

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LOS MANEJOS AGROECOLÓGICOS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN PREDIO AGRÍCOLA DE LA
ZONA CENTRAL DE CHILE**

BELÉN ANTONIA ESCOBAR SCHNEIDER

Santiago, Chile

2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFFECTO DE LOS MANEJOS AGROECOLÓGICOS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN PREDIO AGRÍCOLA DE LA
ZONA CENTRAL DE CHILE**

**EFFECT OF AGROECOLOGICAL MANAGEMENT ON THE SOIL PHYSICAL
PROPERTIES IN AN AGRICULTURAL FARM IN CENTRAL CHILE**

BELÉN ANTONIA ESCOBAR SCHNEIDER

Santiago, Chile

2021

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EFFECTO DE LOS MANEJOS AGROECOLÓGICOS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN PREDIO AGRÍCOLA DE LA
ZONA CENTRAL DE CHILE**

Memoria para optar al título profesional de Ingeniera Agrónoma

BELÉN ANTONIA ESCOBAR SCHNEIDER

PROFESORES GUÍA

Oswaldo Salazar G.
Ingeniero Agrónomo, MS. Ph. D.



Calificaciones

7,0

Oscar Seguel S.
Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs. Agr.



6,8

PROFESORES EVALUADORES

Manuel Casanova P.
Ingeniero Agrónomo, M. Sc.



6,8

Elías Obreque S.
Ingeniero Agrónomo, Dr.



6,7

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Hipótesis.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivo específico	4
MATERIALES Y MÉTODO.....	5
Lugar del estudio.....	5
Sectores en estudio y sus manejos	5
Detalle de los sectores en estudio	7
Métodos.....	8
Evaluaciones de suelo	9
Distribución de tamaño de poros	9
Densidad aparente	9
Resistencia a la penetración.....	9
Estabilidad de microagregados	10
Análisis estadístico.....	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
Caracterización inicial.....	11
Densidad aparente	12
Distribución de tamaño de poros	13
Estabilidad de microagregados	16
Resistencia a la penetración	17
Cambios en las propiedades	18
CONCLUSIONES	22
LITERATURA CITADA.....	23
APÉNDICE	27

RESUMEN

Dadas las expectativas que generan los nuevos enfoques de manejo en la producción de alimentos, en este estudio se evaluaron los efectos de distintas prácticas agroecológicas sobre algunas de las propiedades físicas de un suelo perteneciente a la Serie Rinconada Lo Vial (Inceptisol), ubicado en la Comuna de Maipú, Región Metropolitana, Chile. Se estudiaron cuatro sectores, donde tres de ellos tenían prácticas agroecológicas (aplicación de diversas enmiendas orgánicas como manejo estándar y manejos agroecológicos de cultivos) y el restante se encontraba en transición a la agroecología (a diferencia de los otros sectores, este mantiene uso de fertilizantes), el cual fue muestreado para evaluar su estabilidad en el tiempo y comparar sus resultados con los obtenidos en los sectores agroecológicos. Las mediciones se realizaron a dos rangos de profundidad (0-10 cm y 10-20 cm) con cinco repeticiones. Los resultados indican una baja estabilidad del sitio en transición a la agroecología, el cual incrementa su densidad aparente (D_a) y disminuye su porosidad gruesa y estabilidad de microagregados en el tiempo. Por otro lado, se observó que el uso de cultivos hilerados con mismo sistema de raíces no genera mayores cambios en el suelo, mientras que la implementación de un núcleo floral con distintas especies cultivadas y la consecuente diversidad de raíces promueve una mayor macroporosidad y estabilidad de microagregados. Finalmente, el barbecho con historial de praderas temporales obtuvo bajos niveles de estabilidad de microagregados y de porosidad gruesa, por lo que es necesario continuar en el tiempo las evaluaciones de los manejos propuestos.

Palabras clave: Agroecología, estructura del suelo, microagregados, porosidad, macroporosidad.

ABSTRACT

Considering the expectations generated by new management approaches in food production, this study evaluated the effects of different agroecological practices on some physical properties of a soil belonging to the Rinconada Lo Vial Series (Inceptisol), located in the Maipú Commune, Metropolitan Region, Chile. Four sectors were studied, three of them with agroecological practices (application of various organic amendments as standard management and agroecological crop management) and the remaining one in transition to agroecology (unlike the other sectors, this one maintains fertilizer use), which was sampled to evaluate its stability over time and compare its results with those obtained in the agroecological sectors. Measurements were taken at two depth intervals (0-10 cm and 10-20 cm) with five replicates. The results indicate a low stability in the site in transition to agroecology, which increases its soil bulk density (D_a) and decreases its coarse porosity and stability of microaggregates over time. On the other hand, it was observed that the use of swidden crops with the same root system does not generate major changes in soil, while the implementation of a “floral core” with different cultivated species and the consequent root diversity, promotes a higher macroporosity and stability of microaggregates. Finally, the fallow with a history of temporary grassland obtained low levels of both microaggregate stability and coarse porosity, so it is necessary to continue the evaluations of the proposed management over time.

Key words: Agroecology, soil structure, microaggregates, porosity, macroporosity.

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 80% de las 1.500 millones de hectáreas cultivables en el planeta están ocupadas por monocultivos industriales a gran escala (Jackson et al., 2007), práctica que caracteriza gran parte del sector agrícola en los países industrializados y en desarrollo (Altieri y Rosset, 1996). Aunque estos sistemas agrícolas industrializados producen una gran cantidad de alimentos por hectárea y por trabajador, sólo son eficientes si se ignoran sus efectos secundarios, como lo son la pérdida de suelos, la contaminación del agua, el daño a la biodiversidad y a la salud humana (Pretty, 1995).

La agricultura convencional, caracterizada por formar estructuras artificiales de escasa diversidad ecológica y altamente dependientes de insumos externos para obtener altos rendimientos, resulta en extremo vulnerable a las plagas de insectos, a las enfermedades, al cambio climático y a crisis imprevistas, como la pandemia de COVID19 (Altieri y Nicholls, 2020). Cabe considerar, por otra parte, que la agricultura convencional es una de las mayores causas de los cambios medioambientales globales, provocando la deforestación, el agotamiento de los recursos de agua dulce, la contaminación química y, sobre todo, la degradación del suelo (Borsatto et al., 2019).

Gran parte de los tipos de degradación de suelo son invisibles hasta que se intenta cultivar en el lugar (FAO, 2017a), siendo una de las más comunes el daño a las propiedades físicas producto de la pérdida de materia orgánica del suelo (MOS), lo que conlleva al deterioro de la estructura, al aumento de la densidad aparente (Da) y a la disminución de la porosidad (Blanco-Canqui et al., 2015). La degradación de las propiedades físicas del suelo significa la disminución de la productividad agrícola y el aumento en la inseguridad alimentaria, con daño a los recursos naturales y ecosistemas, implicando la pérdida de biodiversidad (Powlson et al., 2011).

El suelo no es un recurso renovable a escala humana, y algunos efectos de su degradación son irreversibles, como la erosión severa y la compactación subsuperficial, las cuales disminuyen la profundidad efectiva de enraizamiento (Eswaran et al., 2001). Los suelos degradados reducen su capacidad como ecosistema que sustenta a plantas, animales y humanos (Doran, 2002), y disminuyen drásticamente su capacidad para sostener la producción de alimentos, impactando la seguridad alimentaria (Powlson et al., 2011). Estas consecuencias son indicadores de que la sostenibilidad agrícola comienza con el suelo, reduciendo la degradación de este y mejorando su estructura física (Pretty, 1995). Los suelos sanos son la clave para la seguridad alimentaria y un futuro sostenible (Wachira et al., 2014).

En vista de que los sistemas agrícolas convencionales impactan negativamente la salud del suelo y del medio ambiente, y que no están entregando resultados deseables en materia de seguridad alimentaria (FAO, 2019), es que resulta necesario un enfoque más integral en la producción de alimentos (Debosz et al., 2002). En esta línea, como medida de recuperación de suelos degradados, mitigación del cambio climático y para garantizar la seguridad alimentaria, es que se propone la implementación de la agroecología como sistema

productivo (Ryan et al., 2017; De Schutter, 2010), siendo parte del Marco Estratégico de la FAO para aumentar la resiliencia de los sistemas y disminuir la pobreza rural (FAO, 2017b). La agroecología es la aplicación de conceptos y principios ecológicos al diseño y gestión de agroecosistemas sostenibles (Altieri y Rosset, 1996), ofreciendo sistemas agrícolas capaces de soportar futuras crisis, ya sean brotes de plagas, pandemias, alteraciones climáticas o colapsos financieros (Altieri et al., 2015). Mediante altos niveles de diversidad y resiliencia, además de ser un sistema agrícola capaz de recuperarse a sí mismo, entrega rendimientos razonables y servicios ecosistémicos a la comunidad (Nicholls et al., 2016).

Como conjunto de prácticas agrícolas, la agroecología busca formas de mejorar los sistemas productivos aprovechando los procesos naturales, creando interacciones biológicas beneficiosas y sinergias entre los componentes de los agroecosistemas (Gliessman, 2020), minimizando los insumos externos sintéticos, utilizando los procesos ecológicos y los servicios de los ecosistemas para el desarrollo y la implementación de las prácticas agrícolas (Wezel et al., 2014). Entre los manejos que se utilizan en la producción agroecológica se encuentran el uso de sistemas de labranza de conservación, rotación de cultivos, reciclaje de materia orgánica (MO) y uso de controladores naturales de plagas y enfermedades, entre otros, pudiendo expresarse bajo diversas combinaciones de prácticas agronómicas (Wezel et al., 2020).

Teniendo en cuenta los beneficios de los manejos agroecológicos y la relevancia del suelo como ecosistema y sostenedor de la seguridad alimentaria mundial, es que se estudiaron los efectos de este sistema productivo en las propiedades físicas del suelo, en comparación a un sistema que está en transición a la agroecología, el cual mantiene la aplicación de fertilizantes. Ambos sistemas (agroecológico vs transición a la agroecología) se encuentran en un predio ubicado en Rinconada de Maipú (Región Metropolitana, Chile), donde los dos tienen en común distintos manejos agroecológicos, tales como el control biológico de plagas y reciclaje de MO, pero se diferencian en la aplicación de insumos externos, ya que al sistema en transición se le aplican fertilizantes minerales de uso tradicional, mientras que al sistema agroecológico no. Si bien son conocidos los resultados de la agricultura convencional, los efectos de un sistema en transición a la agroecología han sido poco estudiados. De esta manera, y considerando los antecedentes entregados anteriormente, se plantea como hipótesis que la agroecología genera consecuencias positivas en las propiedades físicas de un suelo, en comparación a un sistema en transición a la agroecología

Objetivo general

Evaluar el efecto de un sistema agroecológico versus un sistema de agricultura en transición a la agroecología, en relación con las propiedades físicas del suelo.

