



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN RECURSOS NATURALES

**“Uso de indicadores edáficos para el
diagnóstico de un suelo con reciente manejo
agroecológico extensivo en un área periurbana
de la provincia de Santa Fe”**

Alumna: Montiel, Agustina

Directora: Ing. Agr. (Esp.) Bortolato, Marta

Co-Directora: Ing. Agr. Benedetto, María Victoria

**Lugar de trabajo: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad
Nacional de Rosario**

Año: 2020

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	1
DEDICATORIA.....	1
PRESENTACIONES A CONGRESOS.....	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ABREVIATURAS.....	5
INTRODUCCIÓN	6
LA PROBLEMÁTICA DEL PERIURBANO	6
LA AGROECOLOGÍA: POTENCIAL HERRAMIENTA PARA LA PRODUCCIÓN EN PERIURBANOS ...	7
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO POR MEDIO DE INDICADORES EDÁFICOS	11
HIPÓTESIS	16
PREDICCIONES	16
OBJETIVOS	16
General	16
Específicos	16
MATERIALES Y MÉTODOS	18
DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	18
PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS GENERALES DESARROLLADAS EN EL MÓDULO AGROECOLÓGICO	24
DESCRIPCIÓN DE PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS LLEVADAS A CABO	26
REGISTRO PASTOREOS	29
MUESTREO DEL SUELO.....	30
DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES MICROBIOLÓGICOS	32
DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES FÍSICOS Y QUÍMICOS	34
ANÁLISIS DE LOS DATOS	35
RESULTADOS	36

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS	36
ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	43
ANÁLISIS DE CLUSTER	48
CORRELACIÓN DE PEARSON	53
DISCUSIÓN	56
CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica del Módulo Agroecológico.....	19
Figura 2: Diagrama del Módulo Agroecológico y sitios de referencia.....	21
Figura 3: Registro climático (2019).....	32
Figura 4: Gráficos combinados de líneas y puntos para las variables microbiológicas en ambos muestreos.....	41
Figura 5: Gráficos combinados de líneas y puntos para las variables físicas y químicas en el muestreo de mayo.....	43
Figura 6: Biplot de Análisis de Componentes Principales correspondiente al muestreo de mayo.....	45
Figura 7: Biplot de Análisis de Componentes Principales correspondiente al muestreo de noviembre.....	47
Figura 8: Dendograma correspondiente al muestreo de mayo.....	50
Figura 9: Dendograma correspondiente al muestreo de noviembre.....	51
Figura 10: Dendograma correspondiente a ambos muestreos.....	52
Figura 11: Correlación de Pearson.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización de los sitios seleccionados, descripción de las campañas	21
Tabla 2: Ocupación mensual de los sitios con manejo agroecológico para 2019	27
Tabla 3: Registro de pastoreos.	30
Tabla 4: Valores medios de las determinaciones microbiológicas correspondientes al muestreo de mayo	37
Tabla 5: Valores medios de las determinaciones microbiológicas correspondientes al muestreo de noviembre	37
Tabla 6: Valores medios de las determinaciones físicas y químicas correspondientes al muestreo de mayo	42
Tabla 7: Valores de los autovectores de cada variable en las componentes principales	45
Tabla 8: Valores de los autovectores de cada variable en las componentes principales	47

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis directores, Marta Bortolato y Victoria Benedetto por guiarme y brindar su tiempo durante el desarrollo de tesina con sus aportes de conocimientos y asesoría constante.

A las evaluadoras de esta tesina, que por medio de sus sugerencias se mejoró la calidad de este trabajo.

A mi amiga, Maribel Vallasciani por su predisposición y dedicación compartida, y a Silvia Toresani por asesorarme y acompañarme con su capacidad académica.

A todos los miembros de la cátedra de Microbiología por compartir estos últimos años desempeñándome como Ayudante de Cátedra, que me permitieron crecer como futura profesional. Especialmente a María Eugenia Schiavon, por ayudarme con las determinaciones microbiológicas.

A la cátedra de Edafología por colaborar en las determinaciones técnicas de laboratorio.

A mis padres, por darme la libertad de elección de esta maravillosa carrera, por haberme acompañado durante estos años y su apoyo constante. A mi hermano, por estar siempre presente y sus palabras de aliento.

A mis facu-amigos y amiga de toda la vida, gracias por ser parte de este gran camino. Me llevo hermosos recuerdos compartidos y grandes amistades.

A mi pareja, Mariano por su gran compañerismo.

Al INTA Oliveros por darme el lugar de poder realizar mi tesina y por facilitarme toda información que necesite.

Y agradecer a la Facultad de Ciencias Agrarias, a todo su equipo docente y no docente por brindar su educación pública de gran prestigio.

DEDICATORIA

A mi abuelo, que extraño con el alma y deseaba tanto poder verme con este título.

PRESENTACIONES A CONGRESOS

- **“Uso de indicadores edáficos para el diagnóstico de un suelo con manejo agroecológico en un área periurbana”**. Autores: Montiel A, Vallasciani M, Bortolato MA, Schiavon ME, Benedetto MV, Gamundi JC, Ferreras L, Saperdi A, Toresani S. XXII Congreso y XL Reunión anual de la Sociedad de Biología de Rosario, “Zoonosis y Enfermedades Emergentes”. Llevado a cabo los días 24 y 25 de noviembre de 2020 por plataforma online.
- **“Evaluación Comparativa de Parámetros Microbiológicos De Suelo En Sistemas de Producción Agroecológica vs. Agricultura Convencional”**. Autores: Benedetto MV, Montiel A, Vallasciani M, Bortolato MA, Schiavon ME, Gamundi JC, Ferreras L, Saperdi A, Toresani S. VIII Congreso Latinoamericano de Agroecología 2020, Identidad latinoamericana tejiendo el territorio: transformaciones urgentes para la vida. Llevado a cabo los días 25, 26 y 27 de noviembre por plataforma online.

RESUMEN

El periurbano, considerado una zona de transición entre lo urbano y lo rural, confronta diferentes intereses siendo la regulación de uso de fitosanitarios, uno de trascendental importancia. Dada las pautas de uso impuestas por la Ordenanza Municipal N° 1003/11 en Oliveros y en búsqueda de modelos productivos alternativos, la EEA INTA Oliveros implementó en 2015 un Módulo Agroecológico descriptivo, observacional y mensurativo de sistema mixto agrícola-ganadero y libre de aplicaciones de agroquímicos, donde se llevó a cabo este estudio. La agroecología promueve beneficios ecosistémicos, entre ellos, la mejora de la calidad del suelo aunque, actualmente, esta afirmación es carente de evidencias científicas para la región. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como indicadores, permiten detectar cambios que se generan en el sistema como consecuencia del manejo. El objetivo de este trabajo fue evaluar mediante indicadores edáficos la mejora de la calidad del suelo, en diferentes sitios dentro del Módulo Agroecológico y en comparación con situaciones contrastantes de referencia: suelo cuasi prístino (Parque) y sitio disturbado con agricultura convencional. Se tomaron muestras compuestas en mayo y noviembre de 2019. Los análisis estadísticos mostraron que los indicadores biológicos respondieron sensiblemente a las diferentes prácticas de manejo, en comparación con los físicos y químicos, considerándolos como indicadores de señal temprana y potenciales para estimar la calidad del suelo. La alta correlación observada entre enzimas específicas y COT nos permite anticipar la mejora en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo manejos agroecológicos. Principios y estrategias adoptados en las prácticas agroecológicas aumentan los niveles de materia orgánica, mejoran la estabilidad estructural y potencian la actividad biológica respecto a la agricultura convencional. La incorporación de la ganadería en agroecología fomenta sistemas agroalimentarios sustentables, resultando los sitios bajo manejo agroecológico estudiados una alternativa viable de producción en periurbanos.

Palabras claves: agroecología, calidad del suelo, indicadores edáficos, periurbano.

ABSTRACT

The peri-urban, considered a transition zone between urban and rural, confronts different interests, being the regulation of the use of phytosanitary products, one of transcendental importance. Given the guidelines of use imposed by Municipal Ordinance No. 1003/11 in Oliveros and in search of alternative production models, the EEA INTA Oliveros implemented in 2015 a descriptive, observational and measurable Agroecological Module of a mixed agricultural-livestock system and free of applications agrochemicals, where this study was carried out. Agroecology promotes ecosystem benefits, including the improvement of soil quality, although, currently, this statement is lacking in scientific evidence for the region. The physical, chemical and biological properties of the soil as indicators, allow to detect changes that are generated in the system as a consequence of management. The objective of this work was to evaluate the improvement of soil quality through edaphic indicators, in different sites within the Agroecological Module and in comparison with contrasting reference situations: quasi-pristine soil (Park) and a disturbed site with conventional agriculture. Composite samples were taken in May and 2019. Statistical analyzes show that biological indicators respond sensibly to different management practices, compared to physical and chemical ones, considering them as early signal and potential indicators to estimate soil quality. The high correlation observed between specific enzymes and TOC allows us to anticipate the improvement of the organic carbon content of the soil under agroecological management. Principles and strategies adopted in agroecological practices provided levels of organic matter, improve structural stability and enhance biological activity compared to conventional agriculture. The incorporation of livestock in agroecology fosters sustainable agri-food systems, resulting in the studied sites under agroecological management a viable production alternative in peri-urban areas.

Keywords: agroecology, soil quality, edaphic indicators, peri-urban.

ABREVIATURAS

ACP: Análisis de Componentes Principales

Agr.E: Agregados Estables

ANOVA: Análisis de la Varianza

Asasa: Arilsulfatasa

Bgasa: Beta-glucosidasa

CBM: Carbono de la Biomasa Microbiana

CC: Cultivo de cobertura

COT: Carbono Orgánico Total

Est.R: Estabilidad Relativa

FDA: Diacetato de Fluoresceína

Ffsa: Fosfatasa

Flu: Fluoresceína

MO: Materia Orgánica

PN: Paranitrofenol

PU: Periurbano

INTRODUCCIÓN

La problemática del periurbano

El estudio del periurbano (PU) requiere un abordaje complejo que involucra dos sitios geográficos diferenciados, el urbano y el rural. Su delimitación se torna difícil ya que desde el punto de vista ecológico se lo considera como una zona de transición, es decir, un ecotono entre campo y ciudad. Por lo tanto, el periurbano es un sistema en mosaico con relictos del ecosistema natural, en el cual coexisten sistemas productivos y asentamientos urbanos (Barsky, 2005).

En el marco de este ecotono, confrontan diferentes intereses respecto a los usos de suelo y agua, la contaminación ambiental, la carencia de infraestructura, el deterioro del hábitat, entre otros. Se generan conflictos socio-ambientales y económicos, los cuales fuerzan a los municipios a implementar nuevos marcos normativos que den a conocer un ordenamiento territorial adecuado (Tittonell y Giobellina, 2018).

Particularmente, el uso inadecuado y escasamente regulado de productos fitosanitarios de síntesis química para la producción agrícola en estas áreas de transición, generó fuertes controversias entre los diferentes actores sociales allí presentes. Algunas provincias con trayectos históricos de producción agropecuaria dictaron sus propias normativas referidas a la aplicación de estos productos. En la legislación de la provincia de Santa Fe, la Ley de Productos Fitosanitarios N° 11273 de 1995 reglamentada por el Decreto N° 0552/97 y reforzada por ordenanzas municipales y/o comunales, prevé la delimitación de zonas buffer o amortiguadoras, en las cuales la aplicación de agroquímicos es regulada, limitada o prohibida (Cid, 2013; Benedetto *et al.*, 2017). La ubicación y naturaleza de la zona a resguardar, su vulnerabilidad, la cercanía de la zona urbana y cuerpos de agua, como así también la toxicidad de los productos a aplicar define la dimensión de la franja de seguridad (Bonel *et al.*, 2013).

La Ley Provincial en su Artículo 33° expresa que “se prohíbe la aplicación aérea de productos fitosanitarios de clase toxicológica A y B dentro del radio de 3000 metros de las plantas urbanas. Excepcionalmente podrán aplicarse productos de clase toxicológica C o D dentro del radio de 500 metros, cuando en la jurisdicción exista ordenanza municipal o comunal que lo autorice y en los casos que taxativamente establecerá la reglamentación de la presente. Idéntica excepción y con iguales requisitos podrán establecerse con los productos de clase toxicológica B para ser

aplicados en el sector comprendido entre los 500 y 3000 metros. El Artículo 34°, por su parte, prohíbe la aplicación terrestre de los productos fitosanitarios A y B dentro de los 500 metros de las plantas urbanas, mientras que permite la aplicación de productos de clase toxicológica C y D dentro del radio de esos 500 metros conforme a reglamentación.

El Decreto Reglamentario N° 0552/97 expresa que las comunas o municipios deberán incluir en sus ordenanzas reglamentarias las excepciones previstas en los Artículos 33° y 34° de la Ley Provincial y la delimitación de las plantas urbanas a los efectos de precisar las distancias establecidas en los artículos nombrados anteriormente. Por ende, la comuna de Oliveros (Santa Fe, Argentina) adhirió a la Ley Provincial de Productos Fitosanitarios por medio de la Ordenanza Municipal N° 1003/11. La misma establece una Zona Restringida con un ancho de 500 metros, en torno a la Zona Protegida o Urbana, en la cual es posible la aplicación terrestre de productos agroquímicos y a partir de los 500 metros se podrán realizar aplicaciones aéreas, según las pautas establecidas por la Ley Provincial y Ordenanza Municipal. A su vez, el Artículo 7° de dicha Ordenanza, prohíbe el uso de fitosanitarios tóxicos y muy tóxicos (color de banda roja clase 1a y 1b) en todo el distrito Oliveros. La zona restringida establecida en la Ordenanza Municipal genera una fase urbano-rural donde los productores presentes son forzados a repensar la forma de producir, buscando alternativas que le permitan el desarrollo de una actividad productiva rentable bajo una modalidad sustentable y limitando al máximo el uso de productos de síntesis química, de lo contrario estas tierras se verían destinadas a loteo y/o abandono.

Como se mencionó previamente, la práctica agroecológica se presenta como una solución factible al desafío del uso de las tierras en los PU atendiendo a los diferentes intereses respecto a los usos de suelo y agua, la contaminación ambiental, la salud humana, entre otros, que generan conflictos socio-ambientales y económicos.

La agroecología: potencial herramienta para la producción en periurbanos

La agroecología como nueva disciplina, incorpora principios ecológicos para la proyección de sistemas agrícolas sustentables, utilizando como unidad básica de estudio el ecosistema. Se aplican conocimientos de diferentes disciplinas, que permiten generar estrategias apropiadas para el diseño, manejo y evaluación de agroecosistemas (Altieri, 2010; Sarandón y Flores, 2014b).

Sicard y Altieri (2010) exponen que *“Un agroecosistema puede entenderse como el conjunto de interacciones que suceden entre el suelo, las plantas cultivadas, los organismos de distintos niveles tróficos, y las plantas adventicias en determinados espacios geográficos, cuando son enfocadas desde el punto de vista de los flujos energéticos y de información, de los ciclos materiales y de sus relaciones sociales, económicas y políticas, que se expresan en distintas formas tecnológicas de manejo dentro de contextos culturales específicos”*. Deben interpretarse como ecosistemas complejos, los cuales generan externalidades que implican costos ambientales y económicos como consecuencia de las prácticas agrícolas implementadas (Sarandón y Flores, 2014b).

Sarandón (2010) define a la agroecología como *“un nuevo paradigma productivo que se basa en un abordaje holístico y sistémico de la producción agropecuaria, considerando las dimensiones ecológica, productiva, económica y social, desde una óptica interdisciplinaria, reconociendo a la ética como valor central para el logro de la sustentabilidad”*.

Respecto a esta definición de agroecología, en la dimensión económica se pretende cubrir las necesidades económicas del productor y su familia, disminuyendo los riesgos de dependencia del mercado. La dimensión cultural busca la conexión con los valores y saberes locales de las poblaciones rurales, que junto a la componente social intentan lograr una distribución más equitativa en la sociedad actual, pero sin que esto comprometa el sustento de las generaciones futuras. Además se incorpora la idea de producción de alimentos sanos, vinculados a la seguridad y la soberanía alimentaria. La dimensión ética explora la creación de un nuevo vínculo moral que integre los valores de respeto y preservación del medio ambiente. Desde la óptica ecológica, la agroecología se basa en la conservación y rehabilitación de los recursos naturales por medio del enfoque sistémico (Sarandón y Flores, 2014b).

La agroecología provee las bases necesarias para lograr la conservación de la biodiversidad en la agricultura, la cual es trascendental en un agroecosistema, ya que brinda procesos de renovación y servicios ecológicos (Altieri y Nicholls, 2000). Los beneficios aparejados al incremento de la biodiversidad en agroecosistemas son los de mayor diversidad de biota asociada, mejor polinización, control de plagas-enfermedades-malezas, mejor reciclaje de nutrientes y captación de energía, mayor productividad total, entre otros (Paleologos y Sarandón, 2014).

En párrafos anteriores se expuso que la agroecología ofrece herramientas que permiten lograr sistemas agrícolas sustentables. Sarandón y Flores (2014b), definen a una agricultura sustentable como *“aquella que mantiene en el tiempo un flujo de bienes y servicios que satisfagan las necesidades alimenticias, socioeconómicas y culturales de la población, dentro de los límites biofísicos que establece el correcto funcionamiento de los sistemas naturales que lo soportan”*. Cada uno de estos sistemas agrícolas sustentables presenta características intrínsecas propias que determinan su capacidad productiva, la cual se relaciona con el concepto de ‘capacidad de carga’ propuesto en ecología. Es decir, si se sobrepasan los límites existentes en los sistemas naturales estos dejan de ser sostenibles y se deterioran los recursos naturales. Estos sistemas agrícolas deben mantener cierta flexibilidad que permita la adaptación a los cambios que se puedan producir desde el aspecto ambiental y socioeconómico (Altieri y Nicholls, 2000).

En contraste con todo lo antedicho, se debe destacar que en la actualidad los sistemas productivos aún adoptan masivamente los modelos impuestos por la ‘Revolución Verde’ de 1960. Este hecho histórico implicó un cambio de paradigma, el cual se basó en la utilización de pocas variedades con alto potencial de rendimiento. Para poder expresar este potencial se requieren ciertas condiciones, es decir, un ambiente adecuado que implica la implementación de fertilizantes, plaguicidas, maquinarias, combustible, riego, entre otros (Sarandón y Flores, 2014a). En Argentina, este movimiento se destacó entre las décadas del ‘80 y ‘90 como ‘agriculturización’ a causa de la expansión del cultivo de soja RR, asociada a la siembra directa y al uso del herbicida glifosato. Incluyó un cambio de uso de la tierra agrícola con el fin de aumentar la producción de cultivos destinados a la exportación (Do-Carmo y Alvarez, 2009). Este movimiento permitió el incremento de los rindes agrícolas y la disminución en los costos alimentarios, pero a la par se generaron efectos adversos en el ambiente y la salud humana (Pazos-Rojas *et al.*, 2016).

Si comparamos el modelo productivo planteado por la agroecología con el de la Revolución Verde, observamos que esta última intenta modificar la naturaleza para demostrar el potencial de rendimiento de variedades mejoradas. En cambio, la agroecología propone un sistema que pueda copiar la estructura y función de los ecosistemas, buscando seguir como modelo las sucesiones naturales del lugar que optimizan la eficiencia biológica, resguardando la biodiversidad, manteniendo la productividad y conservando la capacidad de automantenimiento (Flores y Sarandón,

2014a). Las técnicas asociadas al modelo de Revolución Verde sólo superan a las que definen a los sistemas agroecológicos bajo condiciones biofísicas y socioeconómicas óptimas, que no siempre se presentan en todos los ambientes productivos (Altieri, 2010).

En cuanto a los sistemas agrícolas argentinos, Cerdá (2020), valiéndose de información oficial publicada por el Ministerio de Agricultura de la Nación, presentó cómo fue la evolución del porcentaje de superficie sembrada de los principales cultivos en Argentina desde la década del '70 hasta la actualidad. Se evidenció una notable simplificación de los sistemas de producción. Al comienzo de la serie analizada existía una alta diversificación de cultivos. Contrariamente, en la actualidad, esto se redujo a destinar un 45% de las tierras productivas al cultivo de soja (*Glycine max* L. Merr), siguiéndole el maíz (*Zea mays* L.) en un 24% y trigo (*Triticum aestivum* L.) en un 15%. Es decir, un 84% de las tierras productivas de Argentina se destinan sólo a tres cultivos.

Cerdá y Sarandón (2015) definen como Agricultura Convencional a los modelos productivos actuales, los cuales engloban una alta productividad de cultivos transgénicos con poca diversidad de cultivos en el esquema de rotaciones (generalmente predominio de trigo, soja) o monocultivos, rastrojos pobres en cantidad y calidad, barbechos químicos con suspensión total de la vegetación espontánea en lotes de producción, alto uso de herbicidas, insecticidas y fungicidas, gran exportación de elementos químicos del suelo.

Para poder abordar el proceso de transición de sistemas productivos actuales a sistemas diversificados, como los que propone la agroecología, es necesario comprender cómo funcionan los agroecosistemas. Su abordaje holístico da lugar a la comprensión de su complejidad, siendo importante poder descubrir cuáles son sus límites, componentes e interacciones. No existe un único modo de diseño de esquema productivo sustentable, por lo cual, para cada lugar donde se aspire implementar este proceso de transición se deberán encontrar las mejores alternativas posibles según las condiciones particulares del sitio (Marasas *et al.*, 2014).

Dada la complejidad existente para el análisis holístico de los sistemas agroecológicos, en este trabajo sólo se abordará uno de los componentes del sistema: el suelo.

Evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores edáficos

El suelo es un recurso natural no renovable, dinámico, limitado y vital para el desarrollo del ser humano, la base de los sistemas agrícolas y el sustento de los ecosistemas. En él se desenvuelven numerosas funciones que permiten mantener la calidad ambiental, preservar la biodiversidad, regular el ciclo hidrológico, proporcionar el ciclado de la materia y flujo de la energía (Rincón y Muñoz, 2005).

