista físico (Profundidad efectiva, retención y disponibilidad de agua), químico (Acidez, alcalinidad, salinidad y disponibilidad de nutrientes) y degradación por erosión hídrica es importante que siempre estén muy protegidos por materia orgánica fresca y/o viva para estimular las diferentes cadenas tróficas a lo interno y externo del suelo, incrementar el CO, MO, CIC y la actividad metabólica de la microbiota edáfica. De esta manera se contribuye a

contrarrestar los límites planetarios que afectan la sustentabilidad de los agroecosistemas y a los servicios ecosistémicos.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno

Andrade *et al.* (2015) manifiestan que en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (CBN) acontece la mayor participación de microorganismos. Las bacterias diazotróficas (BD) reducen o fijan el nitrógeno bimolecular atmosférico (N_2) para que este sea asimilable por las biodiversidad productiva vegetal y auxiliar (Asimilación) en forma del catión amonio (NH_4^+) y de realizar la digestión enzimática del NH_4^+ , que lo degrada a compuestos aminados (proteasas, peptonas y aminoácidos), proceso conocido como amonificación o mineralización (Gaviria-Giraldo *et al.*, 2018; Innovatione AgroFood Design, 2019). López (2022) constató que las BD se adaptan bien al manejo agroecológico y convencional de sistemas agroforestales con café, que se reflejó en los mayores valores de UFC g^{-1} de suelo. Beltrán-Pineda y Lizarazo-Forero (2013) afirman que las bacterias implicadas en la reducción del N_2 atmosférico alcanzaron mayores poblacionales, debido a que las condiciones fisicoquímicas de suelos no perturbados y quemados favorecen su abundancia. Esta alta plasticidad de la BD de adaptarse a diferentes ambientes de gestión del agroecosistema es la causal para que alcanzaran las mayores poblaciones, en los cuatro agroecosistemas (Tabla 4). Clavijo *et al.* (2012) constataron que las BD nativas se correlacionan con la materia orgánica, fósforo (P) y el pH del suelo, asociación que no siempre se constató en esta caracterización de la calidad edáfica (Tablas 2 y 3).

Los resultados de la UFC g^{-1} de suelo de las bacterias diazotróficas y de las bacterias oxidantes del NH_4^+ permiten inferir que las condiciones edafoclimáticas y la gestión que realizan las familias campesinas en cada agroecosistema ejercen una influencia muy marcada sobre la capacidad de reproducción de estas bacterias. Por lo cual, es de esperar que la cuantía del N_2 fijado y la de la oxidación del catión NH_4^+ , en el suelo, sea muy disímil, en cada agroecosistema. Esta deducción se fundamenta en los mayores coeficientes de variación (140 % y 164 %) respecto a la media general de cada grupo funcional (Tabla 4), por lo que es más probable que el proceso de fijación biológica del

N₂ atmosférico sea menos intenso en el suelo del ATH, factiblemente por un menor contenido de materia orgánica (MO %) (Tabla 2). El contenido de MO % del suelo de ATH es catalogado como medianamente provisto (2.9 %); mientras que este parámetro edáfico químico en los suelos de AAA, ACD y ATD es caracterizado como bien provisto (3.2 %), muy bien provisto (4.6 %) y bien provisto (4 %), respectivamente (Tabla 2). Esta influencia de las condiciones edafoclimáticas y la gestión que realizan las familias campesinas, en cada agroecosistema, sobre la capacidad reproductiva de las bacterias oxidantes del anión NO₂⁻ es menor, por lo que es de esperar que la oxidación del anión NO₂⁻ al anión NO₃⁻ sea muy similar.