Objetivos específicos

Cuantificar los cambios de las propiedades físicas del suelo generados por el uso de distintas prácticas agroecológicas en relación con un sitio en transición a la agroecología.

Identificar las propiedades físicas del suelo que presentan mayores cambios debido a las prácticas agroecológicas.

MATERIALES Y MÉTODO

Materiales

Lugar del estudio

El estudio se realizó en el Predio Agroecológico Aníbal Donoso, ubicado en la Comuna de Maipú, Provincia de Santiago, Región Metropolitana, durante la temporada 2019-2020. El lugar cuenta con 38 ha, donde 27 de ellas son cultivables con prácticas bajo manejos agroecológicos desde hace ocho años (2013). Los sectores donde se realizaron las mediciones miden desde 300 m² hasta 500 m², todas con cultivos hortícolas.

El tipo de suelo donde se realizó el estudio corresponde a la Serie Rinconada Lo Vial (Inceptisol), perteneciente a la Familia franca, gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerept; son suelos aluviales moderadamente profundos, de clase textural franco arenosa en superficie y areno francosa en profundidad, bien drenados, pendiente menor al 3% y con ocurrencia esporádica de un fragipán en profundidad (CIREN, 1996).

El sitio tiene un clima descrito como templado cálido supratermal con régimen de humedad semi árido, con un periodo seco de 8 meses, cuya precipitación media anual es de 371 mm y donde la temperatura media anual corresponde a 14,2°C, alcanzando una temperatura mínima de 3,8°C en julio y una temperatura máxima de 30,4°C en enero (Santibáñez, 2017). Por último, tiene una evapotranspiración potencial anual de 1350 mm (Melillán, 2015).

Sectores en estudio y sus manejos

Se seleccionaron cuatro sectores pertenecientes a la misma Serie de suelo, donde tres de ellos son agroecológicos (Núcleo floral, Cultivos hilerados y Praderas), y el restante recibe manejos en transición a la agroecología (Transición), ya que se le aplica un fertilizante mineral. El detalle de los manejos aplicados a los sectores se encuentra en el Cuadro 1.

Todos los sectores en estudio, tanto agroecológicos como en transición a la agroecología, fueron muestreados en enero de 2020 para poder realizar las comparaciones correspondientes. De manera excepcional, el sector en transición a la agroecología también fue muestreado el 29 de agosto de 2019, con el objetivo único de poder comparar estas muestras con las recolectadas en enero de 2020 en el mismo sector, esto para evaluar la evolución de las propiedades físicas en estudio bajo este tipo de manejo en el corto plazo.

La preparación de suelos se basa en el uso de rastras para realizar un acondicionamiento superficial, complementado con herramientas de labranza profunda (subsulado), en una

secuencia de rastraje, subsolado y rastraje. El manejo de plagas y enfermedades es el mismo para todos los sectores y consiste en el uso de *Bacillus thuringiensis* (Dipel) para control de polillas; jugo de cítricos (Protek) para control de pulgones; y *Trichoderma* sp. para control de hongos.

Cuadro 1. Descripción de los sectores en estudio.

Sector	Manejo	Cultivo anterior	Cultivo al momento del muestreo	Manejos aplicados
Transición	Convencional a agroecológico. Riego por goteo.	Tomate	Tomate	Aplicación de fertilizante Purity (400 L ha ⁻¹), aplicación de biol (800 L ha ⁻¹), incorporación de rastrojo, aplicación de compost (15 m ³ ha ⁻¹).
Núcleo Floral	Agroecológico. Riego por surcos.	Núcleo floral (hinojo, linaza, yuyo, perejil, cicuta, cilantro y papa)	Papa	Aplicación de biochar (400 kg ha ⁻¹), incorporación de rastrojo, aplicación de compost (15 m ³ ha ⁻¹).
Cultivos Hilerados	Agroecológico. Riego por goteo.	Cultivos hilerados de apio y lechuga	Cultivos hilerados de apio y lechuga	Aplicación de biol (800 L ha ⁻¹), aplicación de biochar (400 kg ha ⁻¹), incorporación de rastrojo, aplicación de compost (15 m ³ ha ⁻¹).
Praderas	Agroecológico. Riego por tendido.	Praderas (avena, vicia, centeno)	Barbecho	Aplicación de biochar (400 kg ha ⁻¹), incorporación de rastrojo, aplicación de compost (15 m ³ ha ⁻¹).

Como se puede observar en el Cuadro 1, los manejos en común que tienen los cuatro sectores en estudio son la incorporación de rastrojo y la aplicación de compost en la preparación del suelo (15 m³ ha⁻¹).

De los sectores con manejos agroecológicos (Cultivos hilerados, Núcleo floral y Praderas), ninguno recibe fertilizantes externos y a todos se les aplicó una dosis de 400 kg ha⁻¹ de biochar el año 2018, mientras que los sectores de Transición y Cultivos hilerados recibieron dosis de biol de 20 L ha⁻¹ cada tres días desde el año 2013, resultando en 800 L ha⁻¹ para la temporada. Por último, al sector Transición se le aplicó una dosis de 400 L ha⁻¹ de fertilizante externo (Purity Fertilizer) tres días antes del trasplante (agosto 2019).

Se utilizaron dos tipos de Biol en los sectores en estudio: Biol calcio (Biol Ca) y Biol fósforo (Biol P). La aplicación de uno u otro dependía de las necesidades del cultivo que observara el agricultor. Ambos bioles se produjeron en el mismo predio y fueron analizados siguiendo la metodología de Sadzawka et al. (2006) en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Universidad de Chile. El detalle de su composición se encuentra en el Apéndice 1.

Detalle de los sectores en estudio

Transición: En este sector se cultivó tomate (*Solanum lycopersicum*), el cual se manejó como almácigo y trasplante sobre mesas de cultivo de 60 cm de ancho y 20 cm de alto, cultivado en platabandas. Este sector está transicionando a la agroecología hace tres años (2018) y, a diferencia de los sectores agroecológicos, recibe una dosis de fertilizante externo.

Como se indicó anteriormente, el sector Transición fue muestreado en dos momentos distintos: durante el pre-trasplante, en agosto de 2019, y con el tomate establecido y listo para cosechar, en enero de 2020. Las muestras obtenidas en enero de 2020 fueron las utilizadas para realizar la comparación con los sectores agroecológicos, donde todos los sectores fueron muestreados en el mismo momento, mientras que las muestras recolectadas en agosto de 2019 fueron utilizadas únicamente para evaluar el desarrollo en el tiempo de las propiedades físicas del suelo en un sector que está transicionando a la agroecología hace tres años (2018).

Cultivos hilerados: Este sector del predio fue cultivado con hileras alternadas de apio (*Apium graveolens*) y lechuga (*Lactuca sativa*), transplantadas sobre platabandas de 20 cm de altura y 70 cm de ancho. La práctica agrícola de cultivos hilerados consiste en que dos o más especies o variedades se cultiven en el mismo campo, lo que permite un aumento de la cantidad de biomasa y rendimiento de las especies cultivadas (Cong, 2015), producto de una mayor captura de recursos, debido a la complementariedad entre los cultivos intercalados (Hinsinger et al., 2011). Además, bajo esta modalidad productiva existe una mayor biomasa de raíces en el predio en comparación un sistema de monocultivo, lo que contribuye a reducir la compactación del suelo (Cong, 2015) y también permite utilizar una zona del suelo más amplia debido a la diversidad de los sistemas radicales de las especies alternadas (Horwith, 1985).

Praderas: En este sector se cultivaban praderas como avena (*Avena sativa*), vicia (*Vicia atropurpurea*) y centeno (*Secale cereale*); sin embargo, durante el periodo de muestreo (agosto 2019 a enero de 2020) el lugar se mantuvo en barbecho. Durante esta etapa no se dejó de regar, pero sí se disminuyó su frecuencia. La mantención del riego por parte de los agricultores del predio tuvo por objetivo mantener el suelo cubierto con vegetación espontánea y con su macro y microbiología activa.

Núcleo floral: Este sector contó con una variedad de siete especies, correspondientes a hinojo (*Foeniculum vulgare* Mill.), linaza (*Linum usitatissimum* L.), yuyo (*Brassica rapa* L.), perejil (*Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss), cicuta (*Conium maculatum* L.), cilantro (*Coriandrum sativum* L.) y papa (*Solanum tuberosum*). El Núcleo floral se implementó para realizar control biológico de tipo conservativo en el predio, el cual tiene por objetivo regular plagas a través de enemigos naturales (de la Familia Syrphidae para el caso de este predio),

modificando el ambiente para conservar e incrementar su población (He et al., 2020).

Métodos

Los análisis de suelo se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos y en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, ambos del Departamento de Ingeniería y Suelos, pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

En una primera visita al predio (junio, 2019) se realizaron dos calicatas para verificar que los sectores correspondan a la misma Serie de suelos. Para ello, se realizaron descripciones morfológicas de acuerdo a Schoeneberger et al. (2012), donde el detalle de esta descripción se encuentra en el Apéndice 2 y en el Apéndice 3. Además de la descripción morfológica de las calicatas, se obtuvieron muestras de suelo por horizontes genéticos superficiales, las cuales fueron utilizadas para determinar pH, conductividad eléctrica, MOS, textura y densidad aparente (Da).

En una segunda visita (agosto, 2019) sólo se evaluó el sector de Transición, donde se midió la resistencia a la penetración con un penetrómetro de punta cónica (Dickey John), y se obtuvieron muestras para medir la estabilidad de microagregados, densidad aparente (Da) y distribución de tamaño de poros, como parte de las evaluaciones de los diferentes manejos. Estas muestras solamente fueron utilizadas para compararlas con las muestras obtenidas en enero de 2020 en el mismo sector de Transición.

Por último, en una tercera visita al predio (enero, 2020) se realizó el mismo procedimiento de obtención de muestras para todos los sectores, incluyendo Transición, con la finalidad de poder comparar y analizar los resultados obtenidos de este muestreo, y también para evaluar la estabilidad y persistencia de las propiedades físicas en estudio del sector en transición a la agroecología en el corto plazo.