Es uno de los componentes más complejos e importantes de los sistemas productivos en el cual se integran materia orgánica, minerales, agua y los organismos vivos (Abbona y Sarandón, 2014). Desde la perspectiva agroecológica, y al igual que en otras disciplinas, se considera como un sistema viviente. Cada suelo presenta una organización característica dada por las propiedades físicas, químicas y biológicas y sus propiedades emergentes, que en conjunto alcanzan la homeostasis del suelo (De *et al.*, 2012).

En los sistemas productivos debe considerarse también un componente externo de índole antrópico, que modifica la calidad de los suelos por medio de prácticas y uso de tierras. Ejemplo de esta incidencia es que se estima que cerca de un cuarto de las tierras destinadas a la producción presenta algún grado de erosión y/o degradación como consecuencia de la ejecución de prácticas agrícolas inadecuadas, deforestación, contaminación (Ferrerías *et al.*, 2015).

Según el Comité de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo, la calidad de un suelo se establece como la capacidad funcional de un tipo específico de suelo para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humana, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo (Acevedo *et al.*, 2005). La evaluación de la calidad del suelo resulta ser una manera eficaz para analizar la sustentabilidad en las prácticas de manejo agrícolas que impactan en el mismo (Segueda *et al.*, 2011).

Existen variables que permiten estudiar la condición del suelo, denominadas indicadores (Cruz *et al.*, 2004; Segueda *et al.*, 2011), siendo instrumentos de análisis que logran simplificar, cuantificar y comunicar una situación compleja de interés de una manera simple y comprensible (Cruz *et al.*, 2004; Cantú *et al.*, 2007). El objetivo principal del uso de indicadores es realizar el seguimiento de los efectos que producen las prácticas de manejo en un tiempo dado (García *et al.*, 2012).

Existe una gran cantidad de indicadores, por lo cual, es necesario indagar en aquellos asociados a propiedades físicas, químicas y biológicas que sean sensibles y permitan detectar de manera temprana y eficaz los cambios que se puedan producir en el sistema. Si bien los parámetros físicos y químicos son utilizados como indicadores de calidad del suelo, presentan el inconveniente que la detección frente a los disturbios se manifiesta en el mediano o largo plazo. Diferentes autores, consideran que los parámetros biológicos son los más adecuados para determinar cambios en la calidad del suelo, ya que al estar relacionados con los ciclos biogeoquímicos de los elementos y con la transformación de la materia orgánica tienden a responder más rápido a los cambios del medio y por lo tanto son considerados sensores tempranos (Toresani *et al.*, 2013).

Debido a la heterogeneidad presente en la composición química, física y biológica del suelo, se hace casi imposible poder determinar valores estándares de indicadores para todos los suelos. Los valores de referencia y límites de los indicadores de calidad no son universales, sino que varían según el clima, el manejo y el suelo. Además, la calidad del suelo no es totalmente estable, sino que puede variar según su uso y manejo de prácticas agrícolas (Segueda *et al.*, 2011; Pla, 2013). Según Albanesi *et al.* (2013), el nivel umbral de cada indicador puede ser logrado de diferentes maneras: de los ecosistemas no disturbados (cuando se comparan suelos de una región ecológica o de un mismo tipo de suelo), el uso de suelos de referencia (que mantienen un alto nivel de productividad), determinando los valores medios de estudios realizados con anterioridad o a partir de datos históricos de los mismos suelos a evaluar, entre otros.

Como se viene expresando, la calidad del suelo puede ser evaluada a través de las dimensiones física, química y biológica y, cada una de ellas involucra diferentes variables que son factibles de medir.

La calidad física del suelo está ligada al uso eficiente de agua y nutrientes por parte de las plantas para la producción agrícola. Se evalúa por medio de indicadores que representan las características físicas del suelo, tales como estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, capacidad de almacenamiento de agua, entre otros (García *et al.*, 2012).

Los agregados del suelo desempeñan un papel importante en la formación de la estructura y la salud del suelo. En la agricultura, la estabilidad de los agregados es

fundamental para el funcionamiento del agroecosistema, la cual está dada por la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos y es función de la materia orgánica que actúa como agente cementante (Alvarez *et al.*, 2008). Los espacios porosos en el suelo influyen en el almacenamiento de aire y agua, y en el intercambio gaseoso, crean hábitat para los microorganismos del suelo y permiten el desarrollo y la penetración de las raíces de las plantas, ayudan en el ciclo de nutrientes y el transporte. Los suelos que tienen una alta estabilidad de agregados son menos susceptibles a la erosión, mantienen su forma cuando están expuestos a fuerzas disruptivas, como el agua, y no se separan fácilmente. La falta de estabilidad puede llevar a que se colapsen estos agregados y en última instancia, dar lugar a la formación de costras de suelo, lo cual puede conducir a una reducción de la infiltración y el intercambio gaseoso (SoilsMatter, 2019).

La calidad química está dada por las condiciones que regulan las relaciones suelo-planta respecto a los nutrientes disponibles y a la capacidad amortiguadora del suelo. Indicadores como disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, entre otros, permiten medir la calidad química (García *et al.*, 2012). El pH es una característica importante debido a que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio catiónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. La aplicación de ciertos agroquímicos utilizados en modelos de producción convencionales puede modificar el pH del suelo (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

El carbono orgánico del suelo influye en las propiedades relacionadas con la calidad, sustentabilidad y capacidad productiva de los agroecosistemas, por lo cual para lograr un manejo sustentable se debe aspirar a mantener o aumentar este parámetro. El carbono orgánico se encuentra en el suelo en forma de residuos vegetales escasamente degradados o en forma de humus y es el principal elemento que forma parte de la materia orgánica del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

La materia orgánica se encuentra asociada a las propiedades físicas (densidad aparente, estructura), químicas (capacidad de intercambio catiónico, poder buffer) y biológicas (actividad biológica) (Morón, 2001). Está representada por los residuos de origen vegetal y/o animal en diferentes etapas de descomposición y la biota del suelo, encargada de la descomposición y ciclado de los residuos orgánicos. La materia

orgánica está conformada por una fracción lábil, que es la fuente de energía de los microorganismos y una fracción húmica más estable, conformada por ácidos fúlvicos, húmicos y huminas (Martínez *et al.*, 2008).

Varios autores afirman que la capacidad productiva del suelo está relacionada con el contenido de materia orgánica. No obstante, para poder detectar los cambios que se puedan producir en este indicador se requieren de 5 a 10 años de estudio. Motivo por el cual, como la mineralización de la materia orgánica es llevada a cabo por los microorganismos del suelo, estos pueden responder de manera más eficiente y temprana a los disturbios que se puedan generar (Di Ciocco *et al.*, 2014). De todos modos, no existe un único parámetro biológico que permita determinar cuál es el estado de calidad de un suelo ya que las propiedades de los suelos cambian naturalmente con el tiempo (Rincón y Muñoz, 2005).

Se considera que las propiedades biológicas relacionadas con el reciclaje de los nutrientes son las más eficientes para evaluar la calidad del suelo, ya que otorgan información del estado funcional del mismo. Las actividades enzimáticas, relacionadas con los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, representan un indicador sensible de la actividad microbiana, producto del metabolismo de los microorganismos (Ferrerías *et al.*, 2009). Las enzimas están presentes en el suelo por liberación, atribuida principalmente a los microorganismos (Rincón y Muñoz, 2005).

Dependiendo del tipo de enzimas seleccionadas, se puede evaluar la actividad enzimática global o la de grupos fisiológicos determinados asociados a los ciclos de los nutrientes. Se entiende por grupo fisiológico al conjunto de organismos que presentan la misma aptitud para efectuar reacciones de biosíntesis, taxonómicamente no siempre relacionados (Frioni, 1999). La determinación espectrofotométrica del Diacetato de Fluoresceína (FDA), permite evaluar la actividad enzimática global de hongos, bacterias y protistas, atribuida a la acción de un grupo de exoenzimas como lipasas, esterases y proteasas.

En el ciclo del carbono se llevan a cabo numerosas etapas relacionadas con procesos degradativos del carbono, de las cuales la celulolisis es una de las más estudiadas. La enzima beta-glucosidasa, perteneciente al grupo de las glicosidasas, interviene en el proceso final de degradación de la celulosa, donde descompone los derivados de bajo peso molecular acumulados en el suelo liberando al medio glucosa. Su actividad

normalmente está correlacionada con el contenido de carbono orgánico del suelo (Jiménez de Ridder y Bonmatí-Pony, 2003; Frioni, 2011)

En relación al ciclo del fósforo, las fosfomonoesterasas son un grupo de enzimas que incluyen las fosfatasas ácidas y alcalinas, que llevan a cabo la mineralización del fósforo orgánico por medio de la hidrólisis de ésteres de fosfatos y anhídridos de ácido fosfórico (Toledo y Vazquez, 2016). Su mecanismo de acción es extracelular, debido a que una vez generada por los microorganismos o raíces se estabiliza en el componente orgánico del suelo o en los coloides inorgánicos y luego se libera gradualmente según la disponibilidad de iones fosfatos (Zamora *et al.*, 2005).

Respecto al ciclo del azufre, las arilsulfatasas son las enzimas más estudiadas dentro de las sulfatasas, encargadas de liberar sulfatos asimilables por las plantas a partir de la hidrólisis de ésteres de sulfatos orgánicos que representan entre el 40-70% del azufre total del suelo (Viretto, 2012).

Aparte de las diferentes actividades enzimáticas, otro bioindicador de gran importancia es la biomasa microbiana que permite cuantificar el tamaño poblacional de los microorganismos del suelo. Representa la fracción viva de la materia orgánica del suelo y constituye aproximadamente el 3% del carbono orgánico y el 5% del nitrógeno total.

La importancia de los microorganismos del suelo se atribuye a que son un componente activo de reserva orgánica, controlan la descomposición y ciclado de la materia orgánica, la liberación de nutrientes, la degradación de xenobióticos e inmovilización de metales pesados, y actúan como un depósito pequeño pero lábil de nutrientes que contribuyen a mantener la sostenibilidad agrícola a largo plazo (Melero *et al.*, 2006; Sterren *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2018). La información de las comunidades y procesos microbianos puede relacionarse con el funcionamiento del suelo y proporcionar información útil para determinar la sostenibilidad del sistema productivo (Acosta-Martínez *et al.*, 2007), concepto fundamental incorporado en agroecología, ya que uno de los pilares de este paradigma productivo es preservar la salud del suelo.

Hipótesis

Al priorizar la conservación del suelo y de la biodiversidad en sistemas productivos, las prácticas agroecológicas mejoran la calidad de un suelo con antecedente de agricultura convencional y tienden a volverla más semejante a suelos de igual origen y conservados cuasi prístinos.

Predicciones

1. Los indicadores edáficos, asociados a la calidad del suelo, presentarán valores superiores en suelos donde se implementen prácticas agroecológicas respecto a un suelo sometido a agricultura convencional y se aproximarán a los valores de uno conservado cuasi prístino.
2. Los indicadores biológicos manifestarán una mayor sensibilidad de respuesta frente a los cambios de uso de suelo, en comparación con los indicadores físicos y químicos.
3. Se espera que el análisis multidimensional de las variables agrupe usos de suelos que resulten en calidades semejantes de los mismos.

Objetivos

General

Evaluar mediante el uso de indicadores edáficos la mejora de la calidad del suelo en sitios con manejo de prácticas agroecológicas y en comparación con situaciones contrastantes de referencia: suelo conservado cuasi prístino, libre de prácticas agropecuarias (Parque) y sistema agrícola convencional actual de la región.

Específicos

1. Evaluar el comportamiento de indicadores microbiológicos edáficos, como el carbono de la biomasa microbiana, la actividad enzimática global y específica de las enzimas fosfatasa ácida, arilsulfatasa y beta-glucosidasa.
2. Evaluar el comportamiento de indicadores físicos y químicos como estabilidad relativa, agregados estables, carbono orgánico total, materia orgánica y pH.

3. Identificar y seleccionar los indicadores edáficos que expresen mayor sensibilidad a las diferentes prácticas de manejo planteadas en el objetivo general.
4. Establecer posibles relaciones entre las variables y sitios estudiados empleando análisis estadísticos multivariados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

La Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Oliveros (Santa Fe, Argentina), en la cual se llevó a cabo este estudio, limita con la zona urbana de la localidad Oliveros (Figura 1). Dada las pautas de uso impuestas por la Ordenanza Municipal N° 1003/11 respecto a la producción agropecuaria en el PU y en búsqueda de modelos productivos alternativos para esta zona que contemplen el bienestar de los vecinos del distrito, en 2015 se implementó un Módulo Experimental de Transición Agroecológica (32°34'06"S; 60°51'54"O) de carácter descriptivo, observacional y mensurativo. Los objetivos planteados en dicho Módulo fueron los de experimentar y difundir tecnologías de base apropiadas que sirvan de referencia para sistemas productivos extensivos predominantes de la región, con la inclusión de producción primaria, agregado de valor, comercialización y participación social, integrando capacidades y generando sinergias (Benedetto *et al.*, 2017).

El Módulo Agroecológico presenta una extensión de 33,5 ha donde se efectúan prácticas agroecológicas de sistema mixto de agricultura y ganadería. Posee una historia previa de manejo agrícola convencional de más de 30 años de trayectoria de siembra directa con rotaciones maíz-soja-trigo/soja y aplicación de agroquímicos. Está emplazado sobre un suelo Argiudol típico serie Maciel siendo la mayor parte de la superficie de muy buen drenaje, con escasas micro-depresiones y clasificada por su capacidad de uso como Clase I. La secuencia de horizontes correspondiente es: A- B- Bt- BC- C- CK. El horizonte superficial presenta un espesor de 25 cm, de color pardo grisáceo muy oscuro, textura franco-limosa y estructura granular a migajosa (GEOINTA, 2021). Respecto al porcentaje de materia orgánica correspondiente al horizonte superficial, desde SiSINTA (2020), se informa un valor de 2,64%. Al momento de inicio del Módulo se midió un valor de 2,31% de materia orgánica (12,5% inferior al valor señalado en SiSINTA). La disminución en el uso de agroquímicos fue gradual durante el período de diciembre de 2015 a enero de 2017, variando según el sitio y reemplazándolos por productos biológicos de acuerdo a la necesidad. Los insumos utilizados están permitidos por la Resolución N° 374/16 de Producción

Orgánica de SENASA y contemplan tanto el uso de insumos biológicos comerciales como otros de elaboración propia (fermentados y bioles).

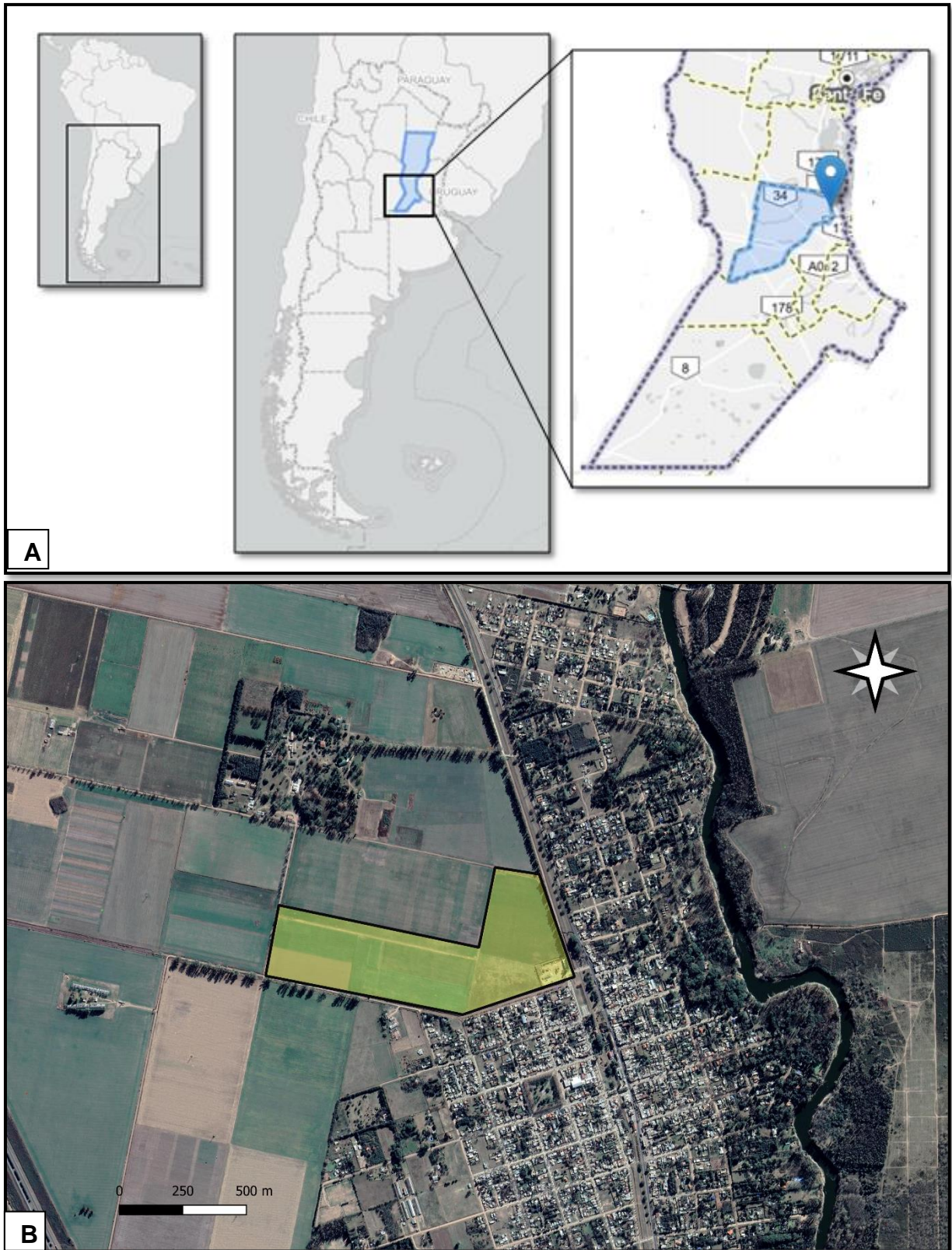


Figura 1: Ubicación geográfica de la EEA INTA Oliveros, Santa Fe (Argentina). La imagen A muestra la ubicación del mismo en el departamento Iriondo de Santa Fe,

tomada del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La imagen B muestra una imagen satelital de la ubicación del Módulo Agroecológico (polígono amarillo), lindante al urbano de Oliveros. Imagen disponible en Google Earth correspondiente al 18 de noviembre de 2020.

En la Figura 2 puede observarse un diagrama del Módulo Agroecológico que esquematiza la ubicación de los diferentes planteos de prácticas agroecológicas con sus respectivas superficies. Además, se indica la disposición de cortinas forestales conformadas por algarrobos (*Prosopis alba* Griseb.) y álamos (*Populus nigra* L.) a un distanciamiento de 2x2 m en forma de tresbolillo (sistema de plantación en el cual cada tres plantas se forma un triángulo equilátero), doble hilera con el objetivo de formar una barrera multiestrato de un ancho de 10 m hacia el límite con el sector urbano. Se indica también el corredor biológico, integrado por especies de las familias Umbelíferas, Crucíferas y Leguminosas, con el fin de aumentar la población de insectos benéficos que puedan desplazarse al interior de los cultivos.

En virtud de la hipótesis y objetivos planteados en este trabajo, con la finalidad de aportar información y establecer valores de indicadores edáficos en sitios de manejos agroecológicos y en dos situaciones de referencia, se seleccionaron dos sitios ubicados dentro de la EEA INTA Oliveros y correspondientes al mismo tipo de suelo: suelo conservado cuasi prístino, libre de prácticas agropecuarias (Parque) y suelo disturbado con más de 30 años de historia bajo producción agrícola convencional (AC). Ambos sitios fueron incorporados al diagrama de la Figura 2.

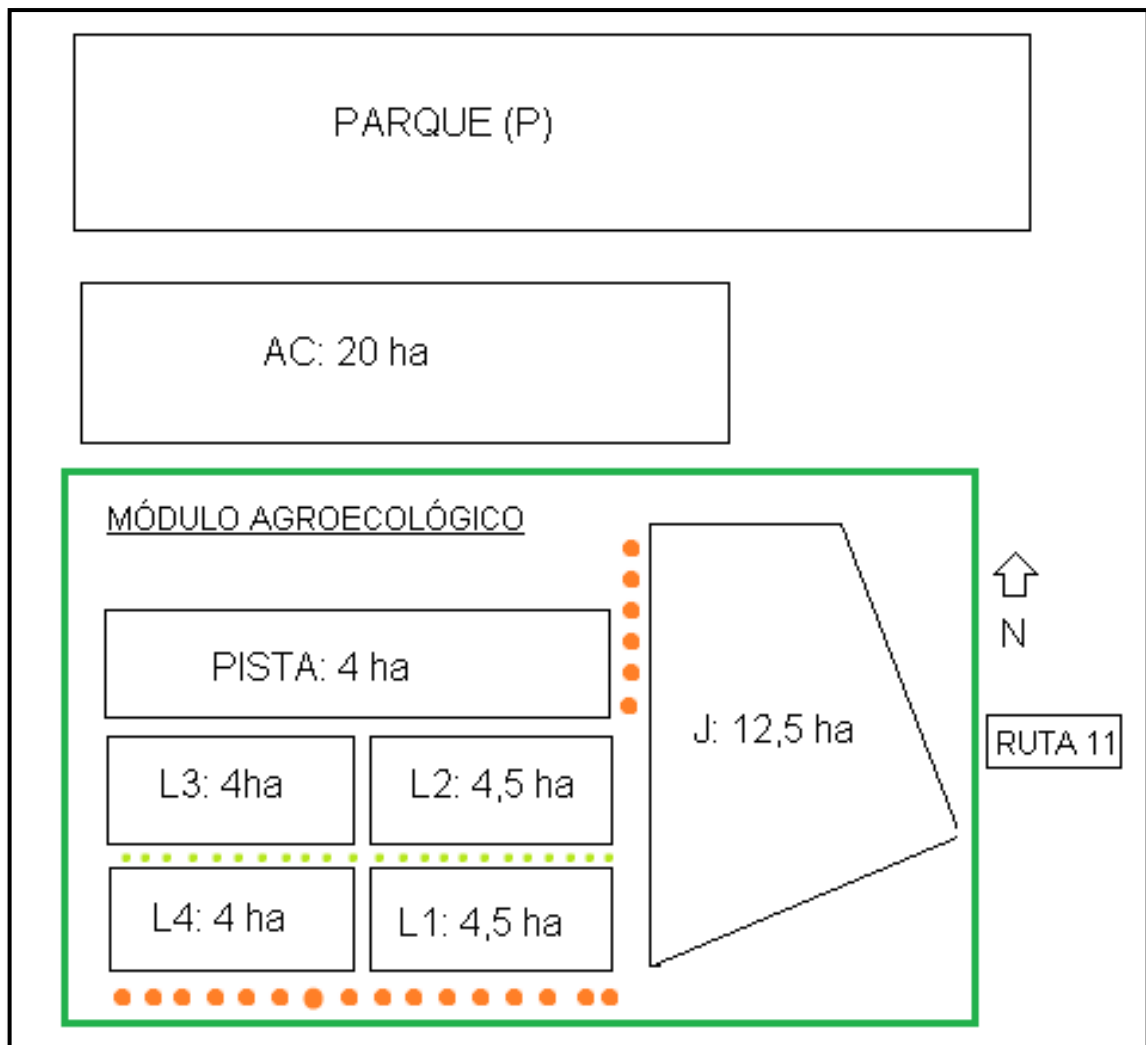


Figura 2: Diagrama del Módulo Agroecológico y sitios de referencia de la EEA INTA Oliveros, con ubicación y superficie total de cada uno de ellos. Los círculos más grandes y naranjas representan las cortinas forestales, los más chicos y verdes claros el corredor biológico.