La gestión agroecológica del suelo de ATH debe fomentar el incremento del porcentaje de su MO para favorecer el incremento de las UFC g⁻¹ de suelo de microorganismos diazotófos de vida libre, que se reflejará en una menor dependencia de fertilizantes nitrogenados y fosfóricos sintéticos, reducción de costos de producción y en un menor daño ambiental al mitigar el límite planetario relacionado con los flujos bioquímicos de N y P, que han sobrepasado la zona de incertidumbre o de riesgo creciente (Rockström *et al.*, 2009). Por el contrario, el mayor número de UFC g⁻¹ de suelo de este grupo funcional en el AAA, el ACD y el ATD favorece una actividad enzimática de las bacterias diazotróficas más dinámica y con mayor actividad metabólica, que fomenta, principalmente, servicios ecosistémicos de regulación y soporte para que la biodiversidad productiva vegetal y la auxiliar expresen un mejor crecimiento y desarrollo mediante una mejor nutrición nitrogenada; una mayor resistencia al embate de plagas y enfermedades, y por consiguiente a un mejor servicio ecosistémico de aprovisionamiento (Alimentos, medicinas, fibras, madera, energía, biomasa). López (2022) concluye que los roles funcionales de los géneros de los microorganismos edáficos están más relacionados con los servicios ecosistémicos de apoyo o soporte, regulación y cultural; e indirectamente al servicio ecosistémico de aprovisionamiento puesto que la biomasa que se caracteriza como rendimiento (Alimentos, fibras, madera, energía o leña) es el resultado de un buen crecimiento y desarrollo de los productores (Vegetales), en el que intervienen la biofertilización natural, la bioestimulación natural de los vegetales y los agentes de control biológico natural de plagas y patógenos.

El estudio de procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación son fundamentales para fomentar la productividad de los agroecosistemas y para el cuidado del ambiente (Agua y aire), cuya finalidad debe mantener el equilibrio de los elementos fundamentales para la vida (Turrini; Sbrana; Giovanetti, 2015).

En el suelo del ATD y del AAA, es más probable que la oxidación del NH_4^+ conlleve a una mayor disponibilidad del anión NO_2^- y que este sea absorbido por la biodiversidad productiva vegetal y auxiliar u oxidado por otras bacterias. Por el contrario, en ambos agroecosistemas, puede existir una mayor lixiviación del NO_2^- porque los suelos de clase textural franco limoso (Tabla 3) son medianamente permeables.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del fósforo

Los procesos biogeoquímicos asociados con la liberación del P en formas disponibles para las plantas incluyen la solubilización del P inorgánico y la mineralización del P orgánico (Zou; Binkley; Caldwell, 1995). Los microorganismos edáficos solubilizadores de P es un grupo funcional que incluyen mayoritariamente géneros bacterianos (De vida libre o en simbiosis con vegetales) en comparación con géneros de actinomicetos y fúngicos, que tienen la capacidad de solubilizar fosfatos minerales que han sido fijados en los suelos y que no pueden ser utilizados por las plantas en su nutrición; por ello su rol ecológico es esencial (López, 2022). El principal mecanismo de acción del grupo funcional solubilizador de P es la disminución del pH del medio extracelular a través de la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Mantilla; Esquivel; Negrete, 2011).

Es de suponer que la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular es más intensa y activa en los suelos de AAA y ACD y por consiguiente existe una mayor solubilización del P, fijado por los minerales edáficos, para que este nutriente esté más disponible para los vegetales en la solución del suelo, lo que puede reducir las aplicaciones de fertilizantes fosforados, los costos de producción y fomentar una gestión de este nutriente amigable con el ambiente, principalmente en ACD. López (2022) destaca que este grupo funcional con capacidad de solubilizar el P es multifuncional por su contribución, principalmente; a los servicios ecosistémicos de apoyo o soporte y de

regulación que se gestan en los agroecosistemas y ecosistemas, que fomentan el crecimiento y desarrollo de la biodiversidad productiva vegetal y auxiliar.

Grupos funcionales de microbios edáficos que participan en el ciclo biogeoquímico del carbono

