



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CON MANEJO
AGROECOLÓGICO EN EL VALLE DE QUILLOTA**

**ASSESSMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF A SOIL WITH
AGROECOLOGICAL MANAGEMENT IN QUILLOTA VALLEY**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MANEJO DE SUELOS Y
AGUAS**

BERTHIN TICONA CORTAVITARTE

Directores de Tesis

**MANUEL CASANOVA PINTO
OSVALDO SALAZAR GUERRERO**

Profesores consejeros

**OSCAR SEGUEL SEGUEL
YASNA TAPIA FERNANDEZ**

Evaluador Externo

EDUARDO GRATACÓS NARANJO

SANTIAGO DE CHILE

2020

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CON MANEJO
AGROECOLÓGICO EN EL VALLE DE QUILLOTA**

**ASSESSMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF A SOIL WITH AGROECOLOGICAL
MANAGEMENT IN QUILLOTA VALLEY**

Tesis presentada para optar al Grado de Magíster en Suelos y Aguas

BERTHIN RENZO TICONA CORTAVITARTE

	Calificaciones
Directores de Tesis	
Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, MSc.	6,8
Osvaldo Salazar G. Ingeniero Agrónomo, MSc. Ph.D.	7,0
Profesores Consejeros	
Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
Yasna Tapia F. Ingeniera en Alimentos, Dra.	6,8

Santiago - Chile

2020

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a mis padres Berty Ticona y Elsa Cortavitarate por haberme brindado siempre su apoyo, por el esfuerzo que hicieron para educarme y por sus consejos para tratar de seguir una vida correcta.

A los profesores Manuel Casanova y Osvaldo Salazar, por haberme hecho partícipe de este proyecto y en especial al profesor Manuel, quien fue mi guía en todo este proceso, por sus recomendaciones y por su paciencia.

Al Centro Regional de Innovación Hortofrutícola de Valparaíso - CERES y en especial a Gonzalo Ávila, por la buena disposición al apoyarme en las evaluaciones en terreno, alojarme en su casa y mostrarme un poco más sobre la cultura chilena.

Al profesor Oscar Seguel, por su amistad y por cambiar mi paradigma de cómo ser un profesional. La motivación que comparte en el laboratorio y la personalidad única que usted tiene es algo que influirá en muchos profesionales del suelo. Extrañare sus clases de catación.

A Andrea Joven y Melsen Espinal. Amigos compartimos muchas cosas, buenos y malos momentos, he aprendido bastante con ustedes, espero que también hallan aprendido algo de mí. Gracias por todos los consejos y recordemos los buenos tiempos.

A los amigos que hice durante estos dos años, gente con quien compartí excelentes momentos y me permitieron conocer un poco más de sus países y de sus culturas: Lwando Mashalaba, Munir Naimo, Valentina Cárdenas, Jimmy Cordero y Daniel Molina. Los extrañare bastante y espero verlos en algún momento de nuevo. Además, a mis amigos de la beca que, si bien fuimos varios los que comenzamos esta aventura, ellos siempre estuvieron allí: Lesly Pereida, Jasson Fernández y Juan Bautista.

A los amigos del laboratorio de Física de Suelos: Eli Ramírez, Rodolfo Torres, Alonso Matamoros, Andrés Domínguez, Nico Alarcón, Francisca Naar, Ricardo Quintana y Angela Faundez, que hicieron que pasara excelentes momentos y por enseñarme muchas cosas de su país; un agradecimiento especial al Sr. Hugo Pérez, nunca cambie su personalidad optimista y luchadora. No me olvido de los amigos de química: Gonzalo Bordonos, Pablo Gómez y especialmente a la Sra. Consuelo Aguilera (nunca deje de sonreír).

Finalmente, quiero agradecer al Sr. Douglas Jackson, por las largas charlas en la sala y por todos sus consejos; a la Sra. Nelka de Castro, por sus conversaciones y al animarme con ese carácter tan jovial y a Canek Jackson, por su amistad y otras maldades. Todos grandes amigos y que hicieron que tuviera una grata convivencia (gracias por hacerme sentir como en casa).