Debido a las factibilidades técnicas y temporales que conciernen a la realización de una tesina de grado, este estudio se centró en analizar el año 2019 que involucra parte de la campaña agrícola 18/19 y parte de la 19/20, seleccionando los sitios en los cuales se implementa un manejo de tipo agroecológico en sistema mixto: L2, L3 y L4 (Tabla 1).

Tabla 1: Caracterización de los sitios seleccionados dentro del módulo y los sitios de referencia, descripción correspondiente a las campañas llevadas a cabo desde la instalación del módulo (2015).

		CAMPAÑAS				
SITIOS		15/16	16/17	17/18	18/19	19/20
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivo de cobertura (CC) (L2)	INVERNAL		Centeno-vicia pastoreado	Vicia-Avena-Centeno pastoreado y rolado	Vicia pastoreada	Vicia pastoreada
	ESTIVAL	Soja convencional a cosecha	CC Polifítico ¹ pastoreado	CC Polifítico ² pastoreado	Soja pastoreada	Maíz + (Vicia-Trigo) interseembra ³
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivo de grano (L3)	INVERNAL		Trigo cosechado	Centeno CC rolado	Trébol Blanco naturalizado pastoreado	CC Polifítico ⁴ rolado
	ESTIVAL	Sorgo Forrajero pastoreado	Soja pastoreada	Soja-Trigo sarraceno cosecha y pastoreado	Maíz pastoreado	Subdivisión temporal: Sorgo Forrajero y Sorgo Granífero pastoreo y cosecha
Transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4)	INVERNAL		CC Avena-Vicia rolado	Trigo cosechado	Trigo cosechado	CC Polifítico ⁵ rolado
	ESTIVAL	Soja cosechada	Soja-Sorgo Forrajero pastoreado	Soja pastoreada	Control Sorgo de Alepo con pastoreos y pasadas de disco	Subdivisión temporal: Soja a cosecha y CC Moha
Agricultura convencional (AC)		Trigo/soja	Maíz	Soja	Trigo/soja	Maíz

Suelo conservado cuasi prístino:
Parque (P)

Sin disturbio agrícola

¹Polifítico: maíz, sorgo, girasol, vicia sativa, vicia villosa, caupi, centeno, triticales, soja, mijo, alpiste, nabo.

²Polifítico: sorgo, moha, trébol de olor, girasol, maíz.

³Intersiembrado: rábano, cebadilla, vicia, trébol alejandrino, trébol incarnatum, granza.

⁴Polifítico: avena, centeno, trigo, vicia, colza.

⁵Polifítico: vicia sativa, centeno, vicia villosa, avena, rábano, trébol blanco, trébol persa, trébol rojo, colza.

Prácticas agroecológicas generales desarrolladas en el Módulo Agroecológico

Los agroecosistemas de actividad mixta que integran ganadería y agricultura, tal como sucede en los sitios seleccionados para este estudio, son los de mayor potencial para cumplimentar los objetivos de la agroecología, ya que reducen la dependencia de insumos externos a causa de ser sistemas más diversificados y por incrementar la complejidad de los componentes e interacciones del sistema. Potenciar la biodiversidad en los agroecosistemas brindará beneficios en el corto, mediano y largo plazo (Paleologos *et al.*, 2017). Existen diversas estrategias, incorporadas por la agroecología, que permiten lograr el manejo de la agro-biodiversidad. Se repasan brevemente algunas de ellas que fueron incorporadas en los sitios dentro del Módulo Agroecológico.

Los policultivos, polifíticos o también denominados cultivos consociados, contribuyen al aumento de la biodiversidad específica, vertical, estructural y funcional, lo cual genera beneficios frente a la presencia de adversidades y mejora la eficiencia de uso de los recursos. Se busca sembrar dos o más especies en asociación, las cuales comparten todo o parte de su ciclo. Deben presentar requerimientos diferentes y ser complementarias en el uso de los recursos (Lattuca *et al.*, 2019). Las leguminosas incorporadas en los policultivos aportan a través de procesos simbióticos con bacterias, a la fijación atmosférica del nitrógeno y aumentan la humificación del suelo (Cerdá y Sarandón, 2015).

Los procesos de interseembra consisten en sembrar un cultivo de cobertura cuando aún el cultivo de cosecha no ha finalizado su ciclo (con el objetivo de cubrir el suelo y evitar la emergencia y colonización de plantas espontáneas no deseadas), sembrar un cultivo acompañante cuando otro cultivo ya se encuentre en desarrollo o sembrar especies para incrementar el valor forrajero de una pastura natural (Lattuca *et al.*, 2019).

Las rotaciones incrementan la biodiversidad temporal y espacial, mediante una secuencia alternada y ordenada de diferentes especies las cuales brindan numerosos efectos benéficos como procesos de regulación biótica, mejoran el ciclado de nutrientes, control de erosión (Flores y Sarandón, 2014b; Paleologos *et al.*, 2017).

Los cultivos de cobertura se definen como una cobertura vegetal viva que cubre el suelo en forma temporal o permanente. Contribuyen a la diversidad específica, vertical, horizontal, estructural y temporal, poseen funciones amplias y de

multipropósitos como control de adversidades, conservación del suelo y agua (Flores y Sarandón, 2014b). Representan el aporte principal de materia orgánica en agricultura ecológica en caso de no contar con animales (Lattuca *et al.*, 2019).

El manejo agroecológico de vegetación espontánea implica un conjunto de criterios que integran estrategias adecuadas para el diseño y manejo de las mismas. Se pueden encontrar aquellas relacionadas con la prevención (rotaciones, labranzas), y las de modificación de uso de recurso y grado de competencia (arreglo espacial y densidad de siembra, policultivos, cultivos de cobertura). Las labranzas se realizan con distintas herramientas cuyo efecto está directamente relacionado con el implemento usado y la profundidad (Sánchez-Vallduví y Sarandón, 2014). Como ejemplo de algunas herramientas para el control de malezas podemos mencionar el Rolo, cilindro al cual se le adicionan las cuchillas helicoidales o rectas sin filo, que dañan el tejido vascular de las plantas y provocar el secado de las mismas. La máquina SERI o BES (Beneficio Económico Sustentable), permite el manejo mecánico de plantas espontáneas. Consiste en un chasis sobre el que se insertan cuchilla de corte y un timón con reja plana horizontal, la cual trabaja enterrada entre 3 y 6 cm por debajo de la superficie, cortando el suelo y las raíces de las plantas en todo el ancho de labor del implemento (Lattuca *et al.*, 2019).

Además, se aplican biopreparados tales como Cola de Caballo (biofungicida) y Súper Magro (biofertilizante). Los preparados ecológicos son elaborados en base a una combinación de sustancias de origen vegetal, animal y/o mineral de baja o nula toxicidad. Favorecen la reproducción de organismos benéficos que permiten la recuperación de la salud de los suelos, además son utilizados para nutrición de cultivos y control de plagas y/o enfermedades. Tienen como ventajas que son aptos para la elaboración propia, económicos, bajo riesgo de contaminación ambiental, rápida degradación ambiental, no afectan la fauna benéfica y no generan resistencia (Lattuca *et al.*, 2019). La Resolución N° 374/16 de SENASA que rige el registro de productos biológicos para producción orgánica, establece que los preparados caseros intraprediales son aquellos insumos de uso exclusivo dentro del establecimiento agropecuario.

Descripción de prácticas agroecológicas llevadas a cabo durante este estudio

En la Tabla 2 se detalla la ocupación mensual de cultivos, labores culturales llevados a cabo en los sitios dentro del Módulo Agroecológico y seleccionados para este estudio, correspondientes al año de muestreo (2019). Posteriormente se describe más detalladamente la tabla con el objetivo de clarificar la secuencia de ocupación de cultivos previos a los muestreos.

Tabla 2: Ocupación mensual de cultivos, labores culturales, uso de insumos y pastoreos realizados en los sitios con manejo agroecológico, dentro de las campañas 18/19 y 19/20 que abarcan el año de estudio (2019). Se destacan con negrita los meses en los cuales se muestreó (mayo y noviembre de 2019).

Sitio/mes	2018					2019									
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera con predominancia de cultivos de cobertura (L2)	Soja								Vicia			Consocio: Maíz + (Vicia-trigo) /Intersiembr ¹			
	Seri								Arado Disco		Arado Disco	Vicia: inoculación con micorrizas + Az ^{**}	Escardillo	Escardillo	
				P*	P	P			P						
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera con predominancia de cultivos de grano (L3)	Maíz					CC Polifítico ²						División temporal: Sorgo Forrajero y Granífero			
	Seri	Súper Magro						Seri Disco			Rolo		Rolo		
			P		P			P							
Transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4)	Trigo	Control Sorgo de Alepo			CC Polifítico ³						División temporal: Soja y Moha				
						Disco		Seri Disco					Rolo		
			P	P			P								

*P (Pastoreo)

**Az: *Azospirillum sp.*

¹Intersiembr: rábano, cebadilla, vicia, trébol alejandrino, trébol incarnatum, granza.

²Polifítico: avena, centeno, trigo, vicia, colza.

³Polifítico: vicia sativa, centeno, vicia villosa, avena, rábano, trébol blanco, trébol persa, trébol rojo, colza.

- Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de cobertura (L2):

La soja (*G. max*) sembrada en diciembre de 2018 se destinó a pastoreo (verdeo de verano). Los animales ingresaron al sitio en los meses de febrero, marzo y abril. Al momento del muestreo correspondiente a mayo el suelo se encontraba con el rastrojo remanente de soja pastoreada. Durante junio de 2019, se procedió a descompactar el suelo por medio de pasadas superficiales de arado y rastra de discos, con el fin de preparar la cama de siembra para vicia (*Vicia sativa* L.). Dicho cultivo fue pastoreado en el mes de junio y posteriormente se suprimió su crecimiento por medio arado de rejas. El 20 de septiembre del mismo año, se sembró maíz (*Z. mays*) semiprecoz, que fue consociado con trigo (*T. aestivum*) y vicia (*V. sativa*), la cual se inoculó previamente con micorrizas y *Azospirillum* sp. En los meses de octubre y noviembre se llevaron a cabo pasadas de escardillo, con el objetivo de controlar plantas adventicias de los entresurcos. Entonces, al momento de realizar el muestreo en noviembre, el suelo estaba ocupado por el cultivo consociado (maíz, vicia y trigo) y presentaba una reciente remoción debido a las dos pasadas de escardillo. En noviembre de 2019 se decidió realizar una intersembrado en el maíz sembrado previamente, integrada por rábano (*Rhapanus sativus* L.), cebadilla (*Bromus unioloides* Kunth, B.), vicia (*V. sativa*), trébol alejandrino (*Trifolium alexandrinum* L.), trébol incarnatum (*Trifolium incarnatum* L.) y granza (*Stuckeniapectinata* L. Börner).

- Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de grano (L3)

El maíz (*Z. mays*) sembrado en octubre de 2018 se destinó a pastoreo (verdeo de verano), dando ingreso a los animales durante algunos días de los meses de enero y marzo de 2019. Asimismo, en este maíz se aplicó el biofertilizante Súper Magro en noviembre de 2018. En mayo de 2019, luego de recolectar las muestras de suelo, se procedió a disquear con el fin de preparar la cama de siembra para el cultivo de cobertura polifítico integrado por avena (*Avena sativa* L.), centeno (*Secale cereale* L.), trigo (*T. aestivum*), vicia (*V. sativa*, inoculada con rizobios) y colza (*Brassica napus* L.). El cultivo polifítico fue roado en octubre y noviembre con el objetivo de volteo y quiebre del cultivo para suprimir el crecimiento y dejar el material verde y fresco sobre la superficie del suelo para que se incorpore lentamente al pool de materia orgánica mediante los procesos de degradación y humificación. El muestreo correspondiente

al mes de noviembre se realizó luego de esta última práctica cultural. Posteriormente, se decidió realizar una división temporaria del sitio, una parte se destinó a la siembra de sorgo forrajero, y la otra a granífero (*Sorghum bicolor* L.).

- Transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4)

El cultivo de trigo para grano (*T. aestivum*) sembrado en la campaña 18/19 fue inoculado en semilla con micorrizas y *Azospirillum sp.* y durante su desarrollo se aplicaron los bioinsumos Súper Magro y Cola de Caballo. Luego de la cosecha del trigo en noviembre de 2018, en los meses de enero, marzo y abril de 2019 se procedió a pasar una rastra de discos en el suelo y pastorear el sitio en varias ocasiones, previo al muestreo de mayo, con el objetivo de controlar el crecimiento del Sorgo de Alepo (*Sorghum halepense* L.). En mayo de 2019 se volvió a roturar el suelo, utilizando el mismo implemento mencionado, con el propósito de preparar la cama de siembra para un cultivo de cobertura polifítico integrado por vicia (*V. sativa*), centeno (*S. cereale*), vicia villosa (*Vicia villosa* Roth.), avena (*A. sativa*), rábano (*R. sativus*), trébol blanco (*Trifolium repens* L.), trébol persa (*Trifolium resupinatum* L.), trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) y colza (*B. napus*). El polifítico fue rolado en el mes de octubre de 2019 para suprimir el crecimiento y disponer en superficie de material orgánico para el suelo. En el mes de noviembre se recolectaron las muestras de suelo y posteriormente se decidió realizar una división temporaria del sitio donde una parte se destinó a la siembra de soja (*G. max*) y otra a moha (*Setaria itálica* L.).

Registro de pastoreos

La Tabla 3 muestra los pastoreos realizados en el año de estudio (2019). Los mismos se realizaron en base a criterios agronómicos en función del momento óptimo de pastoreo. La modalidad aplicada fue en franjas con alta carga animal y corto tiempo de ocupación fomentando la mayor transformación posible del material verde en carne e incentivando el proceso de humificación de la materia orgánica gracias al aporte de excrementos animales (Cerdá y Sarandón, 2015; Benedetto *et al.*, 2017). Se llevaron a cabo entre tres a cuatro pastoreos por sitio con una elevada cantidad de animales y en lapsos de tiempo breves variando de dos a once días. Es conveniente aclarar que el eventual pastoreo correspondiente a la denominación del sitio L4, tiene como función principal el control de plantas adventicias, específicamente Sorgo de Alepo (*S. halepense*) ya que debilita el crecimiento vegetativo por rizomas y no realiza tanta remoción de suelo.

Tabla 3: Pastoreos llevados a cabo en el Módulo Agroecológico en 2019, indicando inicio, cantidad de días de pastoreo, cantidad de animales por fecha de ocupación y la carga animal por hectárea y por año calculada como [(cabezas/superficie)*días].

SITIOS	Inicio de pastoreos	Días totales de pastoreo	Cantidad de cabezas de animales	Carga animal anual
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de cobertura (L2)	14/02/2019	4	167	502
	07/03/2019	2	167	
	06/04/2019	4	53	
	25/06/2019	11	167	
Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de grano (L3)	28/01/2019	11	167	966
	11/03/2019	9	167	
	06/05/2019	3	167	
Transición agroecológica: rotación-agrícola, con eventual pastoreo (L4)	17/01/2019	5	167	546
	11/02/2019	2	167	
	10/04/2019	6	167	

Muestreo de suelo

La diversidad y distribución de los microorganismos en el suelo varía según la profundidad, tipo de suelo, relieve, estrés biótico o abiótico que se puedan presentar. La mayoría de estos microorganismos son ubicuos, organótrofos y dependientes de la disponibilidad de carbono orgánico. La cantidad, como también la diversidad y actividad microbiana disminuye con la profundidad en el perfil del suelo debido a un menor contenido de materia orgánica, agua y oxígeno. La norma ISO 10381-6 de 1993, recomienda realizar los muestreos para variables microbiológicas a una profundidad máxima de 20 cm, debiendo extraerse las muestras a una profundidad constante, en condiciones lo más similares posible y evitando mezclar muestras de diferentes profundidades (Vargas Gil *et al.*, 2017).

Para que las variables microbianas a determinar representen la situación bajo estudio deben comprenderse la distribución espacial y temporal microbiana. Con respecto a la distribución espacial; el muestreo depende de la escala y los factores aparejados que influyen en la determinación de valores como topografía, paisaje, clima, manejo entre otros. Según Vargas Gil *et al.* (2017), para determinaciones microbiológicas, en

general, se debe muestrear a una profundidad que varía entre 0-5 cm y 0-10 cm. La frecuencia temporal de muestreo está determinada por los objetivos planteados y las condiciones ambientales principalmente. Las épocas recomendadas para muestreo resultan ser otoño tardío o primavera temprana, dada la dinámica microbiana presente en el suelo.

Por todo expresado y dado que el Módulo Agroecológico en cuestión es de tipo observacional (cada sitio se sitúa en una parcela, todas correspondientes a una superficie de características edáficas homogéneas) y en base a los objetivos presentados en este trabajo, se decidió proseguir el siguiente diseño de muestreo para cada uno de sitios descritos en la Tabla 1: se recolectaron tres muestras compuestas conformadas por 20 submuestras cada una, en el estrato hasta los 10 cm de profundidad en dos épocas diferentes: otoño-invernal (16-05-2019) y primavero-estival (8-11-2019). Las muestras fueron extraídas por medio de un barreno de 2,5 cm de diámetro, al azar y en zig-zag, ya que de esta manera se permite recorrer la totalidad de la unidad de muestreo de manera no sistemática ni inducida subjetivamente. Posteriormente, se tamizaron por malla de 2 mm y se conservaron en heladera a 4°C hasta el momento de realizar las determinaciones. Las propiedades físicas y químicas se evaluaron sobre las muestras extraídas en mayo, a la misma profundidad teniendo en cuenta que Cazorla *et al.*, (2017) sugieren que el monitoreo de variables físicas puede realizarse anualmente o cada dos años.

A continuación, en la Figura 3, se presentan las precipitaciones (milímetros) y las temperaturas (°C) del aire (fuera del abrigo meteorológico y a los 50 cm del ras del suelo) y del suelo (10 cm de profundidad), que se registraron para el año 2019. La fuente de datos climáticos utilizada corresponde a la Estación Agro-meteorológica INTA Oliveros. En el mes de mayo, se registró una temperatura promedio de 10,2°C del aire, 14,6°C para el suelo y un acumulativo de precipitaciones en los últimos tres meses (marzo, abril y mayo) de 242,5 mm. Para el mes de noviembre, la temperatura promedio del aire fue 13,9°C, 22,1°C la del suelo y un acumulativo de precipitaciones en septiembre, octubre y noviembre de 216,1 mm. Las precipitaciones acumuladas en el año 2019 fueron de 1181,9 mm.

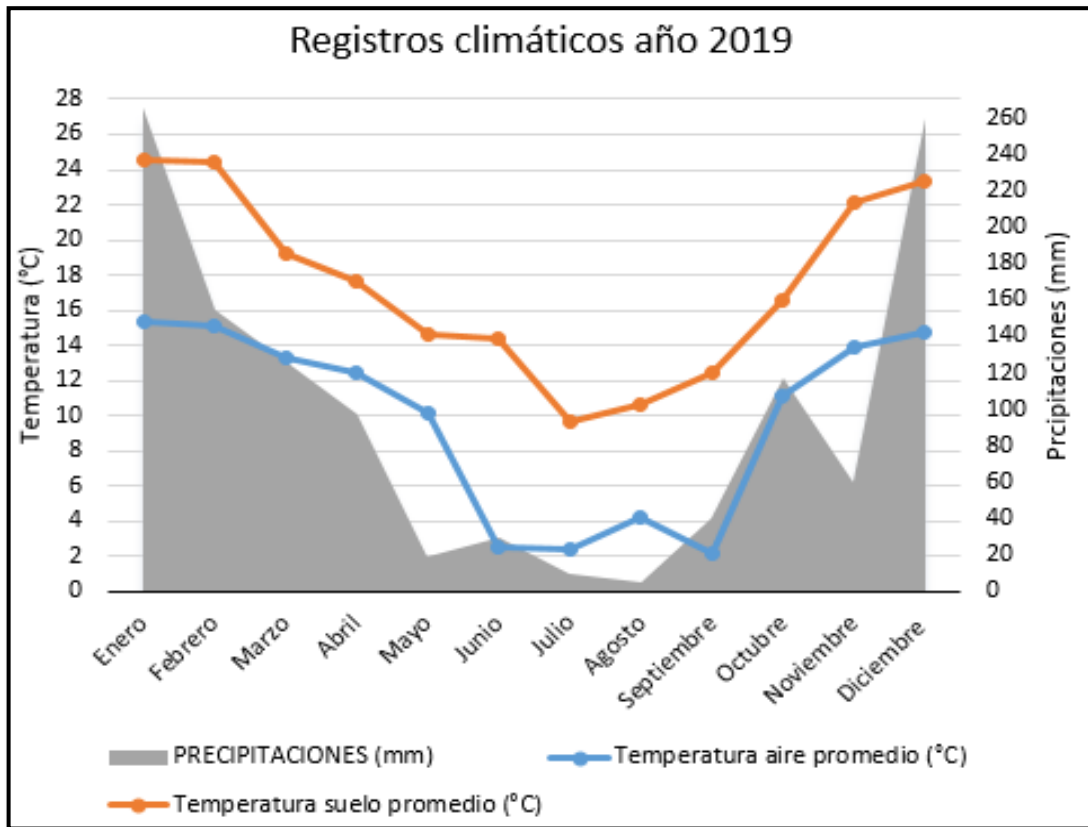


Figura 3: Registros climáticos del módulo aportados por la Estación Agro-meteorológica INTA Oliveros en 2019.