La primera etapa del ciclo del carbono consiste en la reducción o fijación del CO₂ de la atmosfera mediante organismos autótrofos fotosintéticos (Vegetales, algas y cianobacterias) y bacterias autótrofas quimiosintéticas. En la segunda etapa de este ciclo, en los agroecosistemas y ecosistemas, se mineraliza la materia orgánica fresca procedente de restos de vegetales (Paja, hojas, cáscaras, frutos y raíces, etc); cuyo principal biopolímero (Polisacáridos lineal D-glucosa) es la celulosa (15 a 60g por 100 g de materia seca). Un complejo de enzimas celulolíticas (C₁: exo-β-1,4-glucanasa, C_x: endo-β-1,4- glucanasa, y C_b: β-D-glucósido glucohidrolasa E.C.3.2.1.21) presente en una variedad de bacterias, actinomicetos y hongos hidroliza este polisacárido lineal de D-glucosa, que lo transforma de celobiosa y celotriosa en el monosacárido glucosa, que es la principal fuente de energía (C) para el crecimiento de la microbiota edáfica (Frioni, 2006; Ovando-Chacón y Waliszewski, 2005). Es muy probable que en el agroecosistema convencional (ACD) con una mayor actividad metabólica de hongos capaces de producir el complejo enzimático para convertir la celulosa en glucosa se atribuyen, según Frioni (2006) a la aplicación de fertilizantes nitrogenados sintético, porque se estimula la capacidad celulolítica de este grupo funcional e incrementa sus poblaciones. Este mismo autor, señala que un pH cercano a la neutralidad favorece la actividad enzimática de este grupo funcional. López (2022) constató que los hongos que degradan la materia orgánica son multifuncionales porque pueden contribuir en la solubilización del P, K y del S, a la producción de hormonas para el crecimiento vegetal, al biocontrol natural de plagas y agentes patógenos y a la biorremediación natural de los suelos.

Relación de hongos-bacterias como indicador de calidad o salud del suelo

Desde la óptica ecológica la ‘calidad del suelo’ es la capacidad de este para la aceptación, almacenamiento y reciclaje del agua, minerales y energía para la producción de la biodiversidad vegetal productiva, y de la preservación de un ambiente sano

(Arshad y Coen, 1992). Este concepto es funcional (Estrada-Herrera *et al.*, 2017) e incluye indicadores que sirven para la evaluación de las características físicas, químicas y biológicas de los suelos porque se relacionan entre sí, y participan de manera activa en la producción y la estabilidad de los agroecosistemas, y son el cimiento para la sostenibilidad de estos (García; Ramirez; Sánchez, 2012). La relación hongos-bacterias es un buen indicador para la evaluación de la calidad o salud del suelo por su sensibilidad a la reacción al manejo agronómico y a las condiciones edafoclimáticas (Bobadilla, 2022; Fernández *et al.*, 2018).

Bobadilla (2022), en un estudio preliminar de microbiota, en 11 agroecosistemas con diferentes manejos y condiciones edafoclimáticas en Zamorano, Honduras, determinó un rango de la relación de hongos-bacterias de 0.004, en un agroecosistema intensivo (0.4 %), a 1.714, en un agroecosistema orgánico (171.4 %). En los agroecosistemas, los hongos son menos abundantes en comparación con las bacterias (López, 2022; Salazar *et al.*, 2021), pero son de mayor tamaño y biomasa (Mora-Delgado; Silva; Escobar, 2019), cuya participación en la descomposición de la materia orgánica es apreciable porque la mayoría de estas comunidades viven en la materia orgánica muerta (INIAP, 2002) y son capaces de biodegradar la celulosa (15 a 60 %), hemicelulosa (10 al 30 %) y la lignina (5 al 30 %), que son los polímeros más abundantes en los vegetales (Frioni, 2006). Ambos grupos participan en los procesos de mineralización de la materia orgánica y de solubilización, que liberan: N, P, potasio (K), calcio (Ca) y azufre (S) (Pérez-Pérez *et al.*, 2021; Ramos-Salazar *et al.*, 2022).

Los resultados de la relación hongos-bacterias ratifican que la capacidad reproductiva de ambos grupos es muy sensible al manejo agronómico por parte de las familias productoras y a las condiciones edafoclimáticas. La menor relación hongos-bacterias en el ATD se atribuye a que el suelo de este agroecosistema permanece sin cobertura vegetal (Tabla 1), a su salinidad moderada (2.67 dS m^{-1}), a un mayor porcentaje de nitrógeno total ($\text{Nt}\% = 0.45$) en el suelo, a una mayor disponibilidad de P (217 ppm en 100 g de suelo) y a una menor relación C/N (5.2) de la MO (Tablas 2 y 5), que restringen la capacidad reproductiva de los hongos edáficos. Opuesta a esta situación, el suelo del ATH cubierto con un mantillo de materia orgánica (Tabla 1), un pH

medianamente ácido (5.96), con mediana salinidad (2.62 dS m^{-1}), con un porcentaje de nitrógeno total de 0.25 y con una disponibilidad de P de 206 ppm en 100 g de suelo fomentan una mayor producción de UFC g^{-1} de suelo de los hongos (Tablas 2 y 5).