Se recolectaron muestras de suelo a dos intervalos de profundidad (0-10 y 10-20 cm), tanto disturbadas como inalteradas (cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura), con cinco repeticiones en cada sector en la forma de medidas repetidas, para tener una visión más representativa de los sectores en estudio. Considerando que Transición se evaluó dos veces, se recolectaron un total de 50 muestras.

La unidad experimental se delimitó para cada sector en estudio, y correspondió a una superficie de 4 m x 4 m, donde se encontraban cinco hileras de cultivo (repeticiones) desde donde se recolectaron las muestras de suelo, obteniendo de cada hilera (repetición) cinco muestras.

Propiedades evaluadas

A excepción de la resistencia a la penetración, todas las propiedades fueron evaluadas en dos profundidades: 0-10 cm y 10-20 cm.

Distribución de tamaño de poros: La distribución de tamaño de poros se determinó a través de la curva característica, medida en muestras colectadas en cilindros (5,9 cm de diámetro, 5 cm de altura), las cuales fueron sometidas a succión mediante cama de arena, olla y plato de presión a distintas tensiones, según el método de Sandoval et al. (2012).

En un comienzo se dejaron las muestras en una bandeja con agua para hidratarlas. Luego se aplicaron tensiones de 0,2 kPa, 6 kPa y 33 kPa de presión en cama de arena y olla de presión. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a 1500 kPa en un plato de presión, para determinar la retención de agua a esta tensión, equivalente al punto de marchitez permanente. Es necesario mencionar que después de cada proceso de estabilización, la totalidad de las muestras eran pesadas para determinar la pérdida de agua.

Con las muestras equilibradas a las tensiones indicadas anteriormente, se clasificaron los poros según Pagliai et al. (2002):

- Poros de Drenaje Rápido (PDR): volumen de agua retenida entre saturación (0,2 kPa) y 6 kPa, correspondientes a poros mayores a 50 μm .
- Poros de Drenaje Lento (PDL): volumen de agua retenida entre 6 kPa y 33 kPa, correspondientes a poros entre 10-50 μm .
- Poros de Agua Útil (PAU): volumen de agua retenida entre los 33 kPa y 1500 kPa. Este dato se obtuvo mediante la resta entre el volumen de agua retenido a capacidad de campo (33 kPa) y el volumen de agua retenido en el punto de marchitez permanente (1500 kPa), correspondientes a poros entre 0,2-10 μm .
- Poros de Agua Inútil (PAI): volumen de agua retenida a 1500 kPa, correspondientes a poros menores a 0,2 μm .

Densidad aparente: Al final del ciclo de desaturación de la curva característica, las muestras fueron secadas en estufa a 105°C durante 24 h y se pesaron para obtener la masa de suelo seco. Con este dato, se obtuvo la densidad aparente a través del método del cilindro (Sandoval et al., 2012).

Resistencia a la penetración: Para evaluar la resistencia a la penetración del suelo se utilizó un penetrómetro de punta cónica (Koolen y Kuipers, 1983) el cual fue insertado verticalmente en los distintos sectores a cuatro profundidades (3, 10, 20 y 30 cm) con 5 repeticiones en cada sector, y los resultados fueron interpretados de acuerdo a Schoeneberger et al. (2012). El sector de Núcleo Floral no fue evaluado, debido a que no se encontraba a capacidad de campo al momento de las mediciones.

Estabilidad de microagregados: La estabilidad de los microagregados se evaluó a partir del método de la razón de dispersión (RD) descrito por Berryman et al. (1982). Para ello, mediante tamizaje, se seleccionaron agregados de entre 1 y 2 mm, obtenidos desde muestras secas al aire, para completar una muestra de 50 g, más una contramuestra con las mismas características. La muestra fue sometida a una dispersión en agua destilada, mientras que a

la contramuestra se le agregó dispersante (20 mL de pirofosfato de sodio 0,5 N, Merck) durante 12 h y fue expuesta a una agitación mecánica durante 5 minutos. Tanto a la muestra como a la contramuestra se les determinó el contenido de limo y arcilla, siguiendo el método del hidrómetro de Bouyoucos, para determinar la relación de dispersión (RD %) según la siguiente fórmula:

$$RD = \frac{(A + L)w}{(A + L)t} * 100$$

Donde:

- (A+L)w = Arcilla + Limo de la dispersión en agua destilada.
- (A+L)t = Arcilla + Limo de la solución con dispersante y agitación mecánica.

Como es una prueba de dispersión, valores bajos de RD corresponden a suelos con alta estabilidad a la humectación, considerándose un RD < 30% como un suelo estable (Berryman et al., 1982).

Análisis estadístico

Para comparar los resultados entre los sectores, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con el programa Infostat, con un nivel de significancia de un 5%. En los casos en que se detectaron diferencias significativas entre sectores o profundidad, se realizó un test de rango múltiple (LSD Fischer) con un nivel de significancia de 5%. Para evaluar la estabilidad del sector en transición, se compararon las muestras obtenidas en 2019 y 2020 como tratamientos, sin considerar el factor tiempo.

Para seleccionar las propiedades físicas que presentan mayor sensibilidad a los manejos agroecológicos, se realizaron correlaciones lineales ($p \leq 0,05$) entre las propiedades asociadas a la estructura (porosidad gruesa, densidad aparente, estabilidad de agregados), analizando sus cambios en función de los tratamientos, de manera de recomendar las propiedades sobre las cuales focalizarse en un seguimiento futuro del sitio de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial

En el predio agroecológico se realizó una descripción morfológica (Apéndice 2 y Apéndice 3) y muestreo de suelos por horizonte genético para analizar algunas propiedades físicas (textura y Da) y químicas (pH, conductividad eléctrica y MOS), según los métodos propuestos por Sandoval et al. (2012) y Sadzawka et al. (2006), respectivamente. En el Cuadro 2 se presentan los resultados, donde se observa que los niveles de arena incrementan en profundidad, característica típica de la Serie de Suelos Rinconada Lo Vial (CIREN, 1996), la cual se describe como franca arenosa. Sin embargo, el horizonte superficial del sitio de estudio se encuentra en el límite del franco arenoso con el franco arcillo arenoso, lo que podría responder a la influencia de la Serie Mapocho, de texturas más finas que Rinconada Lo Vial y que coexiste en el área de estudio.

Cuadro 2. Caracterización inicial del suelo del predio agroecológico.

Profundidad (cm)	Propiedades ^{1, 2}							
	Separados texturales ³			Clase textural ⁴	Da	pH _(KCl)	CE	MOS
	A	L	a					
	(%)				Mg m ⁻³	--	dS m ⁻¹	%
0-30	19,7	27,1	53,2	Fa	1,64	8,10	2,40	3,33
30-50	11,4	25,0	63,6	Fa	1,62	8,07	2,10	1,60
0-45	22,8	24,0	53,2	Fa	1,77	7,58	3,74	2,42
45-85	9,3	17,1	73,6	Fa	1,63	8,16	1,34	2,90

¹ media

² Da= densidad aparente; CE= conductividad eléctrica; MOS= materia orgánica

³ A= arcilla; L= limo; a= arena

⁴ Fa= franco arenosa

De las propiedades evaluadas, destacan los valores de Da, que para las clases texturales del sitio en estudio indican un estado de compactación del suelo, ya que según Sandoval et al. (2012) esta no debiese superar los 1,5 Mg m⁻³. Sin embargo, los valores altos de Da se deben a que, para esta etapa del estudio, la medición de esta propiedad se realizó con el método del terrón, el cual arroja valores más altos en relación al método del cilindro (utilizado como estándar por Sandoval et al., 2012), debido a que considera el volumen ocupado por el agregado y no por la matriz de suelo, sin considerar el espacio poroso grueso ubicado entre los agregados (Brady y Weil, 2000).

Respecto a las otras propiedades del suelo, el pH del suelo se encuentra en el rango alcalino (Truog, 1946) y la salinidad del suelo se encuentra en el rango ligeramente salino (Pizarro, 1985), posiblemente por el aporte del Biol (Apéndice 1), mientras que el contenido de MOS

es bajo (Fassbender y Bornemisza, 1987), aunque esperable para el tipo de suelo (CIREN, 1996).

Propiedades físicas del suelo

Densidad aparente

El Cuadro 3 presenta los valores promedio de densidad aparente (Da) para los distintos sectores evaluados. Para esta propiedad no existieron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,0757$).

Cuadro 3. Densidad aparente (Mg m^{-3}) de los manejos para los dos rangos de profundidad.

Manejos	Profundidad (cm)		Promedio sector
	0-10	10-20	
	----- Mg m^{-3} -----		
Transición	1,37 ($\pm 0,09$)	1,41 ($\pm 0,04$)	1,39
Núcleo floral	1,29 ($\pm 0,06$)	1,34 ($\pm 0,10$)	1,31
Cultivos hilerados	1,34 ($\pm 0,03$)	1,33 ($\pm 0,05$)	1,33
Praderas	1,33 ($\pm 0,09$)	1,40 ($\pm 0,05$)	1,36

Promedio \pm DS. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre sectores según la prueba de comparación múltiple de LSD Fischer ($p > 0,05$).

La Da es una propiedad muy sensible a las distintas intervenciones y manejos que se aplican al suelo (Zeng et al., 2013); sin embargo, dada su alta variabilidad, no es recomendable utilizarla para evaluar el estado físico del suelo, pero sí es de utilidad para observar los resultados de distintas intervenciones antrópicas a corto plazo (Horn y Fleige, 2009).

El suelo presente en los sectores evaluados corresponde a la clase textural franca gruesa, donde se esperan valores de densidad aparente cercanos a $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ (Antúnez et al., 2015), sin embargo, este valor no se observa en ninguno de los sectores, donde todos resultaron con bajos niveles de Da.

Si bien no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre sectores, se destaca el sector de Núcleo Floral, donde los valores en ambas profundidades se mantuvieron bajos. Esto puede tener su origen en los distintos cultivos que han estado presentes en este sector, quienes por su tipo de raíces han desplazado partículas, generado una disminución de la Da y un incremento de la porosidad gruesa (Kay, 1990).

Distribución de tamaño de poros

Para obtener el tamaño de poros y su distribución se realizaron curvas de retención de agua, generadas a partir de la exposición a las muestras recolectadas en terreno a distintas tensiones. Para esta propiedad existió efecto del tratamiento, aunque sin significancia del factor profundidad (Cuadro 4).

Cuadro 4. Distribución de tamaño de poros (%) de los manejos para los dos rangos de profundidad.