Determinación de los indicadores microbiológicos

Se midió el carbono de la biomasa microbiana, se determinó la actividad enzimática global y las actividades de enzimas que intervienen en el ciclo del carbono, fósforo y azufre.

1. Carbono de la biomasa microbiana (CBM)

El método utilizado fue el de Fumigación-Extracción adaptado según Vance *et al.* (1987). El CBM se calculó mediante la diferencia entre las muestras fumigadas y no fumigadas, realizándose la fumigación con cloroformo libre de etanol que provoca la muerte de las células microbianas del suelo por rotura de las membranas celulares. El contenido citoplasmático de las células microbianas es vertido al suelo y extraído con K_2SO_4 0,5M para su cuantificación. Los resultados se expresan como microgramo (μg) de CBM sobre gramo (g) de suelo en base seca.

Actividades enzimáticas:

1. Actividad enzimática global (FDA)

Se determinó la actividad de un grupo de enzimas que incluye proteasas, lipasas y esterazas por el método de la hidrólisis del Diacetato de Fluoresceína (FDA), según Schnürer y Rosswall (1982). Los resultados se expresan como μg de fluoresceína (flu) g^{-1} de suelo en base seca.

2. Beta-glucosidasa (Bgasa)

Se siguió la técnica propuesta por Tabatabai (1982). El método se basa en la determinación colorimétrica del paranitrofenol (PN) obtenido por la acción de la beta-glucosidasa después de incubar el suelo con un sustrato de paranitrofenil-beta-D-glucopiranosido en medio tamponado a pH 6, durante una hora a 37°C . La actividad enzimática es proporcional a la concentración de p-nitrofenol presente en el medio al final de la hidrólisis. Los resultados se expresan en μg de $\text{PN}\cdot\text{hora}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de suelo en base seca.

3. Fosfatasa ácida (Ffsa)

Se utilizó el método propuesto por Tabatabai (1982). El método se basa en la determinación espectrofotométrica del PN liberado cuando el suelo es incubado a 37°C durante una hora en un medio tamponado de pH 6,5 con p-nitrofenilfosfato. Los resultados se expresan en μg de $\text{PN}\cdot\text{hora}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de suelo en base seca.

4. Arilsulfatasa (Asasa)

Se siguió la técnica según Tabatabai (1982), en la cual para la medición de la actividad arilsulfatasa se utiliza la capacidad hidrolítica de la enzima sobre un sustrato artificial (p-nitrofenilsulfato), cuyo producto, el PN, se evalúa espectrofotométricamente en un medio tamponado a pH 5,8 incubado a 37°C durante una hora. La actividad enzimática es proporcional a la concentración de p-nitrofenol presente en el medio al final de la hidrólisis. Los resultados se expresan en μg de $\text{PN}\cdot\text{hora}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de suelo en base seca.

Con el fin de poder estandarizar las medidas y expresar los resultados de los parámetros microbiológicos sobre gramo de suelo seco, se determinó el contenido de humedad de las muestras por diferencia de pesaje tras secado en estufa a 110°C hasta peso constante. El factor humedad será igual a la masa de suelo húmedo sobre la masa de suelo seco.

Determinación de los indicadores físicos y químicos

Se determinó la cantidad de agregados estables y la estabilidad relativa como indicadores físicos, carbono orgánico total, materia orgánica y pH como indicadores químicos para este estudio.

1. Agregados estables (Agr.E) y estabilidad relativa (Est.R)

Se utilizó el método de Hénin (1972), el cual consistió en realizar el pre-tratamiento de las muestras con agua y posteriormente pesar la fracción de agregados que permanece en el tamiz de 0,25 mm luego de sumergir las muestras en agua con el aparato de Feódoroff (1960). Una vez obtenido los valores de porcentaje de agregados estables (Agr.E), se calculó la estabilidad relativa (Est.R) mediante la relación entre el porcentaje de agregados estables de cada situación y los del mismo suelo en su condición prístina. Los resultados de ambos parámetros fueron expresados en porcentaje (%).

2. Carbono orgánico total (COT) y contenido de materia orgánica (MO)

El COT se determinó por el método de Walkley (1947), el cual consiste en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, que aporta el medio para la reacción y el calor necesario para que se produzca la oxidación del carbono, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson y Sommers, 1982). Los resultados se expresaron en las unidades de miligramo (mg) sobre g.

Como la MO es reserva de numerosos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y contiene aproximadamente un 58% de carbono, para el cálculo se procedió de la siguiente manera: $MO = [COT \times 1,724]$, luego los resultados de dicha ecuación se expresaron en porcentaje (%) (Manlay *et al.*, 2007).

3. Determinación del pH por potenciometría

El pH del suelo se mide con potenciómetro en una suspensión suelo-agua en una relación 1:2,5. En un vaso de precipitado de 100 ml se pesó 20 g de suelo, se agregó 50 ml de agua destilada y agitó con varilla de vidrio en forma enérgica hasta lograr una dispersión uniforme. Se dejó en reposo durante 1 hora, se volvió a agitar nuevamente y se colocó el electrodo en la suspensión para realizar la lectura del pH.

Análisis estadístico de los datos

Para el análisis de los resultados obtenidos en las determinaciones biológicas, físicas y químicas se emplearon los software estadísticos InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2019) y RStudio (R Development Core, 2018). Para evaluar diferencias entre los sitios estudiados se empleó un análisis de la varianza, previas pruebas de homogeneidad de variancias y normalidad con test de Levene y Shapiro-Wilk respectivamente. Las medias se compararon por medio del test de Tukey con una significancia del 5%. Se llevaron a cabo gráficos combinados de líneas y puntos con el fin de contrastar valores absolutos de los parámetros medidos entre los diferentes sitios y épocas de muestreo.

Se realizó un Análisis de Componentes Principales, con el fin de reducir la dimensión de los datos para mejorar la interpretación de los resultados y así poder observar existencia o no, de similitud entre sitios y variables que puedan resumir la información relevada. Con la finalidad de agrupar elementos (sitios de estudio), se implementó un Análisis de Cluster para cada muestreo por medio del método de Ward. Se establecieron correlaciones entre variables, mediante el coeficiente de correlación de Pearson para medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables dadas.

RESULTADOS

Análisis exploratorio de los datos

En una primera instancia se realizó un análisis exploratorio de los datos, con los cuales se evaluaron el supuesto de normalidad por medio del test de Shapiro-Wilk y el supuesto de homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Verificado el cumplimiento de ambos supuestos, se prosiguió con la realización de un análisis de la varianza (ANOVA), con el fin de determinar si los promedios de cada variable de los sitios de referencia y con manejo de prácticas agroecológicas (Tabla 1) resultaban estadísticamente diferentes entre sí utilizando la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0,05$).

Para la nomenclatura de los sitios se prosiguió según lo establecido en Materiales y Métodos (Tabla 1), donde:

- Sitios de referencia:
 - Suelo conservado cuasi prístino, libre de prácticas agropecuarias: Parque (P).
 - Agricultura Convencional (AC).
- Sitios con manejo de prácticas agroecológicas:
 - Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de cobertura (L2).
 - Transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de grano (L3).
 - Transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4).

Se evaluó la interacción sitio*época y se observó una interacción significativa en todos los casos al 5%, es decir, que la respuesta de una variable a un determinado sitio no es independiente de la época de muestro. Por lo mencionado anteriormente se decidió realizar para los parámetros microbiológicos un ANOVA correspondiente a cada fecha de muestreo (Tablas 4 y 5), incluyendo los sitios mencionados anteriormente.

Tabla 4: Valores medios de las determinaciones microbiológicas realizadas en los sitios estudiados, correspondientes al muestreo de mayo de 2019. La última fila de la tabla corresponde al valor de coeficiente de variación (CV).

Sitios	CBM ($\mu\text{g CBM g}^{-1}$)	FDA ($\mu\text{g flu}^{-1}\text{h}^{-1}$)	Ffsa ($\mu\text{g PN g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Bgasa ($\mu\text{g PN g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	Asasa ($\mu\text{g PN g}^{-1} \text{h}^{-1}$)
P	215,46 A	101,51 AB	1051,92 A	390,48 A	386,87 A
L2	107,32 BC	122,17 A a	646,27 BC	316,42 AB	150,39 C b
L3	59,12 C	116,36 AB a	645,30 BC	295,75 B	173,28 BC b
L4	109,01 BC	88,23 B b	706,19 B	304,81 B	226,96 B a
AC	137,87 AB	50,58 C c	574,78 C	168,93 C	176,45 BC b
CV	23,02	11,29	6,13	9,63	9,17

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Los valores indicados con letras en minúscula indican los resultados significativamente diferentes omitiendo los datos del Parque en el ANOVA.

Tabla 5: Valores medios de las determinaciones microbiológicas realizadas en los sitios estudiados, correspondientes al muestreo de noviembre de 2019. La última fila de la tabla corresponde al valor de coeficiente de variación (CV).

Sitios	CBM ($\mu\text{g CBM g}^{-1}$)	FDA ($\mu\text{g flu}^{-1}\text{h}^{-1}$)	Ffsa ($\mu\text{g PN g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Bgasa ($\mu\text{g PN g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	Asasa ($\mu\text{g PN g}^{-1} \text{h}^{-1}$)
P	651,97 A	251,80 AB	1082,29 A	495,10 A	442,77 A
L2	273,00 AB	220,76 B b	684,44 C	248,38 C	139,22 C
L3	303,45 AB	287,80 A a	996,40 A	368,38 B	245,86 B
L4	357,14 AB	239,90 AB b	821,66 B	287,41 BC	187,08 BC
AC	242,03 B	229,60 B b	595,99 C	204,78 C	139,34 C
CV	39,36	7,80	5,66	11,45	9,87

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Los valores indicados con letras en minúscula indican los resultados significativamente diferentes omitiendo los datos del Parque en el ANOVA.

Para todos los sitios evaluados, los registros del mes de noviembre obtenidos para CBM y FDA resultaron ser mayores que los del mes de mayo. Las enzimas no

difirieron notablemente entre fechas de muestreos, marcando en menor medida el efecto de estacionalidad (datos no mostrados).

En el caso de CBM correspondiente al muestreo de mayo, el sitio Parque obtuvo el mayor valor y con diferencias estadísticas respecto de los sitios con manejo agroecológico. Se destaca que el sitio L3 fue significativamente menor que respecto al sitio AC. En noviembre, la tendencia resultó en un aumento del parámetro evaluado en todos los sitios respecto a mayo, siendo el promedio del sitio Parque el de mayor valor absoluto y el del sitio AC el menor, registrándose entre ellos diferencias estadísticas significativas. Los sitios bajo manejos agroecológicos se posicionaron de manera intermedia y estadísticamente no diferentes entre sí, ni tampoco respecto de los sitios de referencias Parque y AC. En términos absolutos, el sitio de transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4), registró el mayor promedio de CBM comparado a los demás sitios agroecológicos, en ambas fechas de muestreo.

FDA del mes de mayo presentó valores estadísticamente similares entre sitios de manejo agroecológico y Parque, y además en conjunto resultaron estadísticamente diferentes del sitio AC. Este último sitio registró la menor media y difirió un 50% del sitio Parque y entre 76% y 144% de los sitios bajo manejo agroecológico. En noviembre, para esta misma variable, estas diferencias no se sostuvieron y sólo se puede destacar que el sitio L3 fue significativamente mayor que los sitios L2 y AC. Los sitios Parque y L4 obtuvieron valores intermedios y sin diferencias respecto al resto de los sitios.

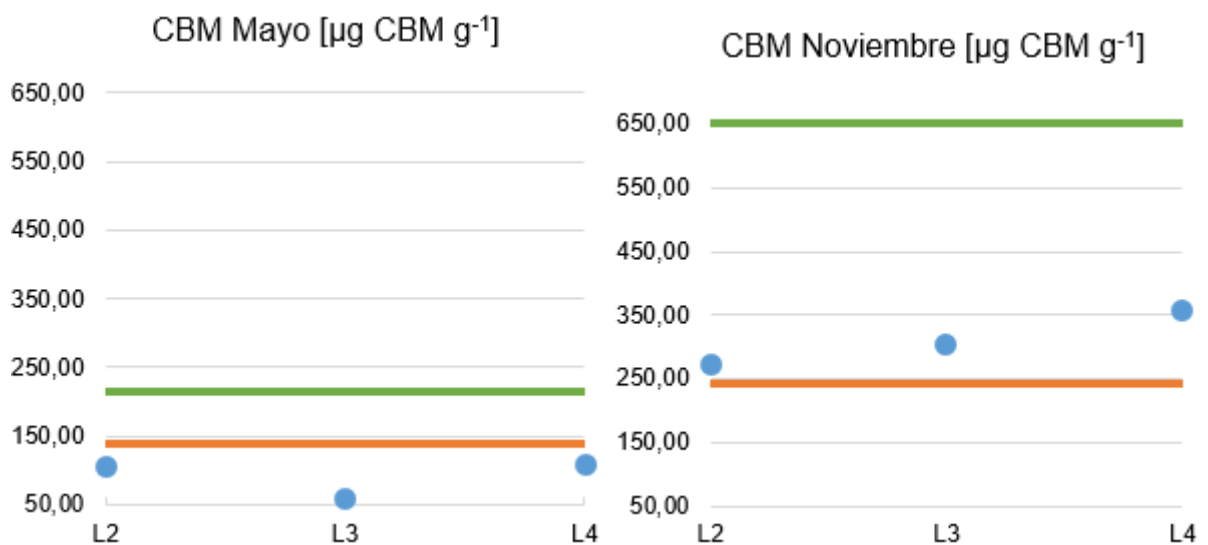
Por su parte, las enzimas (Ffsa, Bgasa, Asasa) permitieron un mejor discernimiento o separación entre sitios. Para todas ellas, ambas fechas de muestreo, los valores promedios del sitio Parque fueron consistente y estadísticamente mayores respecto a los demás sitios. No obstante, la diferencia estadística no se verifica en dos situaciones: Bgasa correspondiente al mes de mayo con respecto a L2 y Ffsa de noviembre con respecto a L3, pero aun así el sitio Parque siempre presentó las medias más elevadas. Se observa además en reiteradas comparaciones que los sitios con manejo agroecológico presentaron diferencia estadística respecto al sitio AC: en mayo se detectó en L2, L3 y L4 para Bgasa y L4 para Ffsa, mientras que en el muestreo del mes de noviembre AC se diferenció de L3 y L4 en Ffsa y de L3 tanto para Bgasa como para Asasa. Es de destacar el ordenamiento de los promedios de mayor a menor para

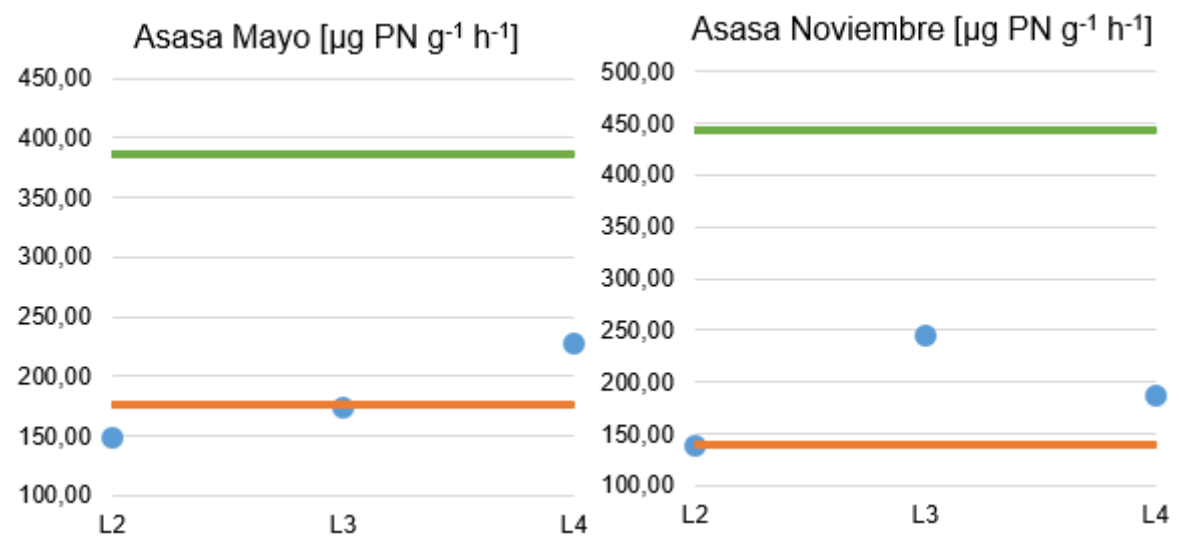
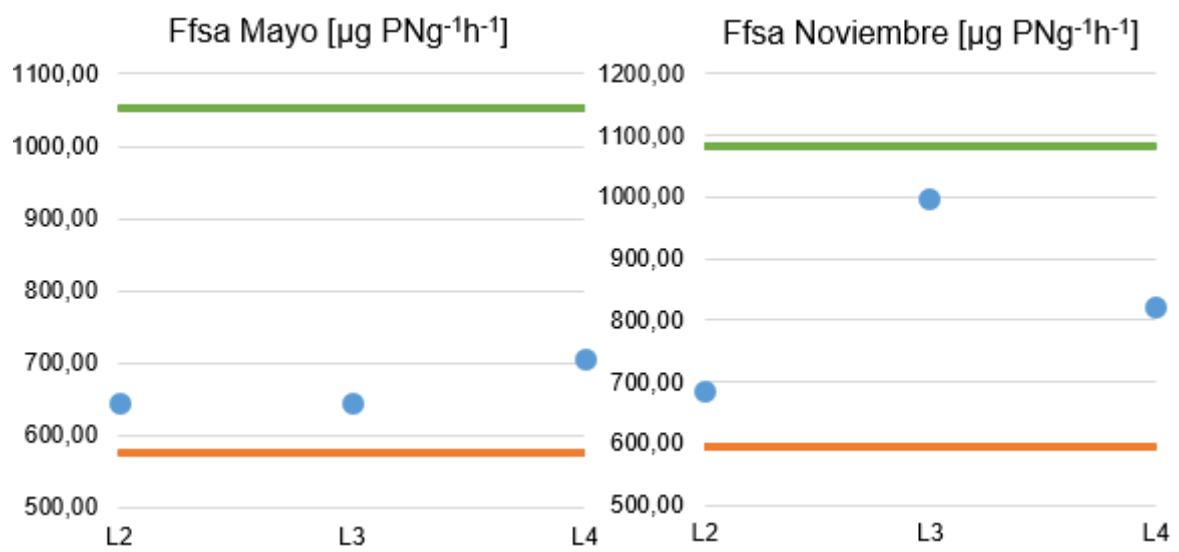
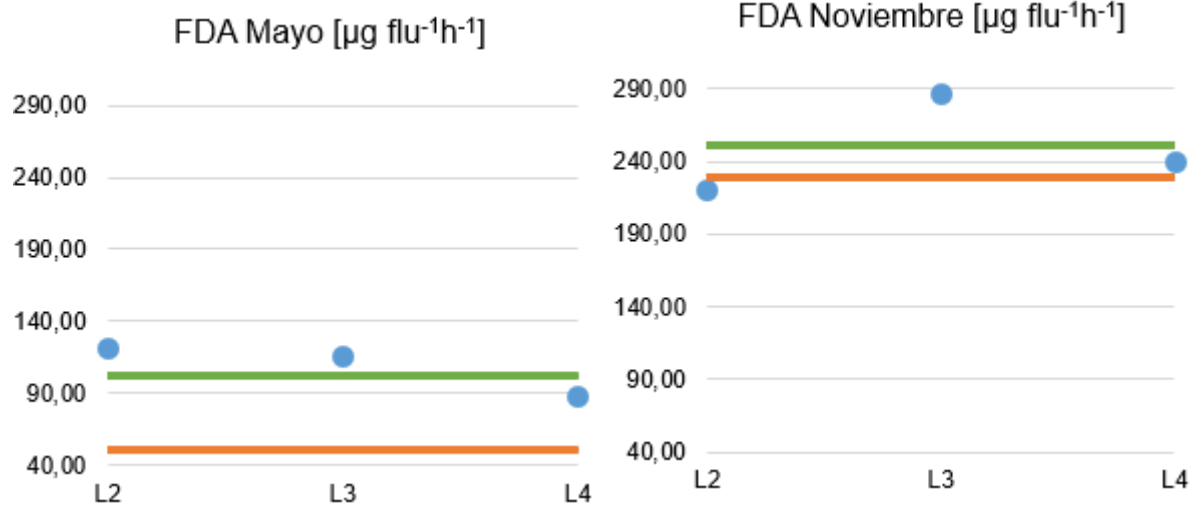
el muestreo de noviembre, donde existe coincidencia en el orden de los sitios para todas las enzimas:

$$P > L3 > L4 > L2 > AC.$$

El Parque presentó valores muy superiores respecto a los restantes sitios en la mayoría de los indicadores e independientemente de la fecha analizada. Estadísticamente, esta circunstancia podría haber enmascarado o impedido la detección de mayores diferencias entre sitios agroecológicos, así como entre ellos y el AC. Debido a esto, se probó realizar un nuevo ANOVA omitiendo los datos del Parque (Tablas 4 y 5, diferencias indicadas en letras minúsculas). Este análisis extra mejoró la separación estadística de los sitios para el indicador FDA, en ambas fechas, y Asasa de mayo. FDA de mayo diferenció estadísticamente L3 de L4 y FDA de noviembre logró separar también L3 de todo el resto. Asasa de mayo pudo diferenciar estadísticamente el L4 del resto mientras que, al incluir el Parque, sólo se diferenciaba de éste y de L2.