La menor disponibilidad del P en los suelos de AAA y ACD (28 y 24.5 ppm) aunado a una bajísima salinidad (menor de 1 dS m^{-1}), posiblemente, propician que las relaciones hongos-bacterias sea de 0.099 y 0.149, respectivamente (Tablas 2 y 5). Otro elemento que puede contribuir a esta relación es la gestión de suelo, que no es intensiva. En el primer agroecosistema, en las hortalizas bajo sombráculo, el manejo del suelo integra mantillo de bosques y cobertura con pastos; en el segundo agroecosistema el policultivo de hortalizas se estableció en un suelo de desmonte con manejo natural (Tabla 1). Esta información posibilita concluir que los procesos de fijación biológica del N_2 , de nitrificación y de la descomposición y mineralización de la materia orgánica, y la solubilización de elementos nutritivos para la biodiversidad productiva vegetal y auxiliar, en los AAA y ACD, sean más equilibrados y pueden contribuir a una nutrición natural más balanceada.

En los cuatro agroecosistemas, las poblaciones pertenecientes a microorganismos diazotófos, oxidante de NH_4^+ y NO_2^- , solubilizadores de P, hongos celulolíticos y hongos totales, son multifuncionales porque contribuyen a la biofertilización natural, a la bioestimulación natural, al control biológico natural y a la biorremediación natural del suelo, que fomentan que estos suelos sean supresivos, equilibrados y con capacidad de regular plagas y patógenos edáficos (Calvo, 2021; Rossi, 2016). La condición de suelos supresivos se puede alcanzar con mayor facilidad en los AAA y ACD porque la relación hongos-bacterias es más equilibrada. Para tal finalidad, en los cuatro agroecosistemas, es *sine qua non* implementar tecnologías, prácticas y sistemas de gestión de la biodiversidad productiva y auxiliar, que fomenten las funcionalidades positivas de la biodiversidad asociada. Para lo cual, se deben considerar los valores, criterios y juicios de referencia de esta línea de base para el monitoreo de la calidad o salud de los suelos de estos agroecosistemas y se expongan las bondades del paradigma de la agroecología a las comunidades del municipio Villa Dos Trece, de Pirané Sur, de Formosa, de Argentina y a la sociedad en general.

En la literatura se reporta que estos grupos funcionales, además de contribuir a la biofertilización natural mediante su capacidad de fijar el N_2 de la atmosfera, oxidar el NH_4^+ y el NO_2^- , de solubilizar fosfatos tricálcicos (Clavijo *et al.*, 2012) y de producir enzimas celulolíticas, pueden sintetizar metabolitos o sustancias reguladoras del crecimiento (auxinas, giberelinas, citocininas, etileno y ácido abscísico), que fomentan la bioestimulación natural (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2014; Pedraza *et al.*, 2010); así como al biocontrol natural de plagas y patógenos edáficos (Clavijo *et al.*, 2012) a través de diferentes mecanismos de acción (Competencia por nutrientes y espacio, inducción de resistencia sistémica de la planta, producción de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas y compuestos volátiles y difusibles).

CONCLUSIONES

La reproducción de las bacterias diazotróficas, las bacterias oxidantes de NH_4^+ y NO_2^- y los microorganismos solubilizadores de fósforo es más sensible a los efectos de las condiciones edafoclimáticas y al manejo de prácticas realizadas por las familias campesinas en cada agroecosistema. Por lo tanto, estas condiciones pueden favorecer o desfavorecer la reproducción de los hongos o bacterias, influyendo en la relación hongo-bacteria. Por el contrario, las poblaciones de las bacterias oxidantes del anión NO_2^- son más estables, seguidas por las poblaciones de hongos celulolíticos.

Fueron cuantificadas UFC g^{-1} de suelo para los microorganismos diazotrófos, oxidante de NH_4^+ y NO_2^- , solubilizadores de P, hongos celulolíticos y hongos totales, cuyas poblaciones contribuyen a la biofertilización natural, la bioestimulación natural, al control biológico natural y a la biorremediación natural del suelo. Estas funciones facilitan el desarrollo de suelos supresivos, equilibrados y capaces de regular plagas y patógenos edáficos. Esta condición se consigue más fácilmente en AAG y CAD debido a la proporción más equilibrada entre hongos y bacterias.