Sectores	Profundidad (cm)		Promedio sector
	0-10	10-20	
	PDR (>50 μm)		
	----- % -----		
Transición	10,1 ($\pm 3,2$)	10,1 ($\pm 2,5$)	10,1 A
Núcleo floral	17,9 ($\pm 2,8$)	18,0 ($\pm 3,3$)	18,0 C
Cultivos hilerados	13,2 ($\pm 3,2$)	15,3 ($\pm 1,7$)	14,3 B
Praderas	15,1 ($\pm 2,1$)	13,7 ($\pm 3,3$)	14,4 B
	PDL (10-50 μm)		
	----- % -----		
Transición	3,7 ($\pm 1,6$)	3,6 ($\pm 1,0$)	3,7 A
Núcleo floral	11,0 ($\pm 2,3$)	10,8 ($\pm 3,1$)	10,9 C
Cultivos hilerados	11,0 ($\pm 1,4$)	12,3 ($\pm 2,0$)	11,7 C
Praderas	6,9 ($\pm 1,5$)	6,5 ($\pm 0,7$)	6,7 B
	PAU (0,2-10 μm)		
	----- % -----		
Transición	14,3 ($\pm 2,0$)	12,9 ($\pm 2,1$)	13,6 C
Núcleo floral	9,5 ($\pm 5,2$)	10,9 ($\pm 1,9$)	10,2 B
Cultivos hilerados	8,6 ($\pm 2,1$)	7,1 ($\pm 1,9$)	7,8 A
Praderas	10,4 ($\pm 1,0$)	10,4 ($\pm 2,0$)	10,4 B
	PAI (<0,2 μm)		
	----- % -----		
Transición	16,7 ($\pm 1,6$)	18,1 ($\pm 0,4$)	17,4 D
Núcleo floral	15,0 ($\pm 0,9$)	15,8 ($\pm 1,2$)	15,4 B
Cultivos hilerados	13,8 ($\pm 0,8$)	13,7 ($\pm 0,6$)	13,8 A
Praderas	15,8 ($\pm 1,0$)	16,8 ($\pm 0,9$)	16,3 C

Promedio \pm DS; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; PAU: poros de agua útil; PAI: poros de agua inútil. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los manejos según la prueba de comparación múltiple de LSD Fischer ($p < 0,05$).

Una distribución adecuada de los distintos tamaños de poros en el suelo es esencial para un suelo físicamente funcional, ya que le entregan la capacidad de transportar y almacenar agua (Warrick, 2002). En cuanto a la caracterización de poros, los de drenaje rápido y lento son quienes permiten el movimiento de fluidos, como aire y agua; los poros de agua útil son aquellos desde donde los cultivos pueden obtener agua para sus procesos fisiológicos (Hartge y Horn, 2009) y los poros de agua inútil realizan interacciones químicas a nivel molecular (Seguel et al., 2011).

Los poros de drenaje rápido (PDR), también llamados poros gruesos (>50 μm), permiten el rápido movimiento de fluidos, como agua y aire, asegurando la aireación del suelo (Hartge y Horn, 2009). De esta porosidad se necesita un mínimo de 12% para un buen desarrollo de los cultivos (INIA-ODEPA, 2000), cantidad que se cumple por casi todos los sectores, excepto por Transición, el cual arrojó un 10% de esta propiedad, que implica un nivel no apto para el desarrollo de cultivos.

Para la porosidad gruesa se observaron diferencias significativas entre sectores y quien obtuvo los valores más altos fue Núcleo Floral, con un 18% de PDR promedio. Esto se puede deber al tipo de raíces que han desarrollado los cultivos en este sector, ya que, gracias a los diferentes sistemas radicales del Núcleo floral, las raíces pudieron explorar y habilitar distintos niveles de suelo, desplazando partículas y generando porosidad gruesa (Kay, 1990; Lui et al., 2011). Además, este sector incluyó especies con sistemas de raíces pivotantes (cilantro, hinojo, linaza y perejil), las cuales fueron capaces de originar un sistema de porosidad gruesa mayor, debido a que las raíces pivotantes tienden a localizar y explotar canales de poros previos, ampliando el sistema poroso (Gao et al., 2015).

Los poros de drenaje lento (PDL), además de contribuir a drenar el exceso de agua del suelo (a una tasa menor que los poros de drenaje rápido) y airear el sistema de raíces, también entregan un aporte de agua disponible posterior a una lluvia o un riego (Reynolds et al., 2009). Los resultados para esta porosidad en los sectores estudiados obtuvieron diferencias estadísticamente significativas, y en general todos los sitios presentaron un bajo nivel de poros en esta categoría, siendo el sector Transición quien obtuvo porcentaje más bajo de este tipo de poros, con un 3,7% de PDL.

Para el sector de Praderas, el bajo porcentaje de PDL se puede deber a su condición de barbecho al momento del muestreo, ya que producto de la ausencia de cultivos, no hubo desarrollo de raíces, por lo que no se generó porosidad durante ese periodo. Además, se puede considerar como factor para este resultado la interacción del biochar con el compost y el rastrojo que se aplicó en el sitio, la cual genera una mayor aglutinación de partículas (Zhang et al., 2020), resultando en una menor porosidad en este rango de tamaño.

Para el resto de los sectores, el bajo porcentaje de PDL puede tener su origen debido a que las partículas más finas podrían estar rellendo los espacios entre los agregados correspondientes a los poros de entre 10-50 μ m, disminuyendo el porcentaje de PDL (Brady y Weil, 2000). Aun así, el Núcleo floral y los Cultivos hilerados presentaron los niveles más altos de PDL, incluso con niveles superiores a otros estudios con uso de cultivos y enmiendas con un amplio rango de texturas de suelos (Seguel et al., 2013)

Los poros de agua útil (PAU) corresponden al agua disponible para su absorción por parte de las plantas (Warrick, 2002). Este valor corresponde al rango del recurso hídrico que existe entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y que está asociado a estados energéticos del agua en el suelo de -33 y -1500 kPa, respectivamente, equivalentes a tamaño de entre 0,2 y 10 μ m.

En cuanto a los resultados obtenidos en este rango de tamaño, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sectores en estudio, donde el sector con mayor PAU corresponde a Transición, con un 13,6% en promedio, que al igual que los sectores de Praderas y Núcleo Floral, con 10,4% y 10,2% de PAU respectivamente, se encuentran en la categoría de un limitado porcentaje de poros de agua útil ($10\% > \text{PAU} \leq 15\%$), lo que restringe el enraizamiento óptimo de los cultivos (Reynolds et al., 2009). Cultivos Hilerados, por otro lado, obtuvo los valores de PAU más bajos, con un 7,8%, encontrándose en un rango pobre de poros de agua útil ($< 10\% \text{ PAU}$) (Reynolds et al., 2009), que significa una baja

capacidad de almacenamiento de agua (Greenland, 1981). El biochar puede ser un factor relevante en estos bajos resultados de PAU, ya que las partículas de esta enmienda pueden estar rellorando los poros de agua útil, transformándolos en porosidad fina (Ajayi y Horn, 2016).

Por último, los poros de agua inútil (PAI) corresponden a la porosidad más fina del suelo, donde el agua está fuertemente retenida y la planta no puede acceder a este recurso. Si bien se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para esta propiedad, los poros de agua inútil no son afectados por el manejo, ya que dependen de la textura del suelo (Richard et al., 2001), lo que se condice con los resultados de PAI obtenidos (valores entre 13% y 17%), que es lo esperado para suelos franco arenosos (Reynolds et al., 2009).

Estabilidad de microagregados

La estabilidad de microagregados se evaluó mediante la razón de dispersión (RD), la cual permite determinar la estabilidad de los agregados de entre 1 y 2 mm de diámetro. Valores altos de RD indican una alta dispersión de los microagregados y, por consiguiente, una menor estabilidad. Los resultados de este análisis se presentan en el Cuadro 5 y sólo existió efecto del tratamiento.

Cuadro 5. Relación de dispersión (RD%) de los distintos sectores en estudio.

Sector	Profundidad (cm)		Promedio sector
	0-10	10-20	
----- RD % -----			
Transición	58,0 (±14,5)	56,1 (±11,4)	57,0 B
Núcleo Floral	41,3 (±4,1)	51,6 (±10,0)	46,4 A
Cultivos hilerados	64,9 (±8,3)	59,9 (±12,1)	62,4 BC
Praderas	73,4 (±5,7)	61,0 (±11,4)	67,2 C

Promedio ± DS. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre los sectores según la prueba de comparación múltiple de LSD Fischer ($p < 0,05$).

El sector que obtuvo la mayor estabilidad de microagregados corresponde a Núcleo floral, al tener una menor RD, que posiblemente fue generado por la diversidad de raíces presentes en el lugar, las cuales por sus exudados fueron capaces de aglutinar partículas y generar microagregados estables (Feeney et al., 2006), efecto que pudo ser promovido de mayor forma por el cultivo de papas presente al momento del muestreo, ya que las plantas tuberculosas aumentan la agregación del suelo (Bassouny, 2017). Sin embargo, aun siendo el sector con mayor estabilidad, se encuentra en el rango de suelo poco estable, ya que su relación de dispersión supera el 30% (Berryman, 1982) y, bajo esta premisa, todos los sectores se encuentran en la clasificación de suelo poco estable. Esto puede tener su origen debido a que el suelo en estudio presenta un nivel bajo de MOS y una dominancia de la fracción arenosa (como se puede observar en la caracterización inicial del Cuadro 2), factores que atentan contra una buena estabilidad de microagregados (Seguel et al., 2013).

Es necesario recalcar que el sector Praderas tuvo los resultados más altos de RD, es decir, fue el sector con la menor estabilidad de microagregados, lo que se puede deber a que por la temporada en barbecho no hubo desarrollo de sistemas de raíces en el sector ni actividad microbiológica de importancia, por lo que hubo ausencia de exudaciones que contribuyeran a cimentar los agregados (Abiven et al., 2009).

Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración indica cuánta fuerza deben ejercer las raíces en el suelo para poder explorar en el perfil. Esto se relaciona directamente con el correcto desarrollo de los cultivos, de manera que altos niveles de resistencia pueden indicar compactación, impidiendo el adecuado crecimiento de raíces, lo que trae por consecuencia una disminución en los rendimientos (Lindstrom y Voorhees, 1994). Los resultados de la resistencia a la penetración se encuentran en el Cuadro 6, y solo se observó efecto de la profundidad. El sector del Núcleo Floral no fue considerado en el análisis debido a que no se encontraba a capacidad de campo al momento de realizar la evaluación.