Con el objetivo de facilitar el contraste visual de los valores medios obtenidos y poder observar de manera más clara la cercanía y/o alejamiento de los sitios con manejos agroecológicos respecto a los sitios de referencia, se realizaron gráficos combinados de líneas y puntos (Figura 4) para cada variable microbiológica en las respectivas fechas de muestreo.





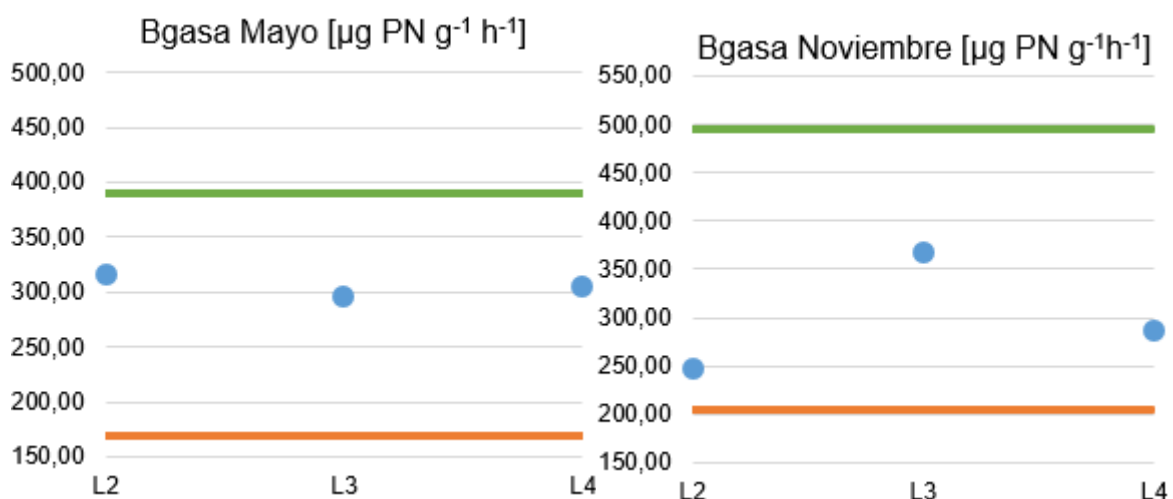


Figura 4: Gráficos combinados de líneas y puntos para las variables microbiológicas en ambos muestreos, con sus respectivas unidades. La línea horizontal verde indica el valor umbral del sitio conservado casi prístino (Parque) y la línea horizontal naranja el valor umbral del sitio de agricultura convencional.

La Figura 4 permite demostrar gráficamente que en la mayoría de los casos los valores promedio más altos se registraron en la situación de suelo conservado casi prístino y los más bajos en el sitio bajo agricultura convencional, ubicándose los sitios con manejo agroecológico en posiciones intermedias para la mayoría de las situaciones.

En las variables físicas y químicas (Tabla 6) se puede observar que la diferenciación entre sitios fue más homogénea en casi todos los casos, en comparación con las variables microbiológicas. En las variables Est.R, Agr.E, COT y MO, el sitio Parque asumió los mayores valores medios y a su vez estadísticamente diferentes de los demás sitios, los cuales no presentaron diferencias significativas entre sí.

Particularmente, en cuanto a la determinación del pH, resulta importante aclarar que ante la situación epidemiológica mundial, referida al COVID-19 y, por ende, las medidas de aislamiento obligatorio, no fue posible realizar las mediciones por triplicado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Agrarias. Sin embargo, los datos que se muestran en la Tabla 6 fueron aportados por el grupo perteneciente a la EEA INTA Oliveros que conduce el Módulo Agroecológico. Respecto a esta variable, se observó que los sitios con manejo agroecológico y el AC presentaron valores de pH similares, cercanos a la neutralidad. El sitio Parque registró un valor de pH neutro, y relativamente mayor a los demás sitios.

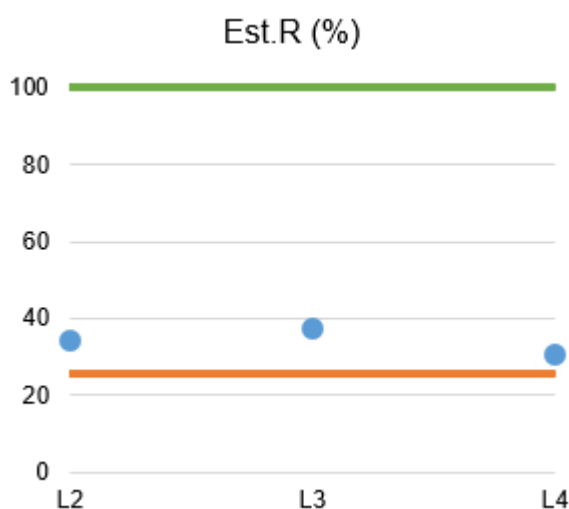
Tabla 6: Valores medios de las determinaciones físicas y químicas realizadas los sitios, correspondientes al de muestreo de mayo de 2019. La última fila de la tabla corresponde al valor de coeficiente de variación (CV).

Sitios	Est.R (%)	Agr.E (%)	COT (mg gr ⁻¹)	MO (%)	pH
P	100 A	52,0 A	38,54 A	6,65 A	7,1
L2	34,61 B	18,0 B	18,79 B	3,24 B	6,5
L3	37,17 B	19,3 B	18,04 B	3,09 B	6,3
L4	30,76 B	16,0 B	18,93 B	3,26 B	6,2
AC	25,64 B	13,3 B	16,85 B	2,90 B	6,2
CV	16,28	16,28	5,67	5,72	-

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Nuevamente, al presentar el Parque valores muy superiores en todos los indicadores físicos y químicos medidos y por los mismos motivos explicados para los indicadores microbiológicos, se probó realizar un nuevo ANOVA omitiendo este sitio. A diferencia de los microbiológicos, esta instancia no permitió mejorar la separación estadística entre sitios en ninguno de los parámetros (análisis estadístico no mostrado).

Con el fin de destacar diferencias entre los valores hallados de los indicadores físicos y químicos en cada sitio, se confeccionaron gráficos combinados de líneas y puntos (Figura 5). Sólo se muestran los gráficos para las variables Estabilidad Relativa (Est.R) y Carbono Orgánico Total (COT), ya que agregados estables y materia orgánica para este caso presentan el mismo patrón gráfico, respectivamente.



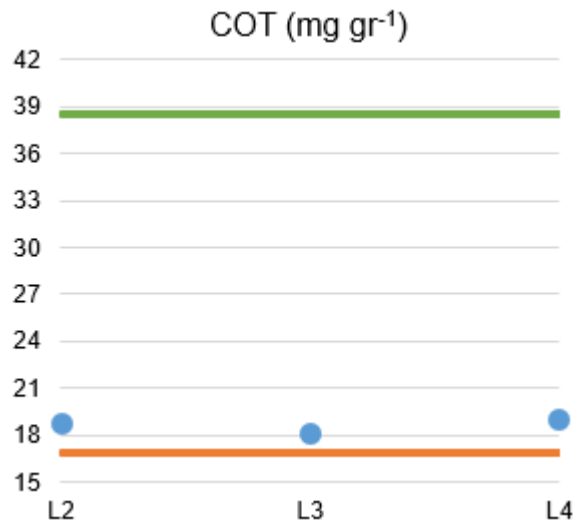


Figura 5: Gráficos combinados de líneas y puntos los parámetros físicos y químicos Est.R, y COT con sus respectivas unidades. La línea horizontal verde indica el valor umbral del sitio conservado cuasi prístino (Parque) y la línea horizontal naranja el valor umbral del sitio disturbado de agricultura convencional (AC).

En este caso, y en comparación con los microbiológicos, se destaca que el sitio de referencia Parque presentó valores muy elevados y distantes los demás sitios. Para todos los casos las medias obtenidas para los sitios bajo manejo agroecológico se ubicaron por encima de las medias del sitio AC.

Considerando que en el análisis exploratorio de los datos se observó que, en general, el sitio de referencia Parque presentó medias elevadas y muy distantes de los demás sitios, es que se decidió llevar a cabo diferentes análisis multivariados omitiendo este sitio. De esta manera, se aspiró a indagar sobre posibles mayores diferencias entre los sitios con manejo agroecológico respecto a AC, ya que los mismos presentan valores medios en un rango cercano.

Análisis de componentes principales

La estadística multivariada es usada para describir y analizar observaciones multidimensionales obtenidas al relevar información sobre varias variables para cada una de las unidades de estudio (Di Rienzo *et al.*, 2019). Una técnica de análisis multivariado es el Análisis de Componentes Principales (ACP) que permite analizar la interdependencia de variables métricas y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos. El ACP propone encontrar, con mínima pérdida de

información, un nuevo conjunto de variables (componentes principales) no correlacionadas que serán una combinación de las variables originales. Cada variable será representada por un vector, definido por la correlación existente entre la propiedad del suelo y la componente principal considerada. El coseno del ángulo resultante entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas. Las variables correlacionadas positivamente se encuentran cercanas entre sí, es decir, forman un ángulo cercano a 0° y las correlacionadas negativamente se ubican en sentido opuesto y para el caso de las no correlacionadas se formarán ángulos de 90° (Palacio *et al.*, 2020). El ACP y los gráficos conocidos como Biplot son técnicas comúnmente utilizadas para la reducción de dimensiones que permiten examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las variables. Los Biplots permiten identificar asociaciones entre observaciones, entre variables y entre observaciones-variables (Di Rienzo *et al.*, 2019).

Se realizaron ACP y Biplots (Figuras 6 y 7) para las dos épocas de muestreo por separado. Las variables incluidas para el análisis fueron: CBM, FDA, Ffsa, Asasa y Bgasa como indicadores microbiológicos, Est.R y COT como indicadores físicos y químicos. Los sitios incluidos corresponden a: transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de cobertura (L2); transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, predominancia de cultivos de grano (L3); transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4) y agricultura convencional (AC). Además, bajo las Figuras de los Biplots correspondientes a cada muestreo, se indicaron las tablas con los respectivos valores de los auto-vectores de cada variable en las diferentes componentes principales (Tablas 7 y 8).

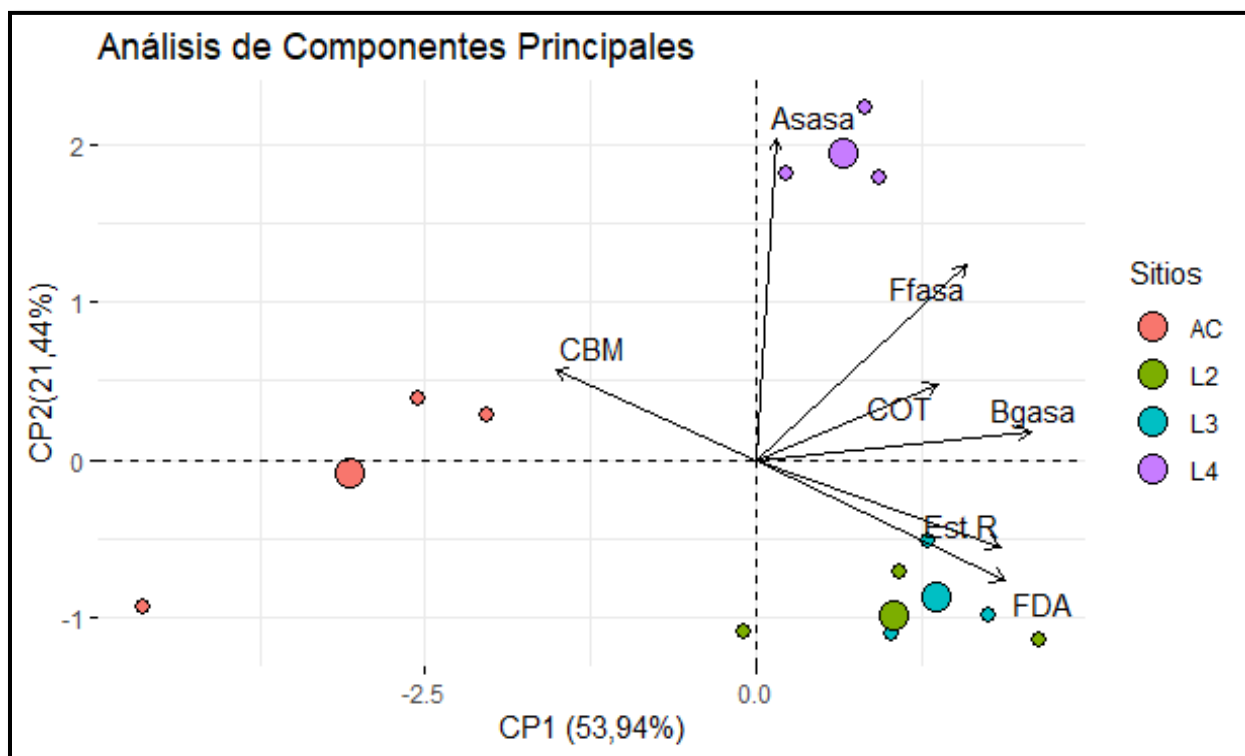


Figura 6: Biplot de Análisis de Componentes Principales correspondiente al muestreo de mayo, donde CP1: componente principal 1, CP2: componente principal 2. Cada sitio está representado por círculos de colores, en los cuales el de mayor tamaño corresponde al promedio de las réplicas de muestreo.

Tabla 7: Valores de los autovectores de cada variable en las componentes principales.

Variables	CP1	CP2
CBM	-0,69	0,26
FDA	0,86	-0,34
Ffsa	0,72	0,56
Asasa	0,07	0,93
Bgasa	0,95	0,08
COT	0,63	0,22
Est.R	0,84	-0,25

El ACP arrojó que la CP1 explicó el 53,94% de la variancia y la CP2 el 21,44%, en total entre ambas componentes se explicó el 75,38% de la variabilidad total de los datos.

El valor de cada uno de los autovectores presenta la contribución relativa de cada variable en las dos componentes principales. Para la CP1, los autovectores de las variables FDA, Ffsa, Bgasa, COT y Est.R presentaron valores elevados y positivos, por lo tanto, significa que dichas variables han tenido mucho peso en definir la CP1. A esta nueva componente le corresponderán valores positivos cuando las variables analizadas presenten valores elevados. A su vez, la CP1 separa los sitios de manejo agroecológico del sitio AC, asociándose significativa y positivamente las variables mencionadas con los primeros. Contrariamente los valores negativos y de valores absolutos altos nos explican las diferencias en el semieje negativo de la CP1, tal como sucede para CBM, que presentó un valor elevado y negativo para esta componente. Los puntos rojos, correspondientes al sitio AC, en la CP1 se vinculan fuertemente con la variable CBM ya que se ubican en el semieje negativo de la componente para el cual vimos que el autovector de esta variable era el de mayor peso y negativo. En el caso de la CP2, sólo las variables Asasa y Ffsa presentaron autovectores positivos y elevados, por lo tanto, indican que han tenido mucho peso para definir esta nueva componente. El sitio L4 está más fuertemente asociado a Asasa y Ffsa. Además, la CP2 separa a este sitio del L2 y L3, vinculándose estos últimos a las variables FDA y Est.R.

Como ya quedó expresado, el gráfico biplot a su vez muestra las correlaciones entre las variables. Se observó una correlación positiva entre Est.R y FDA, y una correlación negativa entre FDA y CBM, al igual que Est.R y CBM según el grado de los ángulos formados entre los vectores. Se observó una correlación nula entre CBM y Ffsa y Ffsa-FDA. Por último, Ffsa-Bgasa-COT, combinadas de a pares, presentaron una estrecha y positiva correlación.

En síntesis, mediante el gráfico en dos dimensiones se presentó la combinación de las siete variables originales, facilitando la interpretación de este conjunto de gran cantidad de datos. Los sitios L2 y L3 presentan características similares en cuanto a sus variables, y a su vez tienen altos valores para Est.R y FDA. En cambio, el sitio L4 se diferenció de aquellos y presentó altos valores para la variable Asasa y Ffsa. AC presentó valores bajos para todas las variables analizadas exceptuando a CBM.

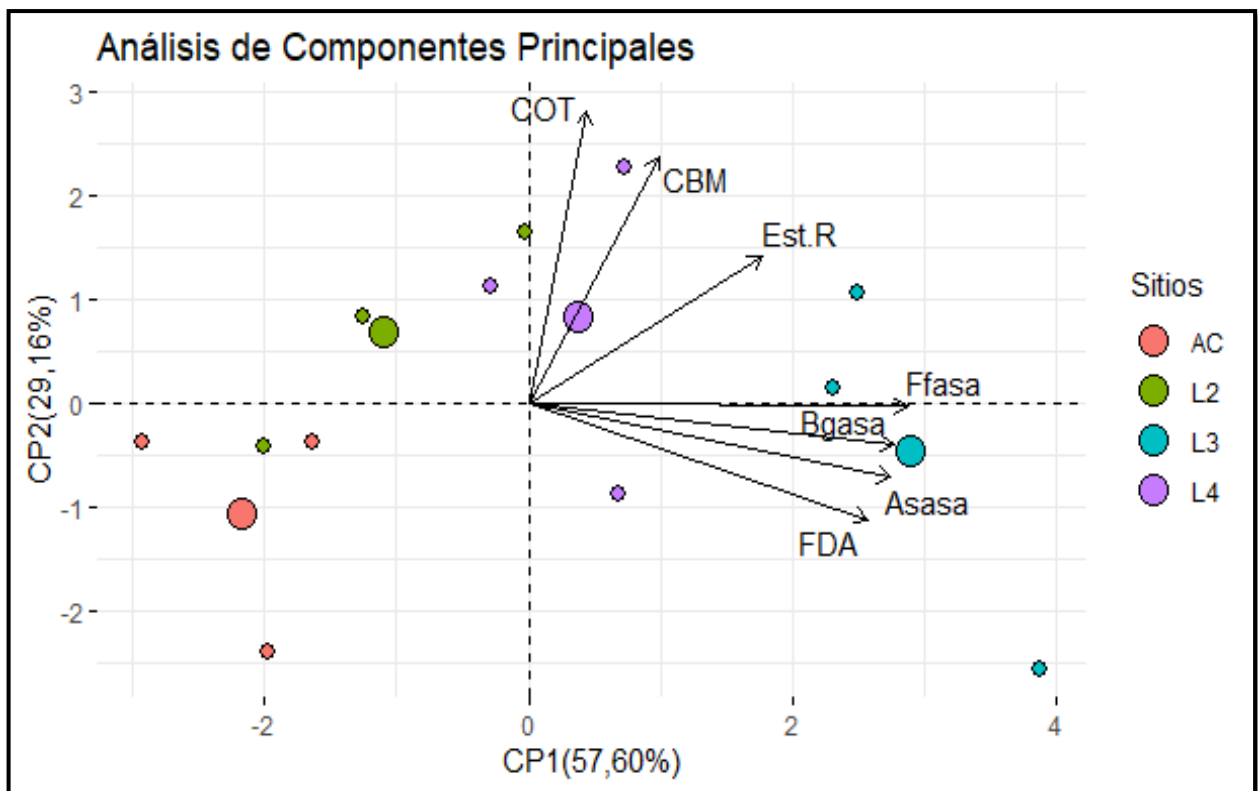


Figura 7: Biplot de Análisis de Componentes Principales correspondiente al muestreo de noviembre, donde CP1: componente principal 1, CP2: componente principal 2. Cada sitio está representado por círculos de colores, en los cuales el de mayor tamaño corresponde al promedio de las réplicas de muestreo.

Tabla 8: Valores de los autovectores de cada variable en las componentes principales.

Variables	CP1	CP2
CBM	0,33	0,81
FDA	0,88	-0,38
Ffsa	0,98	-0,01
Asasa	0,94	-0,24
Bgasa	0,94	-0,13
COT	0,15	0,96
Est.R	0,69	0,48

El ACP arrojó que la CP1 explicó el 57,60% de la variancia y la CP2 el 29,16%, por lo tanto, en total entre ambas componentes explicaron el 86,76% de la variabilidad total de los datos.

Para la CP1, los autovectores de todas las variables presentaron valores positivos y elevados para esta componente, lo que significa que dichas variables han tenido mucho peso en definir la CP1, con excepción de COT y CBM que, si bien presentaron valores positivos, estos fueron muy bajos para dicha componente. A su vez la CP1 separa los sitios L3 y L4 ubicados a la derecha del semieje positivo de esta componente, de L2 y AC situados a la izquierda del semieje negativo. El sitio L3 presentó una fuerte asociación con las variables FDA, Asasa, Bgasa, Ffsa y Est.R y L4 con CBM, COT y Est.R. Caso contrario a lo hallado para los sitios L2 y AC, los cuales no se vieron asociados a ninguna variable, siendo esto más acentuado para AC. En el caso de la CP2, los parámetros CBM, COT y Est.R presentaron autovectores positivos y elevados, influyendo en la definición de esta segunda componente. Se observó una correlación nula entre COT y las variables microbiológicas Bgasa, Asasa y FDA, lo mismo se observó entre CBM y FDA. Las combinaciones Bgasa-Asasa y Asasa-Ffsa presentaron una estrecha correlación positiva.