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
Degradación de suelos.....	3
Compactación de los suelos	3
Alternativas de manejo del suelo frente a la compactación	4
Calidad del suelo e intensidad de uso	6
Influencia de las tecnologías de labranza en la calidad del suelo	8
HIPÓTESIS.....	9
OBJETIVOS	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
MATERIALES Y MÉTODO	10
Sitio de estudio.....	10
Tratamientos y diseño del experimento	11
Propiedades del suelo evaluadas	14
Análisis estadístico.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Propiedades del suelo.....	16
Determinación de indicadores físicos de calidad del suelo.....	32
CONCLUSIONES	39
LITERATURA CITADA.....	40
ANEXOS	48
APÉNDICES.....	53

RESUMEN

La degradación del suelo implica la pérdida de sus funciones, afectando sus propiedades. Puntualmente, la compactación se considera el problema ambiental más grave causado por la agricultura moderna. La eointensificación del suelo es una alternativa frente a este problema y se expresa mediante prácticas agroecológicas. Este estudio se realizó en el año 2019 y evaluó el efecto de cuatro manejos agroecológicos más un testigo sobre las propiedades físicas de un Mollisol en la Provincia de Quillota (Chile Central). Los manejos fueron: cubierta vegetal pratense anual en seco (1-S), cubierta vegetal pratense perenne de raíz profunda (2-N), cubierta vegetal pratense anual y perenne (4-S) y cubierta vegetal de hortalizas y flores (4-N), además de un testigo con manejo convencional (T-0). Se evaluaron 4 repeticiones por manejo a 3 profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm) y se utilizó análisis de componente principales (ACP) para determinar los indicadores de la calidad del suelo. La degradación a la cual fue sometida el suelo por el efecto de la compactación se reflejó en las propiedades relacionadas a la porosidad y a la densificación del suelo: T-0 presentó una mayor densidad aparente (D_a) y una mayor resistencia mecánica en comparación al resto de los tratamientos; en superficie los cuatro manejos agroecológicos presentaron una baja D_a , incrementándose en profundidad. En relación a la resistencia mecánica, 4-N presentó baja compactación, aumentando también en profundidad. Debido al corto tiempo de establecimiento de los manejos, no se observó estabilidad de macroagregados (<1,2 mm) y microagregados (<30%). No se presentaron limitaciones en la conductividad hidráulica, destacando 1-S por presentar valores muy altos, asociados a la materia orgánica y a un mayor porcentaje de grava. T-0 presentó mayores valores de agua retenida a 33 kPa y 1500 kPa, pero una menor cantidad de agua útil, relacionados a una mayor compactación. Los manejos agroecológicos presentaron mayores valores de agua útil y poros gruesos. Se seleccionó como indicadores de calidad de suelo: resistencia a la penetración, agua útil, capacidad de campo, conductividad hidráulica, poros de drenaje rápido, índice de estabilidad estructural y porosidad entre agregados, los cuales serán evaluados cada dos años.

Palabras clave: Compactación, eointensificación, cubierta vegetal, indicadores de calidad.