En los cuatro agroecosistemas, es esencial implementar tecnologías, prácticas y sistemas de gestión que fomenten la biodiversidad productiva y auxiliar. Estas medidas deben promover las funcionalidades positivas de la biodiversidad asociada. Para lograrlo, se

deben tener en cuenta los valores, criterios y los juicios de referencia de esta línea de base para controlar la calidad o la salud del suelo.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a las familias campesinas de Miguel y Paulo Gauliski, Lola Céspedes y Taita Bubrosky, Delia Caballero y Enrique Kemper, Sixto Acuña (QEPD) y Rosa Bustos, por brindar sus conocimientos y marcar el camino para la construcción de territorios agroecológicos. Asimismo, queremos agradecer a la Ing. Agr. María Sol Gilardino por su colaboración en la elaboración de los mapas.

Copyright (©) 2024 Stella Maris Mangione, Dennis José Salazar Centeno, Nora Trejo, Liliana Rosa Galián.

REFERENCIAS

- AFANADOR-BARAJAS, Laura N. *et al.* Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. **Colombia forestal**, v. 23, n. 1, p. 35-50, 2020. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- ALEF, Kassen; NANNIPIERI, Paolo (Eds.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995. 576 p.
- ANDRADE-OCHOA, Sergio; EROSA DE LA VEGA, Gilberto; NEVÁREZ-MOORILLÓN, Guadalupe V. Amonio-oxidasas bacterianas y arqueales involucradas en el ciclo del nitrógeno. **Terra Latinoamericana**, v. 33 n. 3, p. 233-245, 2015. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57341186005>. Acceso en: 13 dic. 2023
- ARSHAD, M.A.; COEN, G.M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 7, n. 1-2, p. 25-31, 1992. <https://doi.org/10.1017/S0889189300004410>
- BARIDÓN, Juan E. **Cambios físicos, químicos y microbiológicos en suelos subtropicales de la provincia de Formosa ante el proceso de agriculturización. Un aporte al conocimiento de la calidad del suelo y sus indicadores**. Tesis de doctorado. Doctorado de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, 2015. <https://doi.org/10.35537/10915/50830>
- BELTRÁN-PINEDA, Mayra E.; LIZARAZO-FORERO, Luz M. Grupos Funcionales de Microorganismos en suelos de páramo perturbados por incendios forestales. **Revista de Ciencias**, v. 17, n. 2, p. 121-136, 2013. <http://dx.doi.org/10.25100/rc.v17i2.490>
- BOBADILLA SUERO, Jeimy N. **Estudio preliminar de la microbiota en suelos agrícolas de Zamorano, Honduras**. Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2022.
- BURKART, Rodolfo *et al.* **Eco-regiones de la Argentina**. Administración de Parques Nacionales. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, 1999. 43 p. Disponible en: <http://repositorio.ub.edu.ar/handle/123456789/7567>. Acceso en: 14 dic. 2023
- CALVO ARAYA, José A. Suelos supresivos y su papel en el manejo de enfermedades. **Environment & Technology**, v. 2, n. 1, p. 48-63, 2021. <https://doi.org/10.56205/ret.2-1.3>
- CANTÚ, Mario P. *et al.* Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. **Revista Ciencias del Suelo**, v. 25, n. 2, p. 173-178, 2007. Disponible en:

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000200008. Acceso en: 14 dic. 2023

CLAVIJO, Claudia *et al.* Aislamiento, caracterización e identificación de bacterias diazotróficas de la rizósfera del cultivo de *Olea europea* "olivo" en Tacna Perú. **Ecología Aplicada**, v. 11, n. 2, p. 89-102, 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162012000200006. Acceso en: 14 dic. 2023

CREMONA, María V.; ENRÍQUEZ, Andrea S. Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. **Revista Presencia**, n. 73, p. 5-8. 2020. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

DE LUCA, Laura C.; SALAZAR-MARTÍNEZ, Ana E.; PÉREZ, Raúl A. La transición agroecológica desde el punto de vista del suelo: reflexiones desde la biología microbiana. In: ULLÉ, Jorge & DÍAZ, Beatriz M. (Eds.). **El suelo como reactor de los procesos de regulación funcional de los agroecosistemas**. San Pedro, Buenos Aires. Ediciones INTA, 2018. p. 131-144. ISBN: 978-987-521-948-9. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329681863_El_suelo_como_reactor_de_los_procesos_de_regulacion_funcional_de_los_agroecosistemas. Acceso en: 14 dic. 2023

DÖBEREINER, Johanna; DAY, Joanna M. Associative symbiosis in tropical grasses: characterization of microorganisms and dinitrogen fixing sites. In: **Proceedings of the 1st international symposium on nitrogen fixation**. Pullman: Washington State University Press, 1976. p. 518-538.