En el muestreo de noviembre se observó que la suma de las dos componentes principales explicó un 11,38% más de la variabilidad de los datos, respecto al muestreo de mayo. En ambos Biplots se puede destacar que AC siempre se situó sobre el semieje negativo de la CP1 asociándose con una (mayo) o ninguna (noviembre) de las variables incluidas en este análisis. En los sitios con manejo agroecológico se observó en mayo que, el sitio L2 presenta características similares, en asociación a variables, respecto al sitio L3. En el Biplot de noviembre, este comportamiento no se observó por igual, ya que L2 se alejó de los sitios agroecológicos compartiendo características más similares con el sitio AC.

Análisis de Cluster

El agrupamiento de objetos multivariados tiene como propósito identificar el agrupamiento natural de las observaciones en estudio. Las técnicas de clasificación basadas en agrupamientos implican la distribución de las unidades de estudio en clases o categorías, de tal manera que cada clase (conglomerado) reúne unidades cuya similitud es máxima bajo algún criterio. Los objetos en un mismo grupo

comparten el mayor número permisible de características y los diferentes grupos tienden a ser distintos. Estos agrupamientos se hacen en función de algoritmos que permiten identificar clases existentes en relación a atributos o características (Di Rienzo *et al.*, 2019).

Los agrupamientos jerárquicos se muestran por medio de dendogramas (diagramas de árboles de dos dimensiones), que muestran las relaciones jerárquicas entre las unidades de estudio según valores de similitud. Las ramas de los árboles representan los conglomerados, las cuales se unen en nodos cuya posición en el eje de distancias indica el nivel en el cual ocurre la fusión. El nodo donde todas las entidades forman un único conglomerado, se denomina nodo raíz (Di Rienzo *et al.*, 2019; Palacio *et al.*, 2020).

Para este análisis se utilizó el método de Ward para la elaboración de los dendogramas, el cual se basa en un método de medias o centroides que busca minimizar la variación dentro de cada grupo respecto a los nuevos grupos que se van formando. La distancia de una unidad de estudio al centroide (promedio) del grupo respecto a cada variable original es 0. En cada paso este método encuentra un par/grupo de unidades de estudio que minimizan la distancia euclidiana entre ellas y los centroides de su grupo correspondiente (Palacio *et al.*, 2020).

Se realizaron tres dendogramas para este estudio, uno para cada muestreo (Figura 8 y 9) y uno con ambos muestreos en conjunto (Figura 10), utilizando el método de Ward. Se incluyeron todas las variables físicas, químicas y biológicas estudiadas. Los sitios incorporados para este estudio fueron: transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, con predominancia de cultivos de cobertura (L2); transición agroecológica: rotación agrícola-ganadera, predominancia de cultivos de grano (L3); transición agroecológica: rotación agrícola, con eventual pastoreo (L4) y agricultura convencional (AC). Cada sitio fue rotulado por sus triplicados por medio de las letras "a", "b", "c".

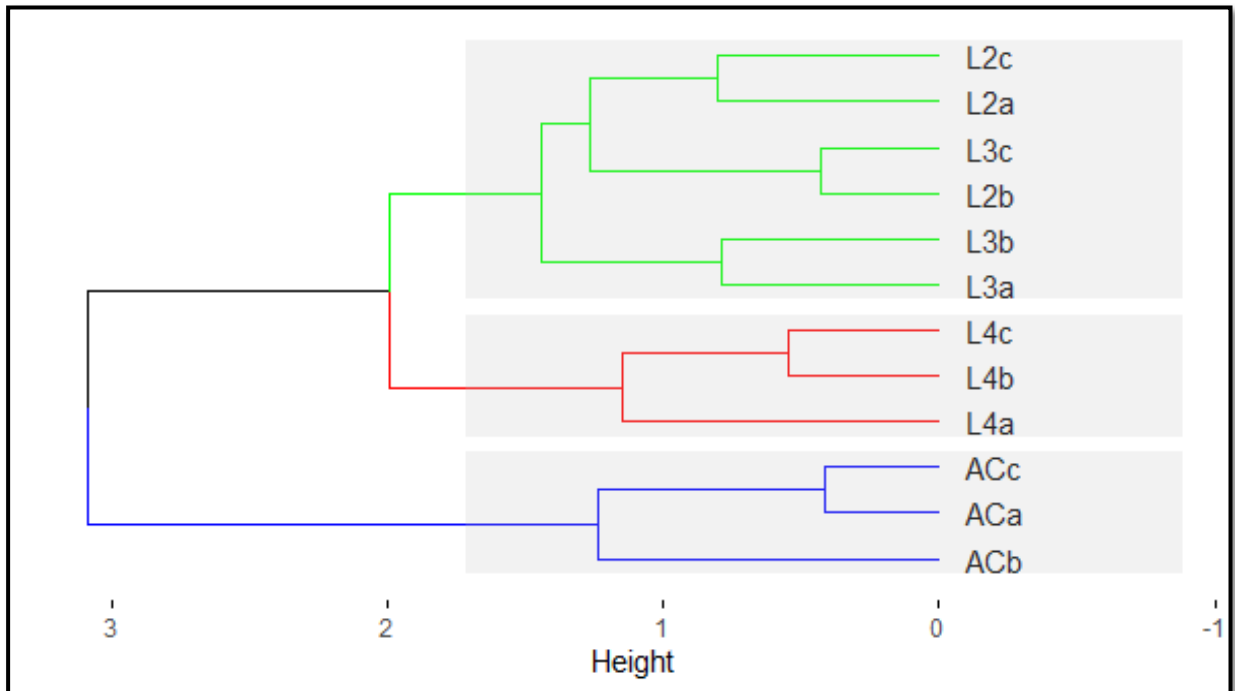


Figura 8: Dendrograma basado en el método de Ward correspondiente al muestreo de mayo.

El dendrograma correspondiente al muestreo de mayo, muestra que a bajos niveles de similitud se formaron dos grandes grupos: uno conformado por el sitio de agricultura convencional (grupo azul), y el otro por los sitios con manejos agroecológicos. Estos últimos a su vez se segregaron en dos grupos: sitio L4 (grupo rojo) separado de los demás sitios L2 y L3, que conformaron el grupo verde.

Este análisis multivariado es complementario y coincidente a lo observado en el ACP (Figura 6). En este último se observó que los sitios AC y L4 presentaron características diferentes entre ellos y de los demás sitios, en cuanto al comportamiento de las variables medidas, por lo cual en el dendrograma se vieron agrupados por separado formando cada uno un conglomerado diferente: AC (grupo azul) y L4 (grupo rojo). Contrariamente, los sitios L2 y L3 presentaron características similares en el ACP, lo cual en el dendrograma se reflejó por la formación de un grupo único (verde) que incluyó a ambos sitios presentando máximas similitudes entre sí.

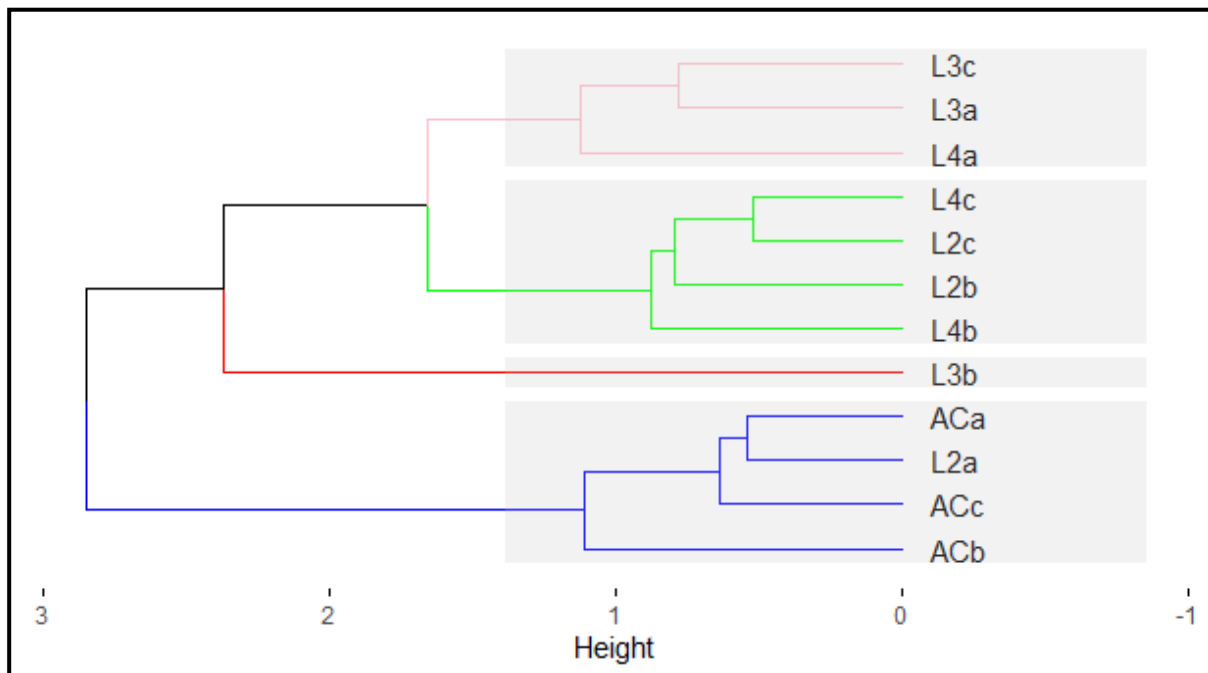


Figura 9: Dendrograma basado en el método de Ward correspondiente al muestreo de noviembre.

Para el muestreo del mes de noviembre, la formación de conglomerados por sitios se expresó de manera diferente con respecto al mes de mayo (Figura 8). A bajos niveles de similitud se visualiza la formación de dos grandes grupos, en los cuales el grupo azul (mayoritariamente AC) se encuentra separado del resto. En los sitios con manejo agroecológico no se logró una separación precisa, sino que el grupo rojo fue solo conformado por L3b separándose del resto (conglomerado verde y rosa), presentando cada uno máximas similitudes entre sí.

Al igual que lo expresado para el muestreo de mayo, lo explicado acá por medio del dendrograma es complementario y coincidente a lo observado en el ACP. En este último se demostró que el sitio L2 presentó características similares tanto con el sitio AC como con L4, tal como se reflejó en el dendrograma donde se agrupó con L4 (grupo verde) como con AC (grupo azul). En el ACP, el sitio L3 presentó valores altos para muchas de las variables y se ubicó de manera alejada de los demás sitios, siendo el más cercano L4. En el dendrograma, se observa un agrupamiento entre los sitios L4 y L3 (conglomerado rosa).

Considerando que en ambos ACP (Figuras 6 y 7) se observó que el sitio AC siempre se diferenció, en cuanto a sus características, de los sitios con manejo agroecológico se decidió realizar un tercer dendrograma donde se incluyeron los valores de las variables obtenidos en ambos muestreos y utilizados en los dendrogramas anteriores,

con el fin de comprobar esta posible separación de sitios independientemente de la época de muestreo.

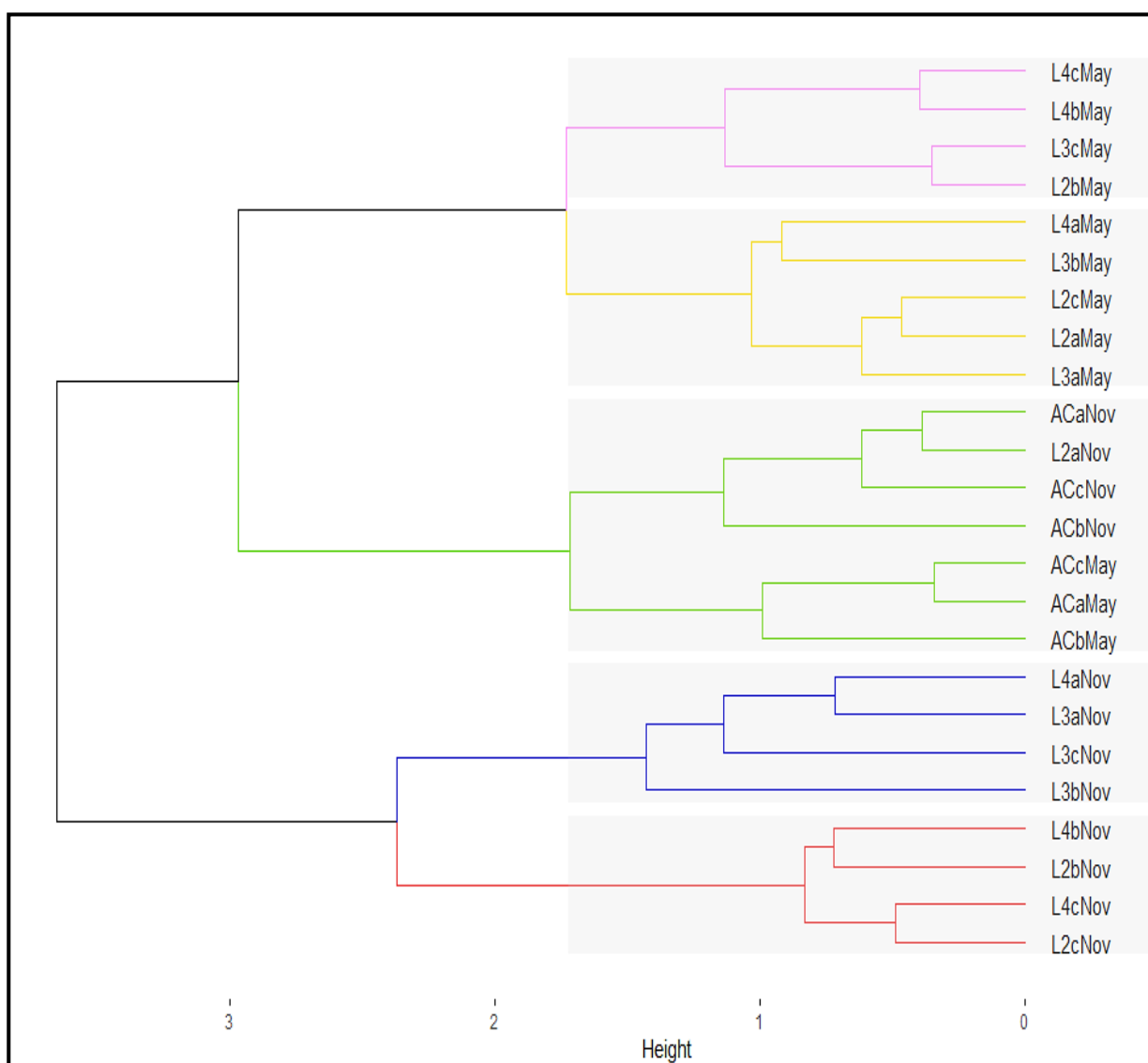


Figura 10: Dendrograma basado en el método de Ward correspondiente a ambos muestreos en conjunto.

En una primera instancia se puede destacar que el sitio AC presentó un comportamiento característico respecto a los demás sitios, donde el muestreo correspondiente a mayo como el de noviembre comparten similitudes entre sí formando un conglomerado único (grupo verde), lo cual resulta relacionado y coincidente con lo visto hasta aquí en los ACP.

Por otro lado, en cuanto a los sitios con manejo agroecológico, la separación de grupos se dio principalmente por la época de muestreo más que por el manejo en sí

mismo. Globalmente para estos sitios, la mayor disimilitud se da entre el muestreo de mayo (grupos rosa y amarillo) y el muestreo de noviembre (grupos azul y rojo).

Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. Asume valores entre -1 (correlación negativa perfecta) y +1 (correlación positiva perfecta), el valor igual a 0 indica que no hay correlación y las variables por lo tanto son independientes. En la diagonal principal se observan las correlaciones de cada variable consigo misma, el cual siempre es 1 y no tienen ningún valor interpretativo (Balzarini *et al.*, 2012; Di Rienzo *et al.*, 2019; Palacio *et al.*, 2020).

Se evaluaron las correlaciones presentes entre variables por medio de una Correlación de Pearson (Figura 11), en la cual se incluyeron los dos muestreos para un mismo análisis, todos los parámetros microbiológicos y COT y Est.R como parámetros químicos y físicos. Las correlaciones ideales y positivas se representan por medio del valor (+1), y para este tipo de gráfico mayores valores de correlación se corresponden con mayor tamaño de la figura del círculo y mayor tono azul. Contrariamente cuando la correlación existente sea negativa se expresa por valores de (-1) o cercanos a ellos y en este caso se representan por medio de círculos grandes y rojos. De no existir correlación, es decir, que las variables son independientes se asumen valores igual a 0.

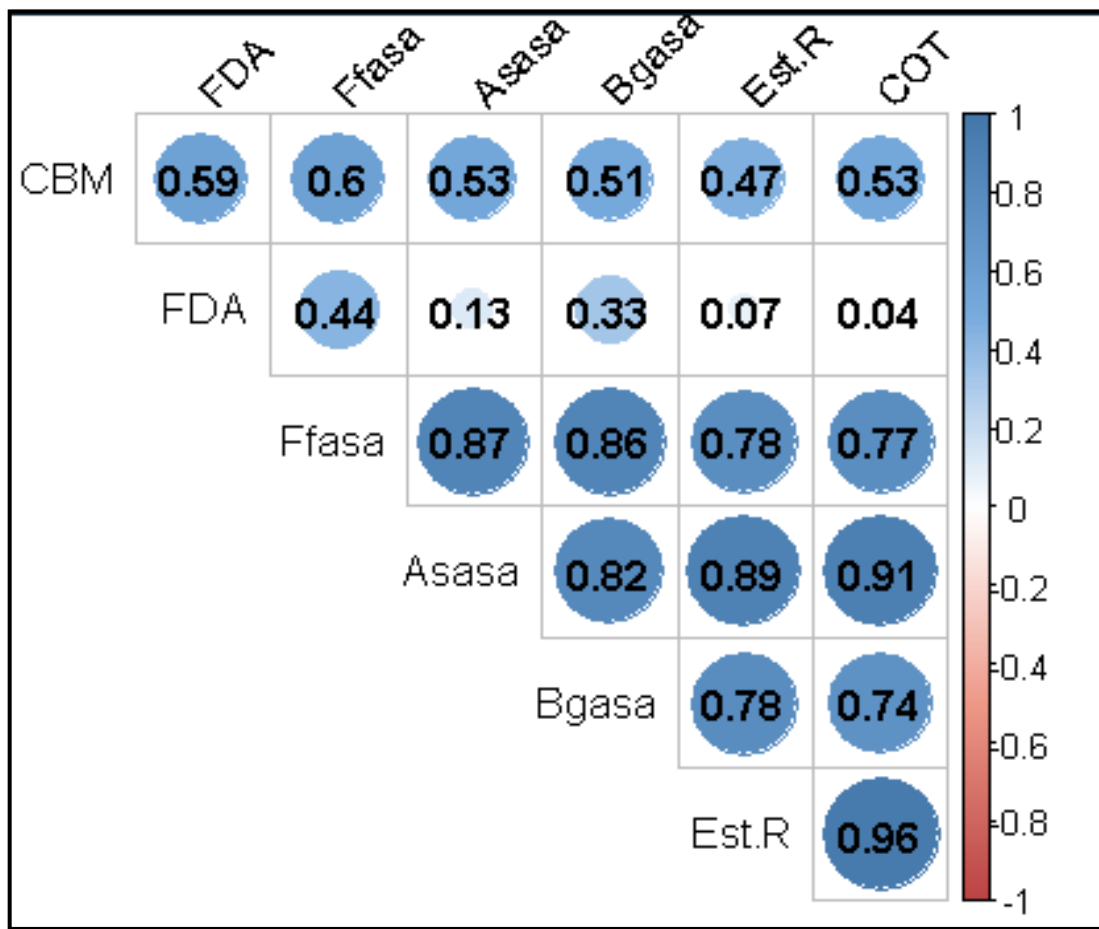


Figura 11: Correlación de Pearson para los datos obtenidos en ambos muestreos.

En la Figura 11 podemos observar que, para este trabajo, en la mayoría de las comparaciones, se hallaron correlaciones positivas entre variables. Las enzimas presentaron correlaciones positivas y altas entre ellas y con el resto de las variables, con algunas excepciones para FDA. En el caso de todas las combinaciones anteriores el valor de coeficiente de correlación siempre fue superior a 0,50, destacándose el valor de correlación entre enzimas (superiores a 0,80). CBM presentó correlaciones medias con valores entre 0,47 y 0,60 con todas las variables incluidas para este análisis, siendo el mayor índice el relacionado con Ffasa (0,60). Para el caso de FDA las relaciones fueron muy débiles comparado con cualquier otra variable, con valores cercanos a 0 en el caso de Est.R, COT y Asasa indicando que no existe correlación entre FDA y ninguna de ellas. Sin embargo, FDA y Ffasa presentaron una correlación de nivel intermedia y positiva con un valor de 0,44.

Las variables físicas, químicas y biológicas correlacionaron positiva y fuertemente, destacando que Asasa fue la que presentó los coeficientes más elevados (valores

entre 0,89 y 0,91). Las variables Est.R, y COT se correlacionaron positivamente entre sí, con una correlación de 0,96.

DISCUSIÓN

Actualmente, en nuestro país, son muy escasos los antecedentes bibliográficos acerca de la evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores edáficos, principalmente microbiológicos, en sitios donde se implementa agroecología extensiva. Posiblemente esto sucede a causa de que este nuevo paradigma productivo se encuentra en pleno proceso de evolución y ha sido adoptado más rápidamente en producciones intensivas, especialmente en horticultura.

Uno de los inconvenientes que pueden limitar el estudio del impacto de las prácticas agrícolas por medio de las propiedades biológicas es el alto grado de variabilidad espacial y temporal que presentan las mismas, dada las condiciones climáticas, estacionalidad, ubicación geográfica, factores pedogenéticos, prácticas culturales. A su vez, es dificultoso comparar los valores obtenidos de diferentes grupos de investigación, ya que a veces se obtienen con protocolos experimentales con algunas diferencias entre sí (Gil-Sotres *et al.*, 2005; Calbrix *et al.*, 2007). Por lo cual se aspira realizar una discusión con la mayor solvencia posible para los datos obtenidos en esta tesina.