ABSTRACT

Soil degradation implies loss of its functions, affecting its properties. Specifically, compaction is considered most serious environmental problem caused by modern agriculture. Soil eco-intensification is an alternative to this problem and is expressed through agroecological practices. This study was carried out during 2019 and evaluated effect of four agroecological management plus one control on physical properties of a Mollisol in the Quillota Valley (Central Chile). The management was: annual dry cover crop (1-S), deep root perennial cover crop (2-N), annual and perennial cover crop (4-S) and vegetable cover of vegetables and flowers (4- N), in addition to a control, with conventional management (T-0). Four repetitions per management at 3 depths (0-20, 20-40 and 40-60 cm) were evaluated and principal component analysis (ACP) was used to determine some indicators of soil quality. The degradation to which soil was subjected by effect of compaction was reflected in properties related to porosity and soil densification: T-0 presented a higher soil bulk density (D_a) and greater soil mechanical resistance than the other treatments; on soil surface, four agroecological managements presented a low D_a , which was increasing in depth. Regarding mechanical resistance, 4-N presented low compaction, but also increasing in depth. Due to the short time of treatments establishment, stability of macroaggregates (<1.2 mm) and microaggregates (<30%) was not observed. There were no limitations in hydraulic conductivity, highlighting 1-S for presenting very high values, associated with organic matter contents and a higher amount of gravel. T-0 presented higher values of retained water at 33 kPa and 1500 kPa, but a lower amount of useful water, related to greater compaction. Agroecological management presented higher values of available water and thick pores than T-0. Selected soil quality indicators were: resistance to penetration, available water, water retention to 33 kPa, hydraulic conductivity, fast drainage pores, structural stability index and porosity between aggregates, which will be evaluated every two years.

Key words: Compaction, eco-intensification, cover crops, quality indicators.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Degradación de suelos

La degradación del suelo constituye la pérdida de las funciones del suelo, originándose por un uso inadecuado y pudiendo verse agravada por el cambio climático (Alam, 2014). Puede ocurrir tanto a través de procesos erosivos como no erosivos, encontrándose dentro de estos últimos aquellos de naturaleza física (subsistencia, sellamiento, compactación, etc.), química (acidificación, salinización, etc.) y biológica como la pérdida de biodiversidad y de materia orgánica en el suelo (MOS). Así, según Gomiero (2016) los factores que principalmente determinan el tipo de degradación son: las propiedades del suelo, el clima, las características geomorfológicas y de drenaje, así como la cobertura vegetal en función de la biomasa y la biodiversidad.

La explotación del suelo, más allá de sus capacidades o funciones, es la principal causa de su degradación, ya que la agricultura moderna prácticamente se limita a buscar el incremento máximo en la producción, intensificando el uso de los suelos sin importar sus consecuencias (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Esta sobreexplotación se aprecia a través de prácticas como: sobrelaboreo, monocultivo, ausencia de prácticas de conservación, quema de rastrojos y sobrecarga por maquinaria agrícola (López, 2002).

Los procesos de degradación no erosivos físicos conllevan a una reducción de la porosidad, y en consecuencia a un deterioro de las relaciones aire - agua en el suelo, entre los que destacan la compactación, el sellamiento y el encostramiento, además de la desestabilización de la estructura y el incremento en los procesos de anaerobiosis (Horn y Fleige, 2009). Por otra parte, la degradación no erosiva química se advierte por la pérdida de sus capacidades para suplir nutrientes, amortiguar el pH, descomponer la MOS e inactivar/degradar metales tóxicos (Verdoodt, 2012).

Compactación de los suelos

La compactación de suelos se considera el problema ambiental más grave causado por la agricultura moderna (Mc-Garry, 2001; Horn y Fleige, 2009). Se caracteriza por procesos de densificación, los cuales disminuyen la porosidad y la permeabilidad significativamente, aumentando la resistencia a la penetración e induciendo cambios negativos en la estructura y en el comportamiento del suelo (Verdoodt, 2012). En este sentido, la compactación altera la disposición espacial, el tamaño y la forma de los agregados y, en consecuencia, los espacios porosos tanto dentro como entre estas unidades fundamentales (Defosse y Richard, 2002). Estas propiedades físicas tienen una influencia importante en la elongación de las raíces y en el almacenamiento y movimiento del agua, así como de gases y calor del suelo (López, 2002). El efecto de la compactación sobre el transporte, la absorción y la transformación de nutrientes está influenciado por la alteración del estado de aireación del suelo, las

propiedades hidráulicas y el transporte difusivo de nutrientes hacia las raíces (Lipiec *et al.*, 2002).