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Quantitative Indicators of Soil Quality: a minimum data set. **SSSA Special Publications, Methods for Assessing soil quality** n. 49, p. 25-37, 1997. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspepub49.c2>

ESTRADA-HERRERA, Isabel del Rayo *et al.* Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. **Agrociencia**, v. 51, n. 8, p. 813-831, 2017. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n8/1405-3195-agro-51-08-813.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

FAGGIOLI, Valeria; SYMANCZIK, Sarah. Servicios eco-sistémicos provistos por hongos formadores de micorrizas y efecto de las prácticas de manejo en cultivos de base agroecológica. In: ULLÉ, Jorge & DÍAZ, Beatriz M. (Eds.). **El suelo como reactor de los procesos de regulación funcional de los agroecosistemas**. San Pedro, Buenos Aires. Ediciones INTA, 2018. p. 87-106. ISBN: 978-987-521-948-9. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329681863_El_suelo_como_reactor_de_los_procesos_de_regulacion_funcional_de_los_agroecosistemas. Acceso en: 14 dic. 2023

FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC. **State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities, Report 2020**. Rome, FAO, 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/3/cb1928en/cb1928en.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

FAO. **Carta Mundial de los Suelos**. Roma: FAO, 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I4965S/i4965s.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

FERNÁNDEZ Romina *et al.* Evaluación de indicadores biológicos en suelos de la región semiárida pampeana central. **Ecología Austral**, v. 28, n. 1, p. 145-156, 2018. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.555>.

FRIONI, Lillian. **Microbiología: básica, ambiental y agrícola**. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, 2006. 463 p. ISBN: 9974-0-0290-7. Disponible en: https://www.academia.edu/36558773/Microbiolog%C3%ADa_B%C3%A1sica_ambiental_y_agr%C3%ADcola. Acceso en: 14 dic. 2023

GARCÍA, Yoansy; RAMÍREZ, Wendy; SÁNCHEZ, Sara. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. **Pastos y Forrajes**, v. 35, n. 2, p. 125-138, 2012. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v35n2/pyf01212.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

GAVIRIA-GIRALDO, Jennifer *et al.* Bacterias diazotróficas con actividad promotora del crecimiento vegetal en *Daucus Carota L.* **Ciencia y Agricultura**, v. 15, n. 1, p. 19-27, 2018. <http://dx.doi.org/10.19053/01228420.v15.n1.2018.7753>

GRUPO OPERATIVO LEÑOSOST (Eds.). **¿Cómo evaluar la calidad de tu suelo? Evaluación visual del suelo en olivar.** [Madrid: Grupo Operativo Leñosost]. 2020. 36 p. Disponible en: https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/guia_como_evaluar_la_calidad_de_tu_suelo.pdf. Acceso en: 25 dic. 2023

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Annia *et al.* Potencialidades de las bacterias diazotróficas asociativas en la promoción del crecimiento vegetal y el control de *Pyricularia oryzae* (Sacc.) en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). **Revista de Protección Vegetal**, v. 29, n. 1, 1-10, 2014. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v29n1/rpv01114.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

INIAP [Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias]. **Métodos de campo.** Curso Eco-suelo: Los secretos de la vida del suelo y su manejo para una agricultura más sostenible, Cuba, 2002. 43 p. Disponible en: <https://www.fao.org/3/bl060s/bl060s.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

INNOVATIONE AGROFOOD DESIGN. **Microorganismos y nutrientes**, [snt]. 2019. Disponible en: <https://innovatione.eu/2019/11/26/microorganismos-del-suelo-2/>. Acceso en: 14 dic. 2023