Cuadro 6. Resistencia a la penetración (N) a los distintos rangos de profundidad. No hubo efecto para del factor manejo ($p > 0,05$), pero sí para la profundidad.

Sector	Profundidad			
	3 cm	10 cm	20 cm	30 cm
	----- N -----			
Transición	55 ($\pm 10,0$)	106 ($\pm 15,1$)	111 ($\pm 25,8$)	151 ($\pm 54,0$)
Cultivos hilerados	22 ($\pm 15,4$)	54 ($\pm 17,8$)	121 ($\pm 72,9$)	228 ($\pm 97,0$)
Praderas	28 ($\pm 14,4$)	70 ($\pm 25,5$)	102 ($\pm 22,7$)	249 ($\pm 147,4$)
Promedio profundidad	35 A	77 AB	111 B	209 C

Promedio \pm DS. Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre las profundidades según la prueba de comparación múltiple de LSD de Fisher ($p < 0,05$).

Como se observa en el Cuadro 6, existe un aumento en la resistencia a la penetración a medida que se avanza en profundidad, lo cual es natural para suelos originados a partir de depósitos homogéneos, ya que existe una presión acumulativa del material que incrementa las presiones internas del suelo a medida que se profundiza en éste (Hartge y Horn., 2009).

Según la clasificación de Schoeneberger et al. (2012), los sectores a los 3 cm de profundidad se encuentran en el rango firme (20 N a < 40 N) y a los 10 cm de profundidad están en la categoría muy firme (40 N a < 80 N), con valores ligeramente sobre los rangos en el sitio Transición; mientras que a los 20 cm y 30 cm de profundidad se encuentran en el rango extremadamente firme (≥ 80 N). Si bien los sectores agroecológicos y el sector en transición se encuentran en esta misma categoría después de los 20 cm de profundidad, Praderas y Cultivos hilerados arrojan valores mayores a 200 N, lo que significa que pueden existir restricciones para el adecuado crecimiento de las raíces (Schoeneberger et al., 2012). Sin embargo, la alta resistencia presente en los sitios en estudio puede tener su origen debido a un proceso de generación de agregados más densos, propiciado por la materia orgánica que

se ha incorporado producto de los nuevos manejos agroecológicos (Seguel y Horn, 2006). En el sector en transición, por otro lado, se observaron valores menores a 200 N, sin embargo, es necesario tener presente que, si bien la preparación de suelos es similar en todos los sectores, en el sitio transición la preparación fue más reciente en comparación al resto de los sectores en estudio, explicando sus menores valores.

Pagliai et al. (2002) indican que, al disminuir la porosidad, la resistencia a la penetración aumenta, dejando en evidencia una fuerte correlación entre ambas propiedades. Esto se condice con los resultados observados en la porosidad de los distintos sectores, la cual es limitada en la superficie y poco óptima para un correcto desarrollo de los cultivos en el sector Transición.

Estabilidad del sector Transición

Con las muestras obtenidas del sector Transición en dos fechas de evaluación, se cuantificaron los cambios de las propiedades medidas en función del tiempo (Cuadro 7). De esta manera se logró identificar qué tan estables son, a corto plazo, las propiedades físicas evaluadas en un contexto de transición a la agroecología. En el Cuadro 7 se presentan los cambios relativos de las distintas propiedades físicas evaluadas en el sector de Transición, haciendo una comparación entre los resultados de las muestras obtenidas en agosto de 2019 con las de enero de 2020. El detalle de los resultados de este sector para ambos momentos de medición se encuentran desde el Apéndice 4 al Apéndice 7.

Cuadro 7. Cambios relativos (% en relación a la condición inicial) de las propiedades físicas evaluadas del sector Transición en función de cómo estas variaron desde agosto de 2019 a enero de 2020.

Propiedad sector Transición	Cambios relativos	
	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
	(%)	
Densidad aparente	19,1	7,6
Estabilidad de microagregados (RD)	66,7	27,8
Poros de drenaje rápido	-57,4	-52,1
Poros de drenaje lento	-47,1	-59,8
Poros de agua útil	59,5	27,4
Poros de agua inútil	30,9	34,2
Resistencia a la penetración	102,2	33,8

Valores positivos y negativos indican aumentos y disminuciones en la propiedad evaluada respectivamente.

El Cuadro 7 muestra cómo variaron las propiedades físicas en el sector Transición luego de un periodo de cinco meses donde se cultivó tomate desde almácigo a cosecha. De estos resultados se desprende que el sector Transición presenta una alta inestabilidad en las propiedades físicas en estudio acorde pasa el tiempo. Esto queda en evidencia al observar los cambios ocurridos entre las propiedades, donde la densidad aparente aumentó en un 19,1%

en un periodo de 5 meses en la profundidad de 0-10 cm, y en un 7,6% en la segunda profundidad (10-20 cm), lo que puede tener su origen debido al asentamiento de las partículas de suelo al ser sometidas a ciclos frecuentes de riego.

La estabilidad de microagregados, por otro lado, evaluada mediante la relación de dispersión, aumentó en ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) en un 66,7% y 27,8% respectivamente, lo que significa una disminución en la estabilidad de microagregados en este periodo. De acuerdo al Apéndice 6, la condición original en superficie (0-10 cm) se encontraba cercana al óptimo ($RD < 30\%$) de acuerdo a Berryman et al. (1982), pero esta condición es efímera y se pierde rápidamente en el tiempo.

Se observa también que los PDR disminuyeron en más de un 50% en ambas profundidades, situación similar a la de los poros de drenaje lento, donde en la profundidad más superficial estos poros disminuyeron en un 47,1%, y en la más profunda en un 59,8%. Siguiendo en esta línea, entonces, resulta lógico que los resultados obtenidos de los poros de agua útil e inútil hayan aumentado en ambas profundidades, ya que, si disminuye la porosidad gruesa, aumenta la microporosidad.

Por último, la resistencia a la penetración aumentó en más de un 100% en superficie (0-10 cm) y en un 33,8% en el nivel de 10-20 cm, sin embargo, son resultados esperables debido al asentamiento natural de las platabandas de cultivo (Seguel et al., 2018) y a que esta propiedad presenta una alta variabilidad (Alesso et al., 2018) tendencia que se observó en el desarrollo de esta memoria, al no obtener resultados estadísticamente significativos en los distintos sectores dependientes de los manejos agroecológicos.

Cambios en las propiedades en comparación al sector Transición

A continuación, se presenta el Cuadro 8, donde se indican las propiedades físicas que mostraron más cambios porcentuales bajo los manejos agroecológicos en comparación al sitio en transición a la agroecología (Transición). El detalle del cambio relativo de todas las propiedades se encuentran en el Apéndice 8 y en el Apéndice 9. Como ya se indicó anteriormente, para esta parte del análisis se utilizaron solamente las muestras recolectadas en enero de 2020.

Cuadro 8. Cambios relativos (%) de las propiedades físicas en relación al sector Transición.

Sector	Cambios relativos					
	Poros de drenaje rápido		Poros de agua útil		Estabilidad de microagregados (RD)	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10cm	10-20cm
	(%)					
Núcleo floral	77,2	78,2	-33,4	-15,2	-28,8	-8,0
Cultivos hilerados	30,7	51,5	-39,9	-45,2	11,9	6,8

Praderas	49,5	35,6	-27,5	-19,5	26,6	8,7
-----------------	------	------	-------	-------	------	-----

Valores positivos y negativos indican aumentos y disminuciones en la propiedad evaluada respectivamente, en comparación con el sitio Transición.

Como se puede observar en el Cuadro 8, las propiedades que más cambios presentaron a los distintos manejos agroecológicos fueron la estabilidad de microagregados, los poros de drenaje rápido y los poros de agua útil, todas relacionadas a la estructura del suelo.

De las propiedades físicas anteriormente indicadas, en adición a los resultados obtenidos de una matriz de correlación (Apéndice 10), se seleccionaron tres propiedades a las que se les recomienda hacer seguimiento en futuras evaluaciones de calidad de suelo. Estas propiedades corresponden a los poros de drenaje rápido, la estabilidad de microagregados y la densidad aparente. Si bien esta última no presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 3) ni arrojó grandes cambios relativos respecto al sitio Transición como otras propiedades, es una propiedad fácil de medir e interpretar, donde además se correlacionó significativamente con las otras propiedades asociadas a la calidad estructural. Así, a menor densidad aparente, mayor porosidad gruesa (PDR) y mayor estabilidad de microagregados (valores menores de relación de dispersión). Las correlaciones pueden observarse en las figuras 1 a 3.

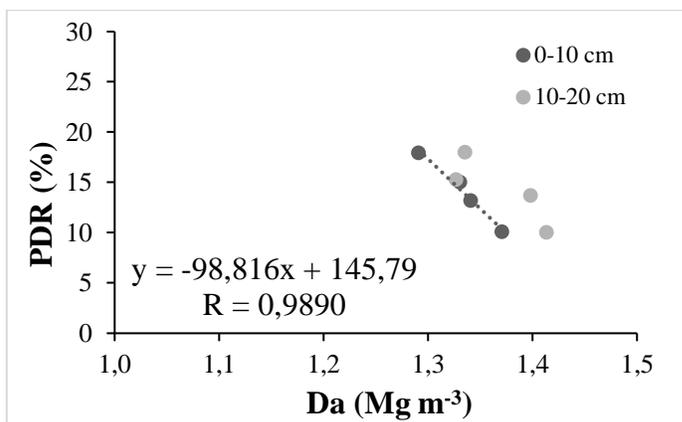


Figura 1. Regresión lineal entre densidad aparente (Da) y poros de drenaje rápido (PDR). La ecuación se presenta para las muestras superficiales y es significativa al 99%.

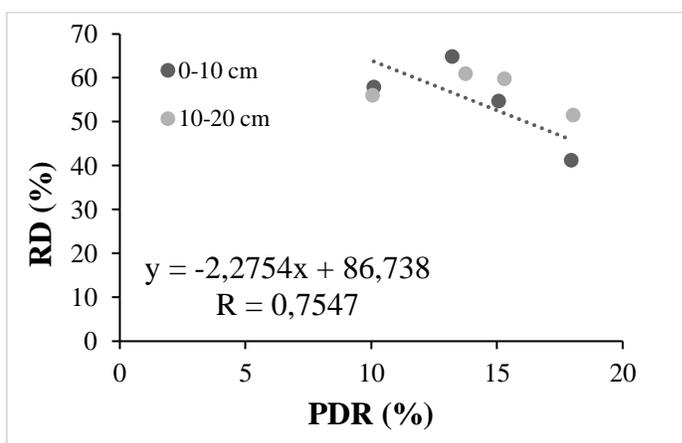


Figura 2. Regresión lineal entre poros de drenaje rápido (PDR) y relación de dispersión (RD). La ecuación incluye ambas profundidades y es significativa al 95%.