Melero *et al.* (2006) y Alvear (2007) exponen que la actividad microbiana está regulada por las condiciones físicas y químicas, aunque los factores limitantes principales son la temperatura y la humedad. Estos parámetros afectan indirectamente las actividades enzimáticas al influir en el crecimiento microbiano y disponibilidad del sustrato (Li y Sarah, 2003). En este estudio se observaron, mayores valores en términos absolutos en las determinaciones microbiológicas para la época primavera-estival en comparación con la época otoño-invernal. Esto puede atribuirse a que en el muestreo correspondiente al mes de noviembre la temperatura promedio del suelo fue de 22,1°, siendo superior a la de mayo (14,6°C). La mayoría de los microorganismos del suelo son considerados mesófilos, donde el rango de temperatura de crecimiento abarca entre 15-45°C con un óptimo entre 30-40°C (Frioni, 2011), siendo la temperatura media del suelo del mes de noviembre la que más se aproxima al óptimo. Además, las precipitaciones registradas en el año de estudio fueron de 1181,9 mm (Figura 3), lo cual se puede considerar como un año normal si lo analizamos en base a un mapa de isohietas de la Argentina, donde la localidad de Oliveros se encuentra entre las isohietas de 1000 mm y 1250 mm (Oliva, 2019).

La afirmación anterior, respecto a la mayor actividad microbiana registrada en la época primavero-estival, es coincidente con lo hallado por Alvear (2007), quien estudió actividades biológicas en un suelo de bosque templado en Chile, y Ferreras *et al.* (2015), que estudiaron la sensibilidad de indicadores edáficos en ensayos de intensificación agrícola sustentable sobre un suelo Argiudol Típico (Santa Fe, Argentina). En sus trabajos, estos autores demostraron la mayor actividad enzimática en primavera debido a las condiciones más óptimas para el desarrollo microbiano tales como mayores temperaturas y contenido de humedad para dicha época. Existen además otras variables que pueden influir en el crecimiento y actividad microbiana que serán discutidos a continuación.

Los mayores valores absolutos y significativamente diferentes para la mayoría de los parámetros biológicos y en ambos muestreos se observaron en el sitio de referencia Parque. Hallazgos similares fueron publicados por Ferreras *et al.* (2009), (2015), quienes observaron que suelos inalterados, tomados como referencia, presentaron valores estadísticamente superiores en biomasa y actividad microbiana en comparación con sistemas agrícolas convencionales. La cobertura superficial, la vegetación, la ausencia de labranza y el mayor carbono orgánico en estos sitios de referencia, optimiza las condiciones para el desarrollo de la biomasa microbiana (Alvear, 2007).

Los gráficos combinados de líneas y puntos de la Figura 4, evidenciaron que, para ambos muestreos, los sitios con manejo agroecológicos presentaron aproximadamente en el 76,5% de los casos mayores valores absolutos en los parámetros microbiológicos, en comparación con el sitio de agricultura convencional. Toresani *et al.* (2013) en estudios de monitoreo de indicadores edáficos en diferentes ensayos de rotaciones agrícolas en Argiudoles Típicos en INTA Oliveros e INTA Marcos Juárez, pudieron corroborar que la implementación de la agricultura convencional con baja o nula rotación con gramíneas y sin aporte de cultivos de cobertura, provocó a lo largo de los años el deterioro en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aumentando los procesos de degradación y erosión. Los resultados obtenidos en este trabajo de tesina, indicarían que las prácticas agroecológicas han podido subsanar en cierta medida la calidad biológica de suelos con antecedentes de manejos agrícolas convencionales de largo plazo.

En agroecología, la activación de la biología del suelo se ve promovida por la presencia de policultivos que favorecen los procesos ecológicos de regulación biótica y ciclado de nutrientes (Paleologos *et al.*, 2017). El aumento de los niveles de carbono orgánico, la implementación de coberturas superficiales (fuente de energía y nutrientes para los organismos del suelo), la diversificación de producción con diferentes sistemas radiculares y liberación de exudados rizosféricos, el aporte de materia orgánica por excretas de animales y la restricción de agroquímicos estimulan la actividad microbiana presente en el suelo (Ferrerias *et al.*, 2009; Bortolato *et al.*, 2019). La raíz y la rizosfera son cruciales en estos ecosistemas, ya que regulan la composición y abundancia de poblaciones microbianas por medio de la exudación de raíces y modulan los ciclos biogeoquímicos directa e indirectamente (Philippot *et al.*, 2013). Los principios agroecológicos nombrados anteriormente fueron incorporados en los sitios del Módulo Agroecológico de la EEA INTA Oliveros, reflejándose el efecto de estas prácticas en los resultados de los parámetros microbiológicos obtenidos para estos sitios.

El Mujtar *et al.* (2019) expusieron que los sistemas de agricultura orgánica, que incorporan rotación de cultivos, uso de leguminosas e insumos orgánicos, tienen entre un 32% y un 84% más de actividad enzimática y biomasa microbiana que los sistemas convencionales a escala global. En nuestro trabajo se observó que los sitios de manejo agroecológico presentaron en promedio entre un 26% y 64% más de biomasa y actividad microbiana respecto al sitio AC.

En el caso de CBM, en ambos muestreos en el sitio Parque se observaron mayores valores respecto a los sitios con secuencias de cultivos. En el muestreo de noviembre los sitios de manejo agroecológico presentaron mayores valores absolutos para esta variable en comparación con el sitio de agricultura convencional. Esto es similar a lo reportado por Prager *et al.* (2006) quienes expusieron que el CBM varió significativamente entre manejo agroecológico y convencional en los primeros centímetros del suelo en cultivos de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims.).

El valor de CBM se incrementa a medida que existe mayor disponibilidad de carbono fácilmente degradable (Ferrerias *et al.*, 2015). Los sitios L3 y L4 provenían de un rastrojo de cultivo polifítico de invierno (compuesto por diversas especies de leguminosas, gramíneas y crucíferas) y el sitio L2 de un cultivo compuesto por la leguminosa vicia (*V. sativa*) de baja relación C/N, los cuales aportan abundante

carbono lábil para la descomposición. La los polifíticos que incluyen leguminosas en diferentes proporciones, ponen de manifiesto la importancia de la naturaleza y proporción de las fracciones carbonadas y nitrogenadas que constituyen los restos vegetales aportados al suelo, ya que condicionan la velocidad de descomposición de las mismas. Materiales ricos en N, con una relación C/N menor a 25/1 estimulan una rápida mineralización de la materia orgánica y actividad microbiana lo que se traduce en aporte de nutrientes rápidamente asimilables por las plantas (Frioni, 2011). Los cultivos de cobertura reflejan un mayor retorno de biomasa vegetal y densidad de raíces que son sustrato para los microbios del suelo (Dinesh *et al.*, 2004; Acosta-Martínez *et al.*, 2007).

Respecto a lo mencionado anteriormente, se refuerza que, además de los cultivos polifíticos y de cobertura que estimulan la microflora del suelo, existe otra componente importante atribuida a los pastoreos, donde el ganado vacuno genera un aporte mediante el bosteo y la orina. Cabe destacar que, en promedio, un animal de 400 Kg bostea 24 Kg/día y orina 15 L/día, toda esta deposición se incorpora al suelo incrementando su fertilidad. Además, se genera un alto aporte de los minerales Nitrógeno, Fosforo, Potasio y Calcio (Niemiz, 2019).

Para ambos muestreos, los valores en términos absolutos, de actividad enzimática global y específica fueron mayores en el sitio de referencia Parque y se destaca que en algunos casos fue con significancia estadística respecto a los demás sitios. Ramos Vásquez y Zúñiga Dávila (2008), señalan que la existencia en el suelo de una óptima actividad microbiana es reflejo de buenas condiciones físico-químicas que permiten el desarrollo de los procesos metabólicos microbianos, lo cual puede servir como un indicador del estado general del suelo. La actividad microbiana total es una buena medida general del recambio de materia orgánica, ya que generalmente más del 90% del flujo de energía pasa a través de los descomponedores microbianos. Los microorganismos y las raíces son las principales fuentes de enzimas específicas en el suelo, por lo que los cambios que se puedan producir en la zona de enraizamiento pueden impactar en la ecología y actividad de la comunidad microbiana edáfica. La disminución de la actividad enzimática en suelos cultivados, en comparación con suelos nativos prístinos, refleja reducciones en el contenido de materia orgánica asociadas a prácticas de manejo (Ferrel *et al.*, 1994).

Los valores hallados para FDA en ambos muestreos fueron superiores en los sitios de manejos agroecológicos en comparación con el sitio de agricultura convencional (Figura 4). En contraposición a lo observado por Chavarria *et al.* (2018), donde en su trabajo los valores reportados de FDA se vieron reducidos en los manejos agroecológicos concluyendo que la diversificación de cultivos y el estiércol de ganado incorporados no aportaron suficientes fuentes de energía como para estimular la actividad microbiana. En el citado trabajo se utilizaron como cultivos principales soja (*G. max*) y maíz (*Z. mays*) y como cultivos de cobertura trigo (*T. aestivum*) y arveja (*V. sativa*). Esto nos permite reflexionar que las características aparejadas a la búsqueda del mayor tiempo de ocupación del suelo por diferentes cultivos y al aumento de la biodiversidad por medio de polifíticos, cultivos de cobertura e intersembras, que se implementan en los sitios dentro del Módulo Agroecológico, son potencialmente favorables para activar la flora microbiana.

Respecto a la actividad enzimática específica, las enzimas hidrolíticas exocelulares implicadas en los ciclos del C, N, S y P, pueden estabilizarse mediante la unión a coloides formando complejos que le confieren protección y contribuye a la estabilización de enzimas (Trasar-Cepeda *et al.*, 2008). Al igual que la actividad enzimática global, los valores hallados para las enzimas Ffsa, Bgasa y Asasa fueron mayoritariamente superiores en los sitios con manejos agroecológicos en comparación con el sitio de agricultura convencional.

Las actividades enzimáticas aumentan con el incremento de la materia orgánica fresca y por el contenido del carbono del suelo, por medio del exudado de oligosacáridos y otros compuestos orgánicos provenientes de la mineralización (Alvear, 2007). Se afirma que el uso de cultivos de cobertura promueve la abundancia de raíces y la diversidad de funciones microbianas, que estimulan la actividad de las enzimas específicas (Dinesh *et al.*, 2004; Chavarria *et al.*, 2018), las cuales son un buen indicador de la calidad y cantidad de materia orgánica en el suelo, ya que aumenta su actividad en base a los incrementos de este parámetro (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Ochoa *et al.* (2007), afirman que la introducción de ganado en agricultura ecológica, denominada así por la obtención de alimentos de calidad, respetando el medio ambiente, conservando la fertilidad edáfica y sin aplicación de productos de síntesis química, ofrece un incremento de las actividades enzimáticas a causa del aporte extra de materia orgánica proveniente de estiércol animal. Todo lo anterior se correlaciona con las concentraciones más elevadas, aunque estadísticamente no significativas, de

COT y MO medidas en los sitios de manejo agroecológico en comparación con el sitio de agricultura convencional y a su vez a la implementación de cultivos de cobertura, polifíticos y ganado vacuno incorporados en el manejo de los sitios dentro del Módulo Agroecológico.

En relación a los indicadores físicos y químicos podemos mencionar que, el contenido de COT del sitio de referencia Parque fue el más elevado y estadísticamente significativo respecto a los demás sitios. Esto es coincidente con lo expuesto por Duval *et al.* (2015) que analizaron parámetros físicos en Argiudoles Típicos y encontraron niveles de COT mayores en el área natural (utilizada como sitio de referencia), justificándolo por la mayor masa de raíces y biomasa aérea de las plantas existentes, en relación a suelos cultivados anualmente. Se considera que los niveles más elevados de carbono orgánico se encuentran en pastizales naturales y cuando estos son cultivados se observa una rápida disminución del mismo (Sainz Rozas *et al.*, 2011). Ferreras *et al.* (2015), atribuyen esta disminución a la perturbación provocada por el cultivo y prácticas de manejo en general que promueven la mineralización de la materia orgánica del suelo, como así también al menor aporte de residuos orgánicos al suelo que contribuyen a la reducción de las fracciones carbonosas. En nuestro trabajo esto se vio reflejado en los sitios donde se implementan cultivos, provenientes de un suelo con una trayectoria de más de más de 30 años bajo agricultura convencional.

Sainz Rosas *et al.* (2001), argumentan que la intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones observados en la Región Pampeana, han producido un deterioro de los niveles de COT del suelo. En algunos casos dependiendo del tipo y textura del suelo, presentan sólo el 50% de su nivel original. En nuestro trabajo se observa que, los sitios bajo cultivo presentaron menos del 50% respecto al sitio de referencia Parque que representa un suelo casi prístino, libre de actividades agropecuarias.

Al obviar el sitio Parque en la Tabla 6, se observa que los demás sitios (L2, L3, L4 y AC) no mostraron diferencias estadísticas entre ellos. Sin embargo, aquellos donde se implementan manejos agroecológicos registraron valores absolutos mayores. Algunos autores hallaron que los tratamientos que incorporan cultivos de cobertura como el trigo (*T. aestivum*) manifiestan mayores concentraciones de carbono orgánico (Beltran *et al.*, 2016). Los sitios agroecológicos tienen un historial de mayor ocupación

del suelo con cobertura viva en comparación con AC, ya que los primeros emplean cultivos de cobertura durante gran parte del año.

La materia orgánica, es una variable ampliamente utilizada como indicador de calidad de suelo dada la influencia que presenta en algunos indicadores físicos, químicos y biológicos (Galantini y Suñer, 2008). La dinámica de la materia orgánica del suelo juega un papel clave en el funcionamiento y los servicios del ecosistema (El Mujtar *et al.*, 2019). En condiciones naturales el nivel de materia orgánica de un suelo es función del clima, vegetación, topografía, material madre, entre otros (Morón, 2001).

En este trabajo, el contenido de materia orgánica fue estadísticamente mayor en el sitio de referencia Parque, siendo coincidente con lo expuesto por Ferrel *et al.* (1994) que hallaron mayores contenidos de materia orgánica en suelos nativos. Desde el punto de vista productivo y la calidad del suelo, la dinámica de la materia orgánica aporta poca información para las prácticas agronómicas de corto plazo (Galantini y Suñer, 2008). Sin embargo, por medio de información brindada desde INTA Oliveros, respecto al registro de materia orgánica medida en 2017 (L2: 2,7% - L3: 2,52% - L4: 2,46%), se puede decir que en el lapso de dos años se observaron incrementos en el contenido de dicha variable entre 16,67 y 24,53% en promedio en los sitios con manejo agroecológico.

Estos sitios presentaron concentraciones mayores de materia orgánica, pero no significativas en comparación con al sitio AC, similar a lo hallado por Prager *et al.* (2006), que encontraron contenidos de materia orgánica significativamente mayores en manejos agroecológicos en cultivos de maracuyá (*P. edulis*) comparados con convencionales. Prácticas incorporadas por la agroecología, como la inclusión de cultivos de cobertura y la incorporación de rastrojos de cultivos, permiten reducir la mineralización de la materia orgánica del suelo, aumentando las entradas de carbono y nitrógeno y mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Irizar *et al.*, 2013). En sistemas agrícolas convencionales, el ingreso de materia orgánica suele verse afectado como consecuencia de la eliminación de rotaciones, fertilizaciones químicas excesivas, el control de adversidades con fitosanitarios y la ausencia de ganado (Paleologos *et al.*, 2017).

En el caso de Est.R y Agr.E se ratifica que el Parque fue superior a los demás sitios, los cuales disminuyeron notablemente su valor respecto a éste. Bonel *et al.* (2005), compararon modificaciones de la materia orgánica en Argiudoles típicos bajo

diferentes prácticas de manejo y situaciones de máximo estado de conservación, utilizados como referencia, en los cuales también hallaron una clara diferencia en el valor de Est.R entre dos situaciones contrastantes de suelo bajo cultivo respecto a suelo no cultivado, a favor de este último.

La agregación del suelo está determinada por las moléculas que conforman la materia orgánica, las poblaciones microbianas y la formación de complejos órgano-minerales (De *et al.*, 2012). Alvarez *et al.* (2008), en su trabajo, evaluaron la estabilidad de agregados como indicador de calidad en Argiudoles típicos sometidos a distintos usos de suelo e intensidades de manejo, en el cual atribuyeron la mayor estabilidad de agregados a parcelas con alto contenido de materia orgánica, mientras que la menor estabilidad coincide con bajos contenidos de materia orgánica. Los mayores valores (pero no estadísticamente diferentes) de Est.R y Agr.E observados en los sitios L2, L3 y L4 coincide con los mayores contenidos de materia orgánica en comparación con el sitio AC, el cual presentó tanto los valores más bajos (pero no estadísticamente diferentes) de agregados estables como también de materia orgánica. Las estrategias agroecológicas se vinculan con lo expuesto por Eiza *et al.* (2006), donde afirman que las prácticas de manejo que incrementan la cobertura vegetal e implementan pasturas con sistemas radicales fibrosos y extensos, contribuyen a la agregación y estabilización del suelo.

El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y disponibilidad de nutrientes (Di Ciocco *et al.*, 2014). En los suelos agrícolas de la Región Pampeana la mayoría de ellos presenta valores óptimos para la actividad agrícola entre 6 a 7,5 (Sainz Rozas *et al.*, 2011). SiSINTA (2020), informa un valor de pH de 6,0 para el horizonte superficial de un Argiudol típico. Los valores de pH mostrados en este trabajo (Tabla 6) se mantuvieron cercanos a este óptimo valor representativo para estos suelos. Se puede destacar un ligero aumento de este valor en los sitios con manejo agroecológico, respecto al reportado al momento de inicio del Módulo Agroecológico en 2015 de un valor de pH de 5,45.

Se observaron comportamientos diferentes entre los indicadores edáficos evaluados para este trabajo. Si bien el Módulo Agroecológico lleva relativamente pocos años de implementación, los indicadores biológicos involucrados en el funcionamiento del

suelo respondieron más sensiblemente a los diferentes manejos agrícolas en comparación con los indicadores físicos y químicos. Es decir, los parámetros microbiológicos permitieron detectar diferencias entre sitios (Tablas 4 y 5), a los 4 años desde la implementación, cuando los físicos y químicos no lograron marcarlas (Tabla 6). Varios autores, que han trabajado con indicadores edáficos en diferentes rotaciones agrícolas y tipos de suelo, como por ejemplo en Argiudoles típicos de la provincia de Córdoba y Buenos Aires, Vertisoles, Molisoles y Alfisoles de Entre Ríos, concuerdan que los indicadores biológicos se consideran de señal temprana y potenciales para estimar la calidad del suelo (Toresani *et al.*, 2009; Sterren *et al.*, 2011; Di Ciocco *et al.*, 2014; Ferreras *et al.*, 2015). Chavarria *et al.* (2018) exponen que, dada la capacidad de las comunidades microbianas para responder rápidamente a los cambios de uso de la tierra, se pueden emplear con el objetivo de realizar comparaciones entre efectos de manejos agroecológicos respecto a convencionales, tal como se planteó en este estudio.

Los parámetros físicos y químicos se correlacionaron alta y positivamente entre sí y a su vez estos con los biológicos, exceptuándose FDA (Figura 11). Alvarez *et al.* (2008), señalan la existencia de esta gran relación entre estabilidad estructural y carbono del suelo, dada principalmente a la acción de los compuestos orgánicos como agentes cementantes de los microagregados. Podemos mencionar una estrecha relación positiva entre Est.R y casi todas las variables microbiológicas, atribuida a productos de descomposición microbiana y unión mecánica de las partículas del suelo por crecimiento de hongos (Acosta-Martínez *et al.*, 2007). Por ejemplo, el valor hallado de correlación entre Est.R y Ffsa de 0,78 en nuestro trabajo es coincidente con lo expuesto por Toresani *et al.* (2013), que informan una correlación positiva entre dichas variables con un coeficiente de 0,61.

En nuestro estudio, las variables COT y CBM presentaron una correlación positiva de 0,53. Dinesh *et al.* (2004), expresan que es una relación positiva esperable ya que ambos son parte de la materia orgánica. Esto es coincidente con autores como Melero *et al.* (2006), que evaluaron propiedades químicas y bioquímicas bajo manejo convencional y orgánico e Irizar *et al.* (2013), que estudiaron el impacto a largo plazo de la labranza cero en rotaciones intensificadas de cultivos en diferentes fracciones de materia orgánica del suelo en la Región Pampeana; y en ambos trabajos se encontraron correlaciones positivas entre dichas variables. Asimismo, las enzimas Ffsa, Asasa y Bgasa obtuvieron correlaciones significativas con la variable COT. La

actividad enzimática aumenta al incrementarse el contenido de carbono orgánico debido a la dependencia de la actividad microbiana del suministro de sustratos carbonados. El carbono orgánico alto puede proporcionar suficiente sustrato para soportar una mayor biomasa microbiana y por lo tanto una alta producción de enzimas (Li y Sarah, 2003).

Se observó un valor de correlación positiva de 0,77 entre las variables COT y Ffsa, resultados similares de correlación alta y positiva entre dichas variables se informaron en Paz-Ferreiro *et al.* (2007) y Toresani *et al.* (2013). Asimismo, Henríquez *et al.* (2014), concluyeron en su trabajo que la enzima fosfatasa obtuvo las mejores correlaciones con el porcentaje del carbono del suelo. Para el caso de Bgasa también se encontraron correlaciones positivas y elevadas con los parámetros físicos y químicos, coincidente con Madejón *et al.* (2007), que estudiaron respuestas bioquímicas edáficas a la labranza de conservación al largo plazo en España; y hallaron valores de 0,81 entre ambas variables. La enzima Asasa, al igual que las otras enzimas mostró el mismo comportamiento descripto. Klose *et al.* (1999), estudiaron el impacto de la rotación de cultivos en la actividad de arilsulfatasas en suelos de Estados Unidos y afirmaron la existencia de una fuerte correlación entre la actividad de Asasa y COT, así como también, Paz-Ferreiro *et al.* (2007), revelaron valores de 0,80 de correlación entre estas variables.