JÜRGEN-POHLAN, Hermann A.; SALAZAR-CENTENO, Dennis J.; TORRICO-ALBINO, Juan C. (Eds.). **Manual para el cacaocultor de cacao fino y de aroma u ordinario: diagnóstico, monitoreo y auditoría de Buenas Prácticas Agropecuarias (BPA) y de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) mediante la Metodología del Sistema de Semáforo (SdS).** Shaker Verlag, 2020. 256 p. ISBN: 978-3-8440-7245-5. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/340827658_MANUAL_PARA_EL_CACAOCULTOR_DE_CACAO_FINO_Y_DE_AROMA_U_ORDINARIO_Diagnostico_monitoreo_y_auditoria_de_Buenas_Practicas_Agricolas_BPA_y_de_Buenas_Practicas_de_Manufactura_BPM_mediante_la_Metodologia_del_Sistema_de_Semaforo. Acceso en: 16 dic. 2023

KARLEN, Douglas L. *et al.* Soil Quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

KIBBLEWHITE, Mark G.; RITZ, Karl; SWIFT, Micke J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, n. 1492, p. 685-701, 2007. <http://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>

LÓPEZ MONTENEGRO, Gerardo J. **Macrofauna y microbiología edáfica: relación con servicios ecosistémicos y parámetros físicos y químicos del suelo en dos agroecosistemas con café, San Ramón, Matagalpa.** 2022. Tesis de maestría. Maestría de la Universidad Nacional Agraria, Nicaragua. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/4637/1/tnp34l864.pdf>. Acceso en: 14 dic. 2023

MANGIONE, Stella M.; SALAZAR-CENTENO, Dennis J. Propuesta metodológica para la valoración participativa de la percepción de las familias agricultoras de los servicios ecosistémicos generados en agroecosistemas. **Revista Científica La Calera**, v. 21, n. 37, p. 67-80, 2021. <https://doi.org/10.5377/calera.v21i37.12090>

MANTILLA, Lara C.; ESQUIVEL-ÁVILA, Lina; NEGRETE-PEÑA, Jorge. Bacterias nativas solubilizadoras de fosfato para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. **Biociencia en el sector agropecuario y agroindustrial**, v. 9, n. 2, p. 114-120, 2011. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biociencia/article/view/789>. Acceso en: 14 dic. 2023

MARROQUÍN-AGREDA, Francisco J. *et al.* **Manual para el productor de palma de aceite en México: Gestión de las buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas de poscosecha (BPP) en agroecosistemas con palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) a través de la metodología del sistema de semáforo.** Shaker Verlag, Alemania, 2023. ISBN: 978-3-8440-9269-1

MENDOZA-CORRALES, Reynaldo B.; ESPINOZA, Ariel. **Guía Muestreo de Suelos.** Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services, Managua, Nicaragua, 2017. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>. Acceso en: 4 May. 2024

MORA-DELGADO, Jairo; SILVA-PARRA, Amanda; ESCOBAR-ESCOBAR, Natalia. **Bioindicadores en suelo y abonos orgánicos.** Ibagué: Sello Editorial Universidad del Tolima, 2019. 120 p. ISBN 9789585569348. Disponible en: <https://repository.ut.edu.co/handle/001/3022>. Acceso en: 14 dic. 2023

MOREIRA, Fátima M. de S. HUISING Jeroen E.; BIGNELL David E. (Eds.). **Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo.** Instituto Nacional de Ecología, México, 2012. 350 p. ISBN: 978-1-84407-621-5

NAUTIYAL, Chandra S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiol Lett.** v. 170, n. 1, p. 265-270. 1999. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x.

ORTIZ-SILLA, Roque. Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. **Revista Eubacteria**, n. 34, p. 51-64, 2015. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10201/48175>. Acceso en: 16 dic. 2023

OVANDO-CHACÓN, Sandy L.; WALISZEWSKI, Krzysztof N. Preparativos de celulasas comerciales y aplicaciones en procesos extractivos. **Universidad y Ciencia**, v. 21, n. 42, p. 111-120, 2005. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/154/15404206.pdf>. Acceso en: 26 dic. 2023

PEDRAZA, Raúl O. *et al.* Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. **Corpoica, Ciencia & Tecnología Agropecuaria**, v. 11, n. 2, p. 155-164, 2010. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029007>. Acceso en: 15 dic. 2023

PÉREZ-PÉREZ, René *et al.* Characterization of potassium solubilizing bacteria isolated from corn rhizoplane. **Agronomía Colombiana**, v. 39, n. 3, p. 415-425, 2021. Universidad Nacional de Colombia. <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n3.98522>