Varios autores (Hamza y Anderson, 2005; Bilotta *et al.*, 2007; Mirsal, 2008) reconocen como las principales causas de la compactación a la labranza, otras operaciones agrícolas mecanizadas (aplicación de plaguicidas, por ejemplo), la rotación mínima de cultivos y el tránsito (principalmente de ganado). La labranza, recolección, distribución y aplicación de productos químicos o fertilizantes, además de las labores de cosecha, son las operaciones más comunes que en la mayoría de los campos se realizan con máquinas pesadas, las cuales ejercen una fuerte presión en la zona subyacente a las ruedas (Hamza y Anderson, 2005). Para Botta *et al.* (2002) el tráfico vehicular es el principal responsable de la compactación inducida en suelos bajo producción, siendo la textura, la estructura y el contenido de agua los aspectos más relevantes en relación con la reducción del espacio poroso.

Finalmente, se destaca el contenido de agua como el factor más importante que influye en los procesos de compactación del suelo. En todos los niveles de compactación, la resistencia a la penetración aumenta con la disminución del potencial hídrico del suelo (Lipiec *et al.*, 2002), pero el diferencial de la resistencia evaluada en condición seca y húmeda disminuirá si existe una estructura estable, sustentada en aportes continuos de MOS (Stock y Downes, 2008).

Alternativas de manejo del suelo frente a la compactación

Ante los procesos degradativos del suelo, se observa en la literatura diversas formas de enfrentarlos, entre las que últimamente destaca la eointensificación inteligente de los agroecosistemas. Esta estrategia deriva de los principios de la agroecología e implica la limitación de los insumos antropogénicos sin perjudicar la productividad del cultivo, disminuyendo el uso de insumos externos a través de un mejor uso de los recursos naturales (Gover *et al.*, 2017). La eointensificación inteligente surge para describir a un sistema de producción que satisface el aumento de la demanda de alimentos y que cumple con los estándares de calidad ambiental; los puntos claves de esta se han asociado con la ecoeficiencia y se han centrado en la producción de alimentos y la protección del ambiente (Dension, 2012).

En la Figura 1, las flechas amarillas muestran la relación de las fuentes de entrada, salida y los procesos reguladores internos realizados por la biota y la MOS (indicado por las formas coloreadas en el suelo) en relación con la intensidad del manejo del suelo. Los sistemas agrícolas extensivos presentan altos contenidos de MOS y mayores poblaciones de microorganismos, además se caracterizan por una baja productividad (bajas fuentes de entrada y salida) y una alta tasa de procesos de regulación interna. Los sistemas agrícolas intensivos tienen una baja actividad biológica y un alto consumo de MOS; se caracterizan por altas entradas y salidas de insumos, una baja tasa en los procesos de regulación interna, pero una alta productividad. La eointensificación combina idealmente las características de ambos sistemas y conduce a sistemas sostenibles que presentan un adecuado contenido de MOS, vida abundante en el suelo y se caracteriza por entradas de recursos moderados, una

tasa alta de procesos de regulación interna, baja pérdida de nutrientes y una alta productividad (Bommarco *et al.*, 2013).