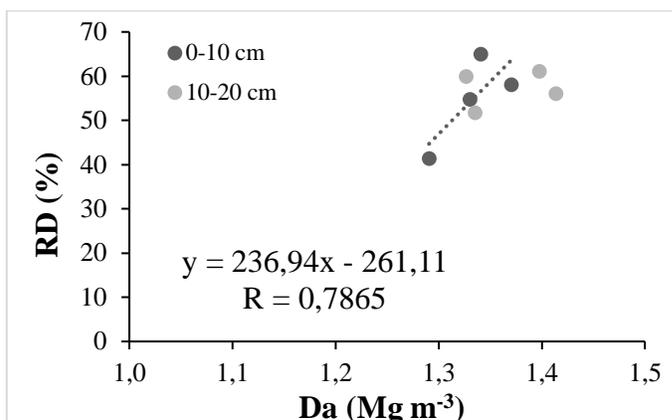


Figura 3. Regresión lineal entre densidad aparente (Da) y relación de dispersión (RD). La ecuación incluye ambas profundidades y es significativa al 95%.

Se recomienda realizar seguimiento a estas propiedades, ya que la densidad aparente, si bien no entregó diferencias estadísticamente significativas en los distintos sectores ($p = 0,0757$), entrega una aproximación del nivel de compactación ó soltura mecánica del suelo producto del nuevo manejo adoptado (Rabot et al., 2018), mientras que la estabilidad de microagregados es un importante indicador de estructura y calidad del suelo (Six et al., 2000), denotando la resistencia a procesos disruptivos generados por la humectación violenta; por su parte, la porosidad gruesa (PDR) es indicadora de estructuración del suelo, representando bien la porosidad estructural (Feeney et al., 2006).

Si bien se esperaban diferencias más drásticas entre los sectores agroecológicos y el sector en transición a la agroecología, la realidad es que algunos manejos agroecológicos no generaron mayores efectos beneficiosos (sector Cultivos hilerados o Praderas, por ejemplo) que el sector en transición a la agroecología. Esto se puede deber a que es necesario un poco más de tiempo para ver resultados destacables de los manejos agroecológicos, teniendo en consideración que al momento de realizar la toma de muestras el predio llevaba seis años aplicando la agroecología y, según Abiven et al. (2009), para ver resultados del efecto de la adición de enmiendas orgánicas al suelo se deben mantener los manejos por lo menos 6 a 10 años.

CONCLUSIONES

Se confirmó la hipótesis de la presente memoria de título, la cual propone que la agroecología genera consecuencias positivas en las propiedades físicas del suelo en comparación a un sistema en transición a la agroecología.

De todos los sectores evaluados, el que destacó fue Núcleo Floral, ya que obtuvo los valores más altos en poros de drenaje rápido y lento, y también obtuvo los valores más bajos de RD para la estabilidad de microagregados. Estas propiedades pudieron haber sido promovidas por la diversidad de plantas del lugar que, con sus distintos sistemas radicales, exploraron y habilitaron distintos espacios del suelo gracias al efecto mecánico de las raíces y sus exudados.

En contraparte, los sectores agroecológicos de Cultivos hilerados y Praderas no entregaron los resultados esperados, ya que ambos presentaron bajos niveles de estabilidad de microagregados y de porosidad. Para el sector de Cultivos hilerados, esto puede deberse por el incumplimiento del principio de diversidad planteado para este tipo de manejo, mientras que para el sector de Praderas, esta se encontraba en condición de barbecho, por lo que no hubo desarrollo de porosidad por las raíces ni procesos de aglutinación de microagregados propiciados por la exudación de ellas, por lo que se recomienda mantener cubiertas permanentes. Por último, el sector en transición a la agroecología presentó bajos niveles de estabilidad de microagregados y porosidad, además de presentar una baja estabilidad en el corto plazo, con indicadores físicos óptimos a inicios de temporada que decaen rápidamente en su calidad.

Por último, se recomienda hacer seguimiento a las propiedades de densidad aparente, estabilidad de microagregados y macroporosidad mayor a 50 μm (PDR), ya que son indicadores de calidad de suelo sensibles a los manejos y se encuentran correlacionadas entre sí, permitiendo evaluar el efecto de los manejos sobre la estructura del suelo.

LITERATURA CITADA

- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1): 1-12.
- Ajayi, A., Horn, R. 2016. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. *Soil & Tillage Research*, 164: 34–44.
- Alesso, C., Masola, M., Carrizo, M., Cipriotti, P., Imhoff, S. 2018. Spatial variability of short-term effect of tillage on soil penetration resistance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(6): 822–832.
- Altieri, M., Rosset, P. 1996. Agroecology and the conversion of large-scale conventional systems to sustainable management. *International Journal of Environmental Studies*, 50(3-4): 165–185.
- Altieri, M., Nicholls, C., Henao, A., Lana, M. 2015. Agroecology and the Design of Climate Change-Resilient Farming Systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35: 869–890.
- Altieri, M., Nicholls, C. 2020. Agroecology and the emergence of a post COVID-19 agriculture. *Agriculture and Human Values*, 37(3): 525–526.
- Antúnez, A., Felmer, S., Vidal, M., Morales, R., Coz, E., Fuentes, F. 2015. Riego por pulsos en maíz de grano: Propiedades físico- hídricas del suelo en el cultivo del Maíz grano. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago, Chile. 20 p.
- Bassouny, M. 2017. Response of Soil Macro and Micro-aggregates and Dispersion Ratio to Solid Cattle Manure in Cultivated and Non- cultivated Soils. *International Journal of Plant & Soil Science*, 17(6): 1–10.
- Berryman, C., Davies, D., Evans, C., Harrod, M., Hughes, A., Skinner, R. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Stockholm, Sweden. 116 p.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T., Lindquist, J., Shapiro, C., Elmore, R., Francis, C., Hergert, G. 2015. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate. *Agronomy Journal*, 107: 2449-2474
- Borsatto, R., Altieri, M., Duval, H., Perez-Cassarino, J. 2019. Public procurement as strategy to foster organic transition: insights from the Brazilian experience. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 35(6): 688–696.
- Brady, N., Weil, R. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall. New Jersey, USA. 559 p.
- CIREN. 1996. Estudio Agrológico. Descripción de suelos materiales y símbolos: VI Región (Publicación N° 114). Santiago, Chile. 425 p.
- Cong, W., Hoffland, E., Li, L., Janssen, B., van der Werf, W. 2015. Intercropping affects the rate of decomposition of soil organic matter and root litter. *Plant and Soil*, 391(1-2): 399–411.
- Debosz, K., Petersen, S., Kure, L., Ambus, P. 2002. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 19(3): 237–248.

- De Schutter, O. 2010. Agro-ecology and the right to food. Report presented to the Human Rights Council A/HRC/16/49, sixteenth session. New York, USA. 21 p.
- Doran, J. 2002. Soil Health and Global Sustainability: Translating Science into Practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(2): 119–127.
- Eswaran, H., Lal, R., Reich, P.F. 2001. Land Degradation: An Overview. pp. 20-35 In: Bridges, E.M., Hannam, I.D., Oldeman, L.R., Pening de Vries, F.W.T., Scherr, S.J. and Sompatpanit, S., Eds., *Responses to Land Degradation, Proceedings of 2nd International Conference on Land Degradation and Desertification*, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Dehli, India. Kaen, Thailand. Oxford Press, New Dehli, India.
- FAO. 2017a. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Rome, Italia. 90 p.
- FAO. 2017b. Plan a plazo medio para 2018-2021 y Programa de trabajo y presupuesto para 2018-19. Roma, Italia. 156 p.
- FAO. 2019. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture. Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Roma, Italia. 576 p.
- Fassbender, H., Bornemisza, E. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América latina. 2^a ed. IICA. San José, Costa Rica. 418 p.
- Feeney, D., Crawford, J., Daniell, T., Hallett, P., Nunan, N., Ritz, K., Rivers, M., Young, I. 2006. Three-dimensional Microorganization of the Soil–Root–Microbe System. *Microbial Ecology*, 52(1): 151–158.
- Gao, W., Hodgkinson, L., Jin, K., Watts, C., Ashton, R., Shen, J., Ren, T., Dodd, I., Binley, A., Phillips, A., Hedden, P., Hawkesford, M., Whalley, W. 2016. Deep roots and soil structure. *Plant, Cell & Environment*, 39(8): 1662–1668.
- Gliessman, S. 2020. Confronting Covid-19 with agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(9): 1115–1117.
- Greenland, D. 1981. Soil management and soil degradation. *Journal of Soil Science*, 32(3): 301–322.
- Hartge, H., Horn, R. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden, vol. 4. Praxis Messmethoden Auswertung. Schweizerbart, Stuttgart, Germany. 178 p.
- He, X., Pødenphant, L., Moestrup, P., & Sigsgaard, L. 2020. The effect of floral resources on predator longevity and fecundity: A systematic review and meta-analysis. *Biological Control*, 153:104476.
- Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., Zhang, F. 2011. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology*, 156: 1078–1086.
- Horn, R., Fleige, H. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*, 102 (2): 201-208.
- Horwith, B. 1985. A Role for Intercropping in Modern Agriculture. *BioScience*, 35(5): 286–291.
- INIA-ODEPA. 2000. Proyecto sistemas de validación y transferencia de tecnologías de riego sector regado de las provincias de San Felipe y Los Andes. Convenio Instituto de Investigaciones Agropecuarias - Centro Regional de Investigación La Platina. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago, Chile. 52 p.
- Jackson, L., Pascual, U., Hodgkin, T. 2007. Utilizing and Conserving Agrobiodiversity in Agricultural Landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121 (3): 196–210.
- Kay, B. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, 12: 1- 52.