RAMOS-SALAZAR, Raúl A. *et al.* Efecto de rizobacterias solubilizadoras de calcio en caracteres agronómicos y minerales de *Tagetes erecta*. **Biotechnia**, v. 24, n. 2, p. 149-154, 2022. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v24i2.1621>

ROCKSTRÖM, Johan *et al.* Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, 32, 2009. Disponible en: <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>. Acceso en: 15 dic. 2023

ROSSI, María S. **Suelos supresivos: capacidad biopesticida contra *Phytophthora palmivora* en *Olea europea* L.** 2016. Tesis doctoral. Doctorado de la Facultad de Ciencias, Universidade da Coruña, España. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2183/17250>. Acceso en: 15 dic. 2023

SALAZAR-CENTENO, Dennis J. *et al.* **Agroecología y servicios ecosistémicos: aportes de la investigación interdisciplinaria.** Universidad Nacional Agraria, 2021. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/4333/1/REN36U58ag.pdf>. Acceso en: 15 dic. 2023

SALAZAR-CENTENO, Dennis J.; JÜRGEN-POHLAN, Hermann A.; MARROQUÍN-AGREDA, Francisco J. Reflexiones sobre interacciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Agenda 2030, los límites planetarios y las buenas prácticas agrícolas en agroecosistemas con palma de aceite (Capítulo V). In: MARROQUÍN-AGREDA, Francisco J. *et al.* (Eds.). **Manual para el productor de palma de aceite en México: Gestión de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Poscosecha (BPP) en agroecosistemas con palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) a través de la metodología del sistema de semáforo.** Shaker Verlag, Alemania, 2023. ISBN: 978-3-8440-9269-1

SÁNCHEZ DE PRAGUER, María *et al.* El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. **Agroecología**, v. 7, n. 1, p. 19-34, 2012. Disponible en: <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/170971>. Acceso en: 15 dic. 2023

SÁNCHEZ DE PRAGER, María *et al.* **Las Endomicorrizas: expresión bioedáfica de importancia en el trópico.** Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2007. 352 p. ISBN 978-958-44-0523-4. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59348>. Acceso en: 15 dic. 2023

SCHALLER, Diana V. **Estructura agraria y agricultura familiar en el Departamento Pirané Sur, Formosa. Conformación y transformaciones.** INTA Ediciones, 2013. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12123/1610>. Acceso en: 15 dic. 2023

SCHULZ, Guillermo; RODRÍGUEZ, Darío; MORETTI, Lucas (Eds.). **Carta de suelos de la República Argentina, Provincia de Formosa Departamento Pirané, Sector Sur.** INTA Ediciones, 2017. 181 p. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/317612622_Carta_de_Suelos_de_la_Republica_Argentina_-_Dpto_Pirane_-_Sector_Sur_-_Provincia_de_Formosa_-_Argentina. Acceso en: 15 dic. 2023

TREJO, Nora *et al.* Evaluación analítica de agroecosistemas en transición agroecológica del periurbano bonaerense. **Revista de Divulgación Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 28-40, 2020. Disponible en: <https://revistafcaunlz.gramaweb.com.ar/volumen-7-3-septiembre-2020>. Acceso en: 15 dic. 2023

TURRINI, Alessandra; SBRANA, Cristiana; GIOVANNETTI, Manuela. Belowground environmental effects of transgenic crops: a soil microbial perspective. **Research In Microbiology**, v. 166, n. 3, p. 121-131, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resmic.2015.02.006>.

VIDELA, Cecilia; PICONE, Liliana. Indicadores biológicos de calidad de suelo. In: WILSON, Marcelo G. *et al.* **Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina**. INTA Ediciones, 2017, p. 83-87. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322231691_Manual_de_Indicadores_de_Calidad_del_Suelo_para_las_ecorregiones_de_Argentina. Acceso en: 15 dic. 2023

YIN, Robert K. **Case study research: design and methods**. Thousands Oaks: Sage Publications. 2003.

ZOU, Xiaoming; BINKLEY, Dan; CALDWELL, Bruce A. Effects of dinitrogen fixing trees on phosphorus biogeochemical cycling in contrasting forests. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 5, p. 1452-1458, 1995. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900050035x>