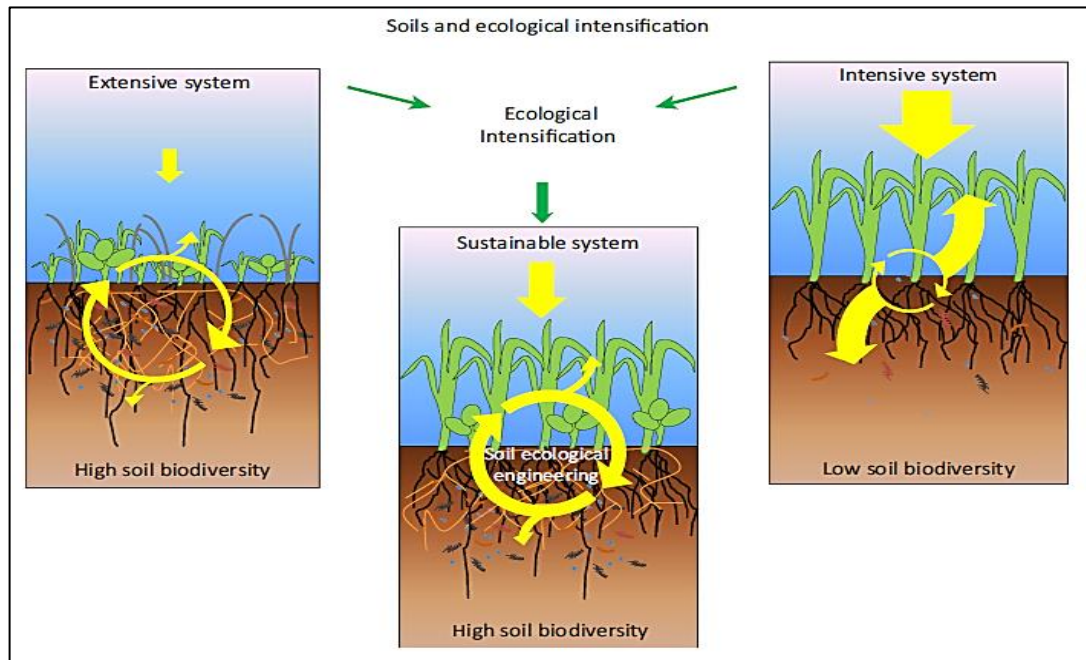


Figura 1. Modelo esquemático aplicando el concepto de ecoinintensificación a los suelos (Bommarco *et al.*, 2013).

Manejo agroecológico de cultivos

La agroecología se enfoca en incorporar ideas de una agricultura más sensible desde el punto de vista ambiental y social, centrándose no solo en la producción sino también en la sostenibilidad ecológica del sistema de producción. Algunos ejemplos de prácticas agroecológicas que se mencionan en la literatura son: cultivos cubiertos, la incorporación de abonos verdes al suelo, cultivos intercalados, agroforestería, prácticas orientadas a conservar los recursos y la biodiversidad, y la integración ganadera (Altieri, 2002; Wojtkowski, 2006).

El manejo agroecológico consiste en favorecer los procesos naturales e interacciones biológicas para optimizar sinergias, de modo tal que la agrobiodiversidad sea capaz de mantener procesos como la acumulación de MOS, la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos. Se diferencia del manejo convencional, pues este tiende al monocultivo, al uso de insumos externos para la producción (fertilizantes inorgánicos, agroquímicos) y elevada intensidad de labranza (Altieri y Nicholls, 2007). El manejo de sistemas agroecológicos tiene como principio la adición permanente de MOS a los suelos, esta permite mejorar y estabilizar las condiciones del suelo tanto físicas, químicas como biológicas (Altieri, 1995).

Las prácticas agroecológicas contribuyen a mejorar la sostenibilidad de los agroecosistemas al basarse en varios procesos ecológicos y servicios ecosistémicos, tales como: el ciclo de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno (N), la regulación natural de plagas, la

conservación del suelo y el agua, la conservación de la biodiversidad y el secuestro de carbono (C) en el suelo (Wezel *et al.*, 2013).

Conversión a un manejo agroecológico

Hill y MacRae (1995) plantearon una transición agrícola hacia una agricultura sostenible definiendo tres etapas consecutivas: aumento de la eficiencia, sustitución y rediseño. El aumento de la eficiencia se refiere a prácticas que reducen el consumo de insumos (agua, pesticidas y fertilizantes) y mejoran la productividad de los cultivos. Las prácticas de sustitución se refieren al reemplazo de insumos o de prácticas de manejo convencionales. Finalmente, el rediseño se refiere al cambio de todo el sistema de cultivo o incluso el propio cultivo. Estas prácticas se aplican ya sea a nivel de cultivo o a nivel de elementos del paisaje. A nivel de cultivo, se distinguen: elección del cultivo, su distribución espacial y sus sucesiones temporales, labranza, fertilización, riego y prácticas de control biótico (malezas, plagas y enfermedades). A nivel de elementos del paisaje, se distinguen prácticas a diferentes escalas espaciales (Wezel *et al.*, 2013).