- Koolen, A., Kuipers, H. 1983. Agricultural soil mechanics. Advances Series in Agricultural Sciences. Berlin, Germany. 251 p.
- Lui, L., Gan, Y., Bueckert, R., Van Rees, A. 2011. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crops Research*, 122 (3): 248-255.
- Lindstrom, M., Voorhees, W. 1994. Responses of Temperate Crops in North America to Soil Compaction. *Developments in Agricultural Engineering*, 11: 265–286.
- Melillán, C. 2015. Evapotranspiración de referencia: para la determinación de las demandas de riego en Chile. Proyecto INNOVA. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 110 p.
- Nicholls, C., Altieri, M., Vazquez, L. 2016. Principles for the Conversion and Redesign of Farming Systems. *Journal of Ecology and Ecography*, 5(1): 1-8.
- Pagliai, M., Vignozzi, N. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. *Advances in GeoEcology*, 35: 69-80.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos 2ª Edición. Ed. Agrícola Española S.A. Madrid, España. 541 p.
- Powlson, D., Gregory, P., Whalley, W. 2011. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36: 72-87.
- Pretty, J. 1995. *Regenerating Agriculture: Policies and Practice for Sustainability and Self-Reliance*. Earthscan Publications Ltd., London, UK. 320 p.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314: 122–137.
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C., Yang, X. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics for quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152 (3-4): 252-263
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J., Bruand, A., Guérif, J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1): 49–58.
- Ryan, M., Peigné, J. 2017. Applying Agroecological Principles for Regenerating Soils. *Agroecological Practices for Sustainable Agriculture*, 53–84.
- Sadzawka R., Carrasco, M., Grez, R., Z., Mora, G., Flores, P., Neaman, A. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 34. Santiago, Chile, 164 p.
- Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., Rivera, D. 2012. Métodos de Análisis Físicos de Suelos. Universidad de Concepción, Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales No. 5. Chillán, Chile. 80 p.
- Santibáñez, F. 2017. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, Libertador Bernardo O’Higgins y del Maule. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 212 p.
- Schoeneberger, P., Wysocki, D., Benham, E., Broderson, W. 2012. *Field book for describing and sampling soils*. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. Nebraska, USA. 235 p.
- Seguel, O., García de Cortázar, V., Casanova, M. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3): 287-299.
- Seguel, O., Horn, R. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 169 (2): 221-232.

- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J., González, C. Sandoval, M. 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11 (1): 1-15.
- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J. I., González, C., Poblete, L. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(3): 690-705.
- Seguel, O., Arancibia, G., Callejas, R., Sandoval A., Matamoros, A. 2018. Relación entre propiedades físicas del suelo y el potencial productivo de frutillas. pp: 13-30. En: Callejas, R., Díaz, V. (eds.). *Cultivo de la frutilla con identidad regional: Una visión actualizada de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins*, Provincia Cardenal Caro. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 30. Santiago, Chile. 103 p.
- Six, J., Elliott, E., Paustian, K. 2000. Soil Structure and Soil Organic Matter II. A Normalized Stability Index and the Effect of Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3): 1042–1049.
- Truog, E. 1946. Soil reaction influence on availability of plant nutrients. *Soil Science Society of America Proceedings*, 11: 305-308.
- Uribe, J., Cabrera, R., de la Fuente, A., Paneque, M. 2012. *Atlas bioclimático de Chile*. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 229 p
- Wachira P., Kimenju J., Okoth S., Kiarie J. 2014. Conservation and Sustainable Management of Soil Biodiversity for Agricultural Productivity. pp. 27-34 In: Kaneko N., Yoshiura S., Kobayashi M. (eds.) *Sustainable Living with Environmental Risks*. Springer, Tokyo.
- Warrick, A. 2002. *Soil physics companion*. CRC Press. Florida, USA. 403 p.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., & Peigné, J. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1): 1–20.
- Wezel, A., Herren, B., Kerr, R., Barrios, E., Gonçalves, A., Sinclair, F. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6): 1-13.
- Zeng, C., Wang, Q., Zhang, F., Zhang, J. 2013. Temporal changes in soil hydraulic conductivity with different soil types and irrigation methods. *Geoderma*, 193-194: 290-299.
- Zhang, J., Huang, Y., Lin, J., Chen, X., Li, C. 2020. Biochar applied to consolidated land increased the quality of an acid surface soil and tobacco crop in Southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 20(8): 3091–3102.

APÉNDICES

1. Análisis del Biol utilizado en el predio

Producto	pH (-)	CE (dS m ⁻¹)	N-total (mg L ⁻¹)	N-nitrato (mg L ⁻¹)	P-total (mg L ⁻¹)	P-fosfato (mg L ⁻¹)
Biol Ca	5,13	24,43	12,1	1,4	0,898	0,316
Biol P	4,95	13,61	15,4	0,8	0,632	0,303

2. Caracterización morfológica del suelo en estudio, Calicata 1

Profundidad (cm)

0 – 30	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2); franco arenosa fina; moderadamente plástico, ligeramente adhesivo; masivo; gravas de 1 a 3 cm redondeadas, comunes; raíces finas y muy finas abundantes; poros finos y muy finos abundantes; límite lineal claro.
30 – 50	Pardo oscuro (7.5 YR 3/3); areno francosa; no plástico, no adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos débiles; gravas redondeadas de 1 a 3 cm, escasas; raíces finas y medias abundantes; poros finos y muy finos abundantes; límite lineal muy abrupto
50 – 100 y más	Variegado, arenoso, grano simple; sustrato aluvial con 75% de fragmentos, desde grava a piedras; no plástico, no adhesivo; raíces muy finas escasas

3. Caracterización morfológica del suelo en estudio, Calicata 2

Profundidad (cm)

0 – 45	Pardo oscuro (7.5 YR 3/3); franco arcillo arenosa; moderadamente plástico, moderadamente adhesivo; bloques subangulares medios y finos, moderados; gravas finas a gruesas escasas, redondeadas; raíces finas y muy finas comunes; poros finos y muy finos abundantes, medios comunes, gruesos escasos; límite lineal abrupto.
45 – 85	Pardo oscuro (7.5 YR 3/4); franco arenosa; no plástico, no adhesivo; macizo; raíces finas escasas; poros finos y muy finos abundantes; límite lineal muy abrupto
85 – 100 y más	Lente de arena con gravas finas y medias de matriz arenosa; muy estratificado, con estratas de arena gruesa.

4. Densidad aparente en ambas evaluaciones del sector Transición

Manejos	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
	---- Mg m ⁻³ ----	
Transición (2019)	1,15 (±0,09)	1,31 (±0,07)
Transición (2020)	1,37 (±0,08)	1,41 (±0,04)

Promedio ± DS; Transición (2019) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en agosto de 2019, mientras que Transición (2020) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en enero de 2020.

5. Distribución de poros en ambas evaluaciones del sector Transición

Sectores	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
	% PDR (>50 μm)	
Transición (2019)	23,7 (±3,0)	21,1 (±2,1)
Transición (2020)	10,1 (±3,2)	10,1 (±2,5)
	% PDL (10-50 μm)	
Transición (2019)	7,1 (±1,0)	8,9 (±1,5)
Transición (2020)	3,7 (±1,6)	3,6 (±1,0)
	% PAU (0,2-10 μm)	
Transición (2019)	9,0 (±1,5)	10,1 (±2,3)
Transición (2020)	14,3 (±2,0)	12,9 (±2,1)
	% PAI (<0,2 μm)	
Transición (2019)	12,8 (±0,8)	13,5 (±1,0)
Transición (2020)	16,7 (±1,6)	18,1 (±0,4)

Promedio ± DS; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; PAU: poros de agua útil; PAI: poros de agua inútil; Transición (2019) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en agosto de 2019, mientras que Transición (2020) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en enero de 2020.

6. Estabilidad de microagregados en ambas evaluaciones del sector Transición

Sector	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
	---- RD % ----	
Transición (2019)	34,7 ($\pm 5,1$)	43,9 ($\pm 7,0$)
Transición (2020)	58,0 ($\pm 14,4$)	56,0 ($\pm 11,4$)

Promedio \pm DS; Transición (2019) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en agosto de 2019, mientras que Transición (2020) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en enero de 2020.

7. Resistencia a la penetración en ambas evaluaciones del sector Transición

Manejos	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
	---- N ----	
Transición (2019)	27 ($\pm 6,2$)	82,8 ($\pm 15,6$)
Transición (2020)	54,6 ($\pm 9,9$)	110,8 ($\pm 25,8$)

Promedio \pm DS; Transición (2019) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en agosto de 2019, mientras que Transición (2020) corresponde a las evaluaciones realizadas en este sector en enero de 2020.

8. Cambios relativos de todas las propiedades en relación al sector Transición

Sector	Cambios relativos (%)							
	Densidad aparente		Poros de drenaje rápido		Poros de agua útil		Estabilidad de microagregados (RD)	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
Núcleo floral	-5,8	-5,0	77,2	78,2	-33,4	-15,2	-28,8	-8,0
Cultivos hilerados	-2,2	-5,7	30,7	51,5	-39,9	-45,2	11,9	6,8
Praderas	-2,9	-0,7	49,5	35,6	-27,5	-19,5	26,6	8,7

Valores positivos y negativos indican aumentos y disminuciones en la propiedad evaluada, respectivamente, en comparación con el sitio Transición.

9. Cambios relativos de todas las propiedades en relación al sector Transición (continuación)

Sector	Cambios relativos (%)					
	Poros de drenaje lento		Poros de agua inútil		Resistencia a la penetración	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
Núcleo floral	193,0	202,5	-10,7	-12,7	-	-
Cultivos hilerados	193,7	246,5	-17,4	-24,0	59,0	9,4
Praderas	84,0	82,3	-5,5	-6,8	48,4	8,1

El sector de Núcleo floral no fue evaluado para la resistencia a la penetración debido a no encontrarse a capacidad de campo. Valores positivos y negativos indican aumentos y disminuciones en la propiedad evaluada respectivamente, en comparación con el sitio Transición.

10. Matriz de correlación de Pearson

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades

	Da	RD	PDR	PDL	PAU	PAI	Resistencia
Da	1,00	0,09	1,7E-07	0,01	0,04	2,6E-07	0,03
RD	0,27	1,00	0,02	0,31	0,78	0,46	0,02
PDR	-0,72	-0,36	1,00	1,5E-05	1,7E-03	1,1E-04	0,94
PDL	-0,41	-0,16	0,63	1,00	2,4E-06	1,7E-08	0,70
PAU	0,33	-0,05	-0,48	-0,67	1,00	2,7E-04	0,46
PAI	0,71	0,12	-0,57	-0,76	0,55	1,00	0,25
Resistencia	0,40	-0,42	-0,01	0,07	-0,14	0,22	1,00

Da: densidad aparente; RD: relación de dispersión; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; PAU: poros de agua útil; PAI: poros de agua inútil; Resistencia: Resistencia a la penetración.