Las variables biológicas tuvieron correlaciones positivas entre sí. El CBM presentó valores altos y positivos (mayores a 0,59) de asociación a la actividad enzimática global y específica. Estas relaciones positivas refuerzan la hipótesis que cuando en el ambiente se incrementa la actividad microbiana genera una mayor producción de enzimas exocelulares y endocelulares, las cuales tienen una relación directa con la población microbiana. La alta actividad microbiana, acompañada de una alta producción y estabilización de enzimas aumenta la diversidad funcional, manifestada en la actividad fisiológica microbiana que mejora la eficiencia sistémica, es decir, un ecosistema con una alta diversidad funcional opera más eficientemente en términos de productividad, resiliencia y resistencia (Ferrerías *et al.*, 2015).

Podemos destacar también que, en base a los análisis de los multivariados realizados en este trabajo, tanto en los ACP (Figuras 6 y 7) como en los Dendogramas (Figuras 8, 9 y 10), los sitios con manejo agroecológico se separaron y se diferenciaron del sitio de agricultura convencional.

Recordando que los sitios de manejo agroecológico representan transiciones agroecológicas, la presencia de ganado en estos sitios constituye un enorme potencial para crear sistemas agroalimentarios sustentables, los cuales impulsan una mayor diversificación de cultivos, generando interacciones y procesos ecosistémicos más complejos en el ambiente. El incremento de la diversidad en los sistemas estimula los aumentos de los niveles de materia orgánica, de diversidad biológica en el suelo y ciclado de los nutrientes (Prager *et al.*, 2007), tal como se observó en este estudio.

Se destaca la evaluación y medición de los parámetros microbiológicos como indicadores sensibles ya que, los organismos presentes en el suelo interactúan y se conectan entre sí formando extensas comunidades que desempeñan un rol central en el funcionamiento de los ecosistemas, gracias a su enorme biodiversidad, asociaciones y actividades presentes (Álvarez *et al.*, 2018). La biodiversidad del suelo puede contribuir indirectamente a la productividad y estabilidad alimentaria, regula los flujos de CO₂ y gases de efecto invernadero, lo que sugiere que podría ser un actor clave para la mitigación y adaptación del cambio climático (El Mujtar *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

El siguiente trabajo constituye un aporte respecto a la temática de evaluación de la calidad de suelo por medio de indicadores edáficos en agroecología extensiva, dado que los antecedentes publicados en la Región Pampeana son escasos. Asimismo, este trabajo también contempla a la agroecología como una posible alternativa productiva sustentable para los periurbanos, principalmente en aquellos con restricciones en la aplicación de fitosanitarios.

En base al análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- Se registró mayor carbono de la biomasa microbiana y actividad enzimática en los sitios de manejo agroecológico en comparación con el sitio de agricultura convencional, para la mayoría de los casos. Asimismo, en algunos se observó que los valores tienden a acercarse al umbral de referencia Parque, lo que señala un indicio de que las prácticas llevadas a cabo mejoran la calidad el suelo.
- Los indicadores físicos y químicos no alcanzaron a detectar diferencias estadísticas entre sitios bajo cultivo, como sí lo reflejaron los indicadores microbiológicos. Se observó que en términos absolutos existe una tendencia de mejora en los sitios bajo manejo agroecológico al compararlo con el manejo convencional.
- Los indicadores microbiológicos respondieron de manera más sensible frente a los diferentes manejos evaluados (destacándose la actividad enzimática específica), en comparación con los indicadores físicos y químicos, permitiendo detectar las mejoras en la calidad del suelo bajo manejo agroecológico con mayor anticipación, considerando que transcurrieron 4 años desde el inicio de la transición.
- Independientemente de la metodología de análisis empleada, los multivariados siempre discriminaron al sitio de agricultura convencional de los sitios con manejo agroecológico, asociándose estos últimos a las mayores magnitudes de las variables evaluadas.
- Dada la importancia de la materia orgánica en la funcionalidad y dinamismo del suelo, la alta correlación entre las enzimas específicas y COT nos permite anticipar la mejora del contenido de carbono orgánico del suelo bajo manejos

agroecológicos, dado que los indicadores microbiológicos en su mayoría presentaron valores superiores respecto a AC.

Las conclusiones anteriores permiten reafirmar las predicciones planteadas, y aceptar la hipótesis enunciada.

Considerando las posibilidades de adopción del manejo agroecológico por productores agrícolas puros y convencionales, el sitio L4 de transición agroecológica de rotación agrícola con eventual pastoreo, se presenta como una alternativa más accesible de producción en periurbanos.

Resulta pertinente mencionar la importancia de poder establecer ensayos con diseño experimental específico, disponiendo de réplicas, aleatorización y espaciado de las mismas, para llevar a cabo estudios de este tipo. Muchas investigaciones, como la de este trabajo, utilizan procedimientos de obtención de la información “no manipulativos”, que se basan en procedimiento de observación. Generalmente el tratamiento estadístico en ambos casos es idéntico, pero la diferencia radica en la generalidad que podemos atribuir a las conclusiones derivadas del estudio. El experimento controlado da lugar al análisis de las causas que se traducen en un fenómeno, aunque muchas veces desarrollar este tipo de estudios resulta dificultoso y costoso.

BIBLIOGRAFÍA

Abbona EA, Sarandón SJ. 2014. Manejo de nutrientes en los agroecosistemas. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 220.

Acevedo E, Carrasco M, León O, Silva P, Castillo G, Ahumada I, González S. 2005. Informe de criterios de calidad de suelo agrícola. Servicio Agrícola y Ganadero, Chile. p. 43.

Acosta-Martínez V, Mikha MM, Vigil MF. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow por the Central Great Plains. *Applied Soil Ecology* 37: 41-52.

Albanesi A, Anriquez A, Nuñez Dominguez JA, Silberman J, Kunst C. 2013. Calidad del suelo. Propiedades biológicas y evaluación en ecosistemas semiáridos. En: *Microbiología Agrícola. Un aporte de la Investigación en Argentina* (Ed. 2) Tucumán, Argentina. Albanesi A. p. 4.

Altieri MA, Nicholls CI. 2000. Bases agroecológicas para una agricultura sustentable. En: *Teoría y práctica para una agricultura sustentable* (Ed. 1) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, México, DF (México). Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. p. 16-27.

Altieri MA. 2010. El estado del arte de la agroecología: revisando avances y desafíos. En: *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones* (Ed. 1) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Sicard TL, Altieri MA. p. 77-88.

Alvarez MF, Osterrieth ML, Bernava Laborde V, Montti LF. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de Argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencias del Suelo* 26: 115-129.

Álvarez VE, Cardozo AG, El Mujtar VA, Tiftonell P. 2018. El Universo escondido bajo nuestros pies: la importancia de conocer y preservar los organismos del suelo. *Presencia* 70: 22-26.

Alvear M, Urra C, Huaiquilao R, Astorga M, Reyes F. 2007. Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7: 38-50.

Balzarini MG, Di Rienzo JA, Tablada M, Gonzales K, Bruno C, Córdoba M, Casanoves F. 2012. Estadística y Biometría. Ilustraciones del uso de InfoStat en problemas de agronomía. Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas. p. 233.

Barsky A. 2005. El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. Introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires. *Scripta Nova* 194: 36.

Beltran MJ, Brutti L, Romanuik RI, Bacigaluppo S, Salvagiotti F, Sainz Rozas HR, Galantini JA. 2016. Calidad de la materia orgánica y disponibilidad de macro y micronutrientes por la inclusión de trigo como cultivo de cobertura. *Ciencia del Suelo* 34: 67-79.

Benedetto MV, Gamundi JC, Timoni R, Cardozo F, Longo A, Guglielmone P, Aradas Díaz ME. 2017. Módulo experimental en transición agroecológica. *Revista para mejorar la producción - EEA INTA Oliveros* 5: 139-146.

Bonel BA, Di Leo N, Montico S. 2013. Impacto territorial de la aplicación de la ley sobre regulación del uso de productos fitosanitarios (N° 11273) en la cuenca del Arroyo Ludeña, provincia de Santa Fe. VII Jornada interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales. Buenos Aires. Simposio 12, Eje 04.

Bonel BA, Morrás HJM, Bisaro V. 2005. Modificación de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del suelo* 23: 1-12.

Bortolato MA, Schiavon ME, Benedetto MV, Ferreras L, Toresani S, Aradas ME, Gamundi JC, Vallasciani M, Montiel A. 2019. Evaluación de indicadores edáficos bajo producción agroecológica extensiva. IV Reunión Transdisciplinaria en CIENCIAS AGROPECUARIAS. Santa Fe. p. 268-269.

Calbrix R, Barray S, Chabrerie O, Fourrie L, Laval K. 2007. Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land. *Applied Soil Ecology* 35: 511-522.

Cantú MP, Becker A, Bedano JC, Schiavo HF. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo* 25: 173-178.

Cazorla C, De Battista JJ, Ferrari M, Gudelj O, Quiroga A, Sasal MC, Taboada M, Wilson M. 2017. Protocolo básico común: Estructura del suelo. En: *Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo, protocolos básicos comunes (Ed. 2)* Entre Ríos. Santos DJ, Wilson MG, Ostinlli MM. p. 27.

Cerdá E, Sarandón SJ. 2015. Producción extensiva de cereales y carne bovina en forma agroecológica. El caso "la Aurora". Sudeste de la Provincia de Buenos aires, Benito Juárez, Argentina. V Congreso Latinoamericano de Agroecología. La Plata. B1-557. p. 1-6.

Cerdá E. 2020. La agroecología en los territorios. Redes, Políticas de promoción y experiencias con productores. Ciclo de seminarios virtuales de la PIT periurbanos, tercer módulo. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch> Acceso: 27 de octubre de 2020.

Chavarria DN, Pérez-Brandan C, Serri DL, Meriles JM, Restovich SB, Andriulo AE, Jacquelin L, Vargas-Gil S. 2018. Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 264: 1-8.

Cid RE. 2013. Las aplicaciones de agroquímicos en zonas periurbanas. Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Córdoba. p. 12.

Cruz AB, Etchevers Barra J, Del Castillo RF, Gutiérrez C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas* 13: 90-97.

De MS, Prager MS, Naranjo RE, Sanclemente OE. 2012. El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología* 7: 19-34.

Di Ciocco CA, Sandler RV, Falco LB, Coviella CE. 2014. Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO* 46: 73-85.

- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzales L, Tablada M, Robledo CW. 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>. Acceso: 1 de marzo de 2020.
- Dinesh R, Suryanarayana MA, Chaudhuri SG, Sheeja TE. 2004. Long-term influence of leguminous cover crops on the biochemical properties of a sandy clay loam Fluventic Sulfaquent in a humid tropical region of India. *Soil and Tillage Research* 77: 69-77.
- Do-Carmo RL, Alvarez MF. 2009. Expansión del cultivo de soja, salud y medio ambiente. Situación en Córdoba (Argentina) y Mato Grosso (Brasil). En: *Población y medio ambiente en Latinoamérica y el Caribe: Cuestiones recientes y desafíos para el futuro* (Ed. 1) Editorial ALAP, Río de Janeiro. p. 184-185.
- Duval ME, Galantini JA, Martínez JM, López FM, Wall LG. 2015. Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efecto de las prácticas de manejo. *Ciencias Agronómicas* 15: 33-43.
- Eiza MJ, Studdert GA, Fioriti N, Domínguez GF. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en molisoles de Balcarce. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. p. 59-67.
- El Mujtar VA, Muñoz N, Mc Cormick BP, Pulleman M, Tiftonell P. 2019. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Global Food Security* 20: 132-144.
- Feodoroff A. 1960. Evaluation de la stabilite structurale dun sol (indice S). Nouvelles normes demploi pour l'appareil a tamiser. *Ann. Agron* 11: 651-655.
- Ferrell ER, Gupta VVSR, Germida JJ. 1994. Effects of cultivation on the activity and kinetics of arylsulfatase in Saskatchewan soils. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 1033-1040.
- Ferreras L, Toresani S, Bonel BA, Fernández E, Bacigaluppo S, Faggioli VS, Beltrán C. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo* 27: 103-114.
- Ferreras L, Toresani S, Faggiolo VS, Galarza CM. 2015. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Sociedad Española de la Ciencia del Suelo* 5: 227-242.

- Flores CC, Sarandón SJ. 2014a. Desarrollo y evolución de ecosistemas. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 175.
- Flores CC, Sarandón SJ. 2014b. Manejo de la biodiversidad. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 344-359.
- Frioni L. 1999. Degradación de la materia orgánica. Humificación. En: Procesos microbianos (Ed. 1) Río Cuarto. Frioni L. p. 4
- Frioni L. 2011. Microbiología: básica, ambiental y agrícola. Montevideo. Editorial Orientación gráfica. p. 72, 151.
- Galantini JA, Suñer L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. Agriscientia 25: 41-55.
- García Y, Ramírez W, Sánchez S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Pastos y Forrajes 35: 125-138.
- GEOINTA. 2020. Disponible en: <http://www.geointa.inta.gob.ar/> Acceso: 4 de abril de 2021.
- Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós MC, Seoane S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. Soil biology and biochemistry 37: 877-887.
- Hénin S, Gras R, Monnier G. 1972. El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi prensa: 342.
- Henríquez C, Uribe L, Valenciano A, Nogales R. 2014. Actividad enzimática del suelo-deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa y ureasa-bajo diferentes cultivos. Agronomía costarricense 38: 43-54.
- Irizar AB, Andriulo AE, Mary B. 2013. Long-term impact of no tillage in two intensified crop rotations on different soil organic matter fractions in Argentine Rolling Pampa. The Open Agriculture Journal 7: 22-31.
- Jiménez de Ridder P, Bonmatí Pony M. 2003. Determinación de la actividad de β -glucosidasa del suelo. En: Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en

suelo: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana (Ed. 1) García C, Gil F, Hernández T, Trasar-Cepeda. p. 173.

Klose S, Moore JM, Tabatabai MA. 1999. Arylsulfatase activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biology and fertility of soils* 29: 46-54.

Lattuca A, Mariatti A, Cerilli S, Rapallo L, Machado M, Pigini Rivas M, Knuttzen E, Perozzi M, Colombo E, Cinalli M, Vino JC, Favaro M, Lifschitz M, Ciciliani A, Casella M, Marengo A. 2019. *Guía Básica para la Planificación y Manejo Agroecológico de Cultivos*. Santa Fe. Ministerio de Producción, Santa Fe, Argentina. p. 13, 16, 59, 63, 66, 71.

Li X, Sarah P. 2003. Arylsulfatase activity of soil microbial biomass along a Mediterranean-arid transect. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 925-934.

Madejón E, Moreno F, Murillo JM, Pelegrín F. 2007. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research* 94: 346-352.

Manlay R, Feller C, Swift MJ. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationship with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 217-233.

Marasas ME, Blandi ML, Berensztejn Dubrosky N, Fernández V. 2014. Transición agroecológica de sistemas convencionales de producción a sistema de base ecológica. Características, criterios y estrategias. En: *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables* (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 413.

Martínez E, Fuentes JP, Acevedo E. 2008. Carbono orgánica y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8: 68-96.

Melero S, Porras JCR, Herencia JF, Madejón E. 2006. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil and Tillage Research* 90: 162-170.

Morón A. 2001. El rol de los rastrojos en la fertilidad del suelo. *Documentos de siembra directa en el cono sur. PROCISUR*: 387-405.

Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*: 961-1010.

Niemiz, AC. 2019. Pastoreo Racional Voisin: como herramienta para el manejo de pastos naturales. Proyecto Final de Licenciatura en Administración Rural, Universidad Tecnológica Nacional.

Ochoa V, Hinojosa B, Gómez-Muñoz B, García-Ruiz R. 2007. Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la investigación*: 1-5.

Oliva, G. 2019. Manejo de pastizales naturales en Argentina. Presentación en XXV Reunión del Grupo Técnico Regional del Cono Sur en mejoramiento y utilización de los recursos forrajeros del área Tropical y Subtropical – Grupo Campos UFSC/Universidade Federal de Santa María, Rio Grande do Sul, Brasil. 1-3 de octubre de 2019.

Palacio FX, Apodaca MJ, Crisci JV. 2020. Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando lenguaje R. Buenos Aires. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. p. 106.

Paleologos MF, Iermanó MJ, Blandi ML, Sarandón SJ. 2017. Las relaciones ecológicas: un aspecto central en el rediseño de agroecosistemas sustentables, a partir de la Agroecología. *Redes* 22: 92-115.

Paleologos MF, Sarandón SJ. 2014. Principios de ecología de poblaciones. En: *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed 1)* Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 235-236.

Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leirós MC, Seoane S, Gil-Sotres F. 2007. Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50: 537-548.

Pazos-Rojas LA, Marín-Cevada V, Elizabeth Y, García M, Baez A. 2016. Uso de microorganismos benéficos para reducir los daños causados por la revolución verde. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 3(7): 72-85.

Philippot L, Raaijmakers JM, Lemanceau P, Van Der Putten WH. 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology* 11: 789-799.

Pla I. 2013. Análisis crítico de la calidad de suelos y de sus indicadores. Suelos Ecuatoriales 24: 1-8.

Prager MS, Rojas A, Pérez J, Zúñiga O, Gascó JM. 2006. Actividad y biomasa microbianas como indicadores de materia orgánica en sistemas de cultivo de maracuyá (*Passiflora edulis*) en Toro, Valle del Cauca, Colombia. Acta Agronómica 55: 7-12.

R Development Core T. 2018. A Language and Environment for Statistical Computing. R Found Stat Comput Vienna, Austria, 2.

Ramos Vásquez E, Zúñiga Dávila D. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. Ecología aplicada 7: 123-130.

Rincón LE, Muñoz LM. 2005. Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. Acta Biológica Colombiana 10: 5-18.

Sainz Rozas HS, Echeverría HE, Angelini HP. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extra-pampeana Argentina. Revista Ciencia del Suelo 29: 29-37.

Sánchez Vallduví GE, Sarandón SJ. 2014. Principios de manejo agroecológico de malezas. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 295, 299-308.

Sarandón SJ, Flores CC. 2014a. La insustentabilidad del modelo agrícola actual. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 15.

Sarandón SJ, Flores CC. 2014b. La Agroecología: el enfoque necesario para una agricultura sustentable. En: Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables (Ed. 1) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 52-58.

Sarandón SJ. 2010. La incorporación del enfoque de la sustentabilidad en la enseñanza de las Ciencias Agropecuarias: una necesidad en la formación de

profesionales”. En: Del aula al campo, el desafío cotidiano (Ed.1) Paraná. Galussi A, Moya M, Lallana MC. p. 13-23.

Schnürer J, Rosswall T. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology* 43: 1256-1261.

Segueda AN, Correa GV, Blanco JL, Gamiño MDLR. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS* 80: 29-37.

Sicard TL, Altieri MA. 2010. Enseñanza, investigación y extensión en agroecología: la creación de un Programa de Doctorado Latinoamericano en Agroecología. En: *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones* (Ed. 1) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Sicard TL, Altieri MA. p. 31. Disponible en: <https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/publicaciones-online/2010/ix-congreso/cd-actas/p10-formacion-investigacion/10-6-ense%C3%B1anza-leon.pdf>

SiSINTA. 2020. Disponible en: <http://sisinta.inta.gob.ar/es/perfiles/3309/analiticos>
Acceso: 4 de abril de 2021.

SoilsMatter. 2019. What are soil aggregates?. Disponible en: <https://soilsmatter.wordpress.com/2019/07/15/what-are-soil-aggregates/>. Acceso: 13 de abril de 2021.

Sterren M, Benintende M, Benintende S. 2011. Relación entre el carbono de la biomasa microbiana y el pool de carbono lábil extraído en muestras fumigadas en suelos de la provincia de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 15: 17-26.

Tabatabai MA, Page AL, Miller RH, Keeney DR. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. Soil enzymes.* Soil Science of America: 907-943.

Tittonell P, Giobellina BL. 2018. Periurbanos hacia el consenso: ciudad, ambiente y producción de alimentos: propuestas para ordenar el territorio. *Resúmenes cortos: Libro 2. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Editorial INTA.* p 21.

Toledo DM, Vazquez S. 2016. Obtención de indicadores e índices de calidad biológica en suelos rojos bajo distintos cultivos agrícolas. XXV Congreso Argentino

de la Ciencia del Suelo: Ordenamiento Territorial un Desafío para la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto. p. 577- 592.

Toresani S, Bonel BA, Ferreras L, Magra G, Dickie MJ, Galarza C, Faggioli V. 2009. Indicadores biológicos, físicos y químicos del suelo en sistemas de labranza y fertilización. Para mejorar la producción. INTA EEA Oliveros 42: 77-81.

Toresani S, Ferreras L, Bonel BA, Magra G, Romagnoli MV, Bortolato MA, Schiavon ME. 2013. Indicadores de calidad de suelo: Una perspectiva biológica. En: Microbiología Agrícola. Un aporte de la Investigación en Argentina (Ed.2) Tucumán, Argentina. Magna Publicaciones. p. 27-47.

Trasar-Cepeda C, Leirós MC, Seoane S, Gil-Sotres F. 2008. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Applied Soil Ecology* 39: 133-143.

Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry* 19: 703-707.

Vargas Gil S, Benintende S, Toresani S. 2017. Metodología de muestreo de suelos y ensayos de campo. En: Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo, protocolos básicos comunes (Ed. 2) Entre Ríos. Santos DJ, Wilson MG, Ostinlli MM. p. 97, 101, 102.

Viretto P. 2012. Efecto de diferentes prácticas de manejo del suelo sobre indicadores biológicos de calidad edáfica. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Villa María.

Walkley A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils-effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil science*, 63: 251-264.

Zamora F, Mogollón JP, Rodríguez B. 2005. Cambios en la biomasa microbiana y la actividad enzimática inducidos por la rotación de cultivos en un suelo bajo producción de hortalizas en el estado Falcón, Venezuela. *Multiciencias* 5: 62-70.