Calidad del suelo e intensidad de uso

Desde un punto de vista agronómico, Gregorich *et al.* (1994) definen la calidad de suelo como la capacidad o aptitud del suelo para apoyar el crecimiento del cultivo sin degradarlo, promoviendo la productividad del sistema, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Una definición más global implicaría que el suelo tenga la capacidad de funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sosteniendo la productividad de plantas y animales, manteniendo o mejorando la calidad del aire y del agua, atenuando contaminantes ambientales y patógenos, favoreciendo además la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997; Bautista *et al.*, 2004).

La calidad del suelo constituye uno de los tres componentes de la calidad ambiental, además de la calidad del agua y del aire (Andrews *et al.*, 2002). Es importante destacar que los suelos, en comparación al agua y el aire, a menudo reaccionan lentamente a los cambios en el uso y manejo, y por esa razón puede ser más difícil detectar cambios en su calidad antes que ocurra un daño irreversible (Nortcliff, 2002). La magnitud de la calidad del suelo se basa en diferentes propiedades intrínsecas a él, cada una de las cuales tiene categorizaciones respecto a los niveles óptimos o deseados para el desarrollo de biomasa y otras funciones ambientales; la integración de ellas genera un resultado final, cuya magnitud se puede relacionar a la calidad (Doran y Parkin, 1994).

El concepto de intensidad de uso del suelo fue establecido para medir la productividad inducida por el ser humano. Esta productividad está influenciada principalmente por el grado de intervención del hombre (labranza, permanencia del cultivo, selección del cultivo, rotaciones, aplicación de enmiendas, laboreo, etc.) y estos a la vez están en función del nivel tecnológico. Una mayor intensidad de uso implicaría una mayor productividad y por ende un mayor rendimiento (Dietrich *et al.*, 2012). Los suelos con una baja intensidad de uso (menos

perturbados) pueden tener una alta calidad, además de altos contenidos de C orgánico (Parras-Alcántara *et al.*, 2015) y mayor agregación (Grandy y Robertson, 2007), pero baja productividad. El estudio del impacto de los diferentes sistemas de intensidad de uso del suelo es esencial para definir mejores estrategias para el uso del suelo y mejorar su calidad (Paz-Ferreiro *et al.*, 2007).

Indicadores de calidad de suelos

Los indicadores de calidad son propiedades que se miden en el suelo con el objetivo de observar los cambios en su condición física, química y biológica y pueden representar el estado del sistema o su capacidad para realizar ciertas funciones (Cuadro 1). Estos indicadores, a fin de ser empleados para monitorear tanto la mejora como la disminución de la calidad, deben ser sensibles a los cambios en el suelo, fáciles de medir, interpretar y replicar (Mac-Ewan, 2007).

Cuadro 1. Ejemplos de indicadores del suelo para el seguimiento y restauración de su calidad (Modificado de Sparling *et al.*, 2004a; Costantini *et al.*, 2016).

	Indicadores del suelo	Relevancia en los procesos y funciones del suelo.
Físico	Densidad aparente	Penetración de las raíces, porosidad, intercambio de gases, compactación de suelos.
	Infiltración	Control de la escorrentía/erosión, lixiviación.
	Capacidad de retención de agua	Retención y transporte de agua y compuestos químicos.
	Profundidad del suelo	Enraizamiento, hábitat para la fauna del suelo.
	Agregación, estructura.	Erodabilidad, retención de nutrientes y MOS.
	Macroporosidad	Aireación del suelo y compactación.
	Estabilidad de agregados	Estabilidad estructural del suelo.
Químico	Materia orgánica	Contenido de C orgánico, ciclo de nutrientes, estructura del suelo, retención de agua y metales.
	Nitrógeno total	Estado del N en la MOS, desarrollo de plantas y fauna del suelo.
	Fósforo	Disponibilidad de fósforo para las plantas.
	Potasio, calcio y magnesio disponibles.	Saturación básica.
	pH	Disponibilidad de nutrientes, absorción y movilidad de metales.
	Conductividad eléctrica	Salinidad y potencial total del agua en el suelo.

En cuanto a los indicadores físicos, Cass *et al.* (2002) enumeran seis propiedades que permiten evaluar la condición estructural del suelo y la resistencia a la degradación física: tasa de infiltración, capacidad de almacenamiento de agua disponible para la planta, porosidad, resistencia a la penetración, estabilidad de agregados y humectación. A estos se les podría agregar la consistencia y la densidad aparente del suelo (Da) (Sparling *et al.*, 2004b). Es importante señalar que una propiedad física individual no podría expresar por sí sola la calidad física de un suelo, sino que se requiere una observación integrada de distintas propiedades para obtener un juicio más preciso (Casanova *et al.*, 2008).

La función principal del suelo, con relación a su calidad química, es proporcionar nutrientes para el crecimiento del cultivo (White, 2010). Las propiedades químicas que se han utilizado como indicadores en sistemas agrícolas son: pH, capacidad tampón del pH, contenido de C orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), sodio intercambiable, salinidad, N total, fósforo y potasio disponibles, y contenido de micronutrientes (Oliver *et al.*, 2013).

Influencia de las tecnologías de labranza en la calidad del suelo

El propósito de tener una condición ideal del suelo para el crecimiento radicular está relacionado con los sistemas de labranza. La condición ideal de la estructura del suelo permite a la parte aérea de la planta fotosintetizar y desarrollarse a su máxima expresión, mientras no existan limitaciones en el suministro de agua, aire, exploración radical, temperatura, nutrientes y sustancias húmicas que estimulan el crecimiento de la planta de manera equilibrada entre la parte aérea y la subterránea (Vaz *et al.*, 2001).

Actualmente tienen gran importancia los sistemas de preparación del suelo con características conservacionistas, preservando la estructura del suelo y la calidad del ambiente (Albiero *et al.*, 2011). La labranza convencional, basada en arados de disco o de vertedera, con quema de rastrojo, monocultivo y alta intensidad de tránsito, es una de las causas principales de degradación de los suelos (Karlen *et al.*, 2013). La labranza convencional altera la estructura del suelo, generando un aumento de la resistencia mecánica por debajo de la zona de labranza (Fuentes *et al.*, 2009), originándose una compactación subsuperficial. También genera una disminución del contenido de MOS, producto de su oxidación tras las sucesivas inversiones en el suelo, contribuyendo a la disminución de la estabilidad de agregados (Seguel *et al.*, 2015). A pesar de que la labranza convencional puede incrementar momentáneamente el volumen de los poros gruesos, la continuidad de dichos poros puede ser destruida (Huggins y Reganold, 2008).

Sohail-Ijaz y Ali (2011) demostraron que la sustitución de los barbechos desnudos con labranza intensiva por mínima labranza proporciona una opción viable y rentable tanto para la preservación del suelo como su productividad. Es una estrategia de conservación que deja al menos un 30 % de cobertura de residuos, lo que minimiza la escorrentía y la erosión hídrica sobre el suelo, además de promover un mayor contenido de MOS (Rusu, 2014). Por otra parte, Sandoval *et al.* (2008) demostraron que la labranza cero y la permanencia de rastrojos en superficie, posibilitan la sostenibilidad de los suelos. La labranza cero generalmente se asocia con altos niveles de residuos de cosecha que quedan en la superficie del suelo y generan efectos favorables en la