11. Análisis de varianza

Densidad aparente

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Densidad aparente	40	0,27	0,12	5,10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,06	7	0,01	1,73	0,1382
Profundidad	0,01	1	0,01	2,63	0,1146
Tratamiento	0,04	3	0,01	2,52	0,0757
Profundidad*Tratamiento	0,01	3	3,0E-03	0,63	0,6001
Error	0,15	32	4,7E-03		
Total	0,21	39			

Medidas resumen

Profundidad	Tratamiento	Variable	n	Media	D.E.
0-10	Cultivos Hilerados	Densidad aparente	5	1,34	0,03
0-10	Núcleo floral	Densidad aparente	5	1,29	0,06
0-10	Praderas	Densidad aparente	5	1,33	0,09
0-10	Transición	Densidad aparente	5	1,37	0,09
10-20	Cultivos Hilerados	Densidad aparente	5	1,33	0,05
10-20	Núcleo floral	Densidad aparente	5	1,34	0,10
10-20	Praderas	Densidad aparente	5	1,40	0,05
10-20	Transición	Densidad aparente	5	1,41	0,04

Estabilidad de microagregados

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RD(%)	40	0,48	0,37	17,54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3110,07	7	444,30	4,25	0,0020
Tratamiento	2384,13	3	794,71	7,61	0,0006
Profundidad	50,14	1	50,14	0,48	0,4935
Tratamiento*Profundidad	675,80	3	225,27	2,16	0,1126
Error	3343,43	32	104,48		
Total	6453,50	39			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=9,31135

Error: 104,4821 gl: 32

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Núcleo floral	46,44	10	3,23 A
Transición	57,04	10	3,23 B
Cultivos Hilerados	62,39	10	3,23 B C
Praderas	67,22	10	3,23 C

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos Hilerados	0-10	RD(%)	5	64,9	8,3
Cultivos Hilerados	10-20	RD(%)	5	59,9	12,1
Núcleo floral	0-10	RD(%)	5	41,3	4,1
Núcleo floral	10-20	RD(%)	5	51,6	10,0
Praderas	0-10	RD(%)	5	73,4	5,7
Praderas	10-20	RD(%)	5	61,0	11,4
Transición	0-10	RD(%)	5	58,0	14,5
Transición	10-20	RD(%)	5	56,1	11,4

Poros de drenaje rápido (PDR)

PDR

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PDR	40	0,57	0,47	19,77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,03	7	4,7E-03	5,98	0,0002
Tratamiento	0,03	3	0,01	13,31	<0,0001
Profundidad	4,0E-05	1	4,0E-05	0,05	0,8219
Tratamiento*Profundidad	1,5E-03	3	4,9E-04	0,63	0,6038
Error	0,03	32	7,9E-04		
Total	0,06	39			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,02553

Error: 0,0008 gl: 32

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Transición	0,101	10	0,009 A
Cultivos hilerados	0,143	10	0,009 B
Praderas	0,144	10	0,009 B
Núcleo floral	0,180	10	0,009 C

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos hilerados	0-10 cm	PDR	5	0,132	0,032
Cultivos hilerados	10-20 cm	PDR	5	0,153	0,017
Núcleo floral	0-10 cm	PDR	5	0,179	0,028
Núcleo floral	10-20 cm	PDR	5	0,180	0,033
Praderas	0-10 cm	PDR	5	0,151	0,021
Praderas	10-20 cm	PDR	5	0,137	0,033
Transición	0-10 cm	PDR	5	0,101	0,032
Transición	10-20 cm	PDR	5	0,101	0,025

Poros de drenaje lento (PDL)

PDL

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PDL	40	0,80	0,75	22,41

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,04	7	0,01	17,94	<0,0001
Tratamiento	0,04	3	0,01	41,37	<0,0001
Profundidad	1,5E-05	1	1,5E-05	0,05	0,8322
Tratamiento*Profundidad	4,8E-04	3	1,6E-04	0,47	0,7032
Error	0,01	32	3,4E-04		
Total	0,05	39			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,01677

Error: 0,0003 gl: 32

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Transición	0,037	10	0,006	A
Praderas	0,067	10	0,006	B
Núcleo floral	0,109	10	0,006	C
Cultivos hilerados	0,117	10	0,006	C

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos hilerados	0-10 cm	PDL	5	0,110	0,014
Cultivos hilerados	10-20 cm	PDL	5	0,123	0,020
Núcleo floral	0-10 cm	PDL	5	0,110	0,023
Núcleo floral	10-20 cm	PDL	5	0,108	0,031
Praderas	0-10 cm	PDL	5	0,069	0,015
Praderas	10-20 cm	PDL	5	0,065	0,007
Transición	0-10 cm	PDL	5	0,037	0,016
Transición	10-20 cm	PDL	5	0,036	0,010

Poros de agua útil (PAU)

PAU

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PAU	40	0,47	0,35	24,36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,02	7	2,6E-03	4,01	0,0030
Tratamiento	0,02	3	0,01	8,54	0,0003
Profundidad	1,7E-04	1	1,7E-04	0,26	0,6150
Tratamiento*Profundidad	1,4E-03	3	4,8E-04	0,73	0,5405
Error	0,02	32	6,6E-04		
Total	0,04	39			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,02332

Error: 0,0007 gl: 32

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Cultivos hilerados	0,078	10	0,008	A
Núcleo floral	0,102	10	0,008	B
Praderas	0,104	10	0,008	B
Transición	0,136	10	0,008	C

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos hilerados	0-10 cm	PAU	5	0,086	0,021
Cultivos hilerados	10-20 cm	PAU	5	0,071	0,019
Núcleo floral	0-10 cm	PAU	5	0,095	0,052
Núcleo floral	10-20 cm	PAU	5	0,109	0,019
Praderas	0-10 cm	PAU	5	0,104	0,010
Praderas	10-20 cm	PAU	5	0,104	0,020
Transición	0-10 cm	PAU	5	0,143	0,020
Transición	10-20 cm	PAU	5	0,129	0,021

Poros de agua inútil (PAI)

PAI

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PAI	40	0,71	0,65	6,35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	7	1,1E-03	11,42	<0,0001
Tratamiento	0,01	3	2,4E-03	23,76	<0,0001
Profundidad	5,7E-04	1	5,7E-04	5,77	0,0223
Tratamiento*Profundidad	2,8E-04	3	9,5E-05	0,95	0,4260
Error	3,2E-03	32	9,9E-05		
Total	0,01	39			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,00908

Error: 0,0001 gl: 32

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Cultivos hilerados	0,14	10	3,2E-03	A
Núcleo floral	0,15	10	3,2E-03	B
Praderas	0,16	10	3,2E-03	C
Transición	0,17	10	3,2E-03	D

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,00642

Error: 0,0001 gl: 32

Profundidad	Medias	n	E.E.	
0-10 cm	0,15	20	2,2E-03	A
10-20 cm	0,16	20	2,2E-03	B

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos hilerados	0-10 cm	PAI	5	0,138	0,008
Cultivos hilerados	10-20 cm	PAI	5	0,137	0,006
Núcleo floral	0-10 cm	PAI	5	0,150	0,009
Núcleo floral	10-20 cm	PAI	5	0,158	0,012
Praderas	0-10 cm	PAI	5	0,158	0,010
Praderas	10-20 cm	PAI	5	0,168	0,009
Transición	0-10 cm	PAI	5	0,167	0,016
Transición	10-20 cm	PAI	5	0,181	0,004

Resistencia a la penetración

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N	60	0,63	0,54	54,89

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	286445,73	11	26040,52	7,39	<0,0001
Tratamiento	515,63	2	257,82	0,07	0,9295
Profundidad	248779,07	3	82926,36	23,54	<0,0001
Tratamiento*Profundidad	37151,03	6	6191,84	1,76	0,1282
Error	169129,20	48	3523,53		
Total	455574,93	59			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=43,58040

Error: 3523,5250 gl: 48

Profundidad	Medias	n	E.E.
3	35,07	15	15,33 A
10	76,80	15	15,33 A B
20	111,27	15	15,33 B
30	209,40	15	15,33 C

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

Medidas resumen

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Cultivos hilerados	3	N	5	22,40	15,37
Cultivos hilerados	10	N	5	54,40	17,80
Cultivos hilerados	20	N	5	121,20	72,92
Cultivos hilerados	30	N	5	228,00	96,97
Praderas	3	N	5	28,20	14,41
Praderas	10	N	5	69,80	25,47
Praderas	20	N	5	101,80	22,72
Praderas	30	N	5	249,20	147,40
Transición	3	N	5	54,60	9,96
Transición	10	N	5	106,20	15,12
Transición	20	N	5	110,80	25,83
Transición	30	N	5	151,00	54,00

Densidad aparente: Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	Da	5	1,150	0,095
Transición (2019)	10-20	Da	5	1,314	0,071
Transición (2020)	0-10	Da	5	1,370	0,088
Transición (2020)	10-20	Da	5	1,413	0,042

Estabilidad de microagregados: Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	RD	5	34,77	5,13
Transición (2019)	10-20	RD	5	43,92	7,01
Transición (2020)	0-10	RD	5	58,01	14,48
Transición (2020)	10-20	RD	5	56,06	11,45

Poros de drenaje rápido (PDR): Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	PDR	5	0,237	0,030
Transición (2019)	10-20	PDR	5	0,211	0,021
Transición (2020)	0-10	PDR	5	0,101	0,032
Transición (2020)	10-20	PDR	5	0,101	0,025

Poros de drenaje lento (PDL): Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	PDL	5	0,071	0,010
Transición (2019)	10-20	PDL	5	0,089	0,015
Transición (2020)	0-10	PDL	5	0,037	0,016
Transición (2020)	10-20	PDL	5	0,036	0,010

Poros de agua útil (PAU): Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	PAU	5	0,090	0,015
Transición (2019)	10-20	PAU	5	0,101	0,023
Transición (2020)	0-10	PAU	5	0,143	0,020
Transición (2020)	10-20	PAU	5	0,129	0,021

Poros de agua inútil (PAI): Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	PAI	5	0,128	0,008
Transición (2019)	10-20	PAI	5	0,135	0,010
Transición (2020)	0-10	PAI	5	0,167	0,016
Transición (2020)	10-20	PAI	5	0,181	0,004

Resistencia a la penetración: Transición 2019 y Transición 2020**Medidas resumen**

Tratamiento	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.
Transición (2019)	0-10	Resistencia	5	27,00	6,20
Transición (2019)	10-20	Resistencia	5	82,80	15,61
Transición (2020)	0-10	Resistencia	5	54,60	9,96
Transición (2020)	10-20	Resistencia	5	110,80	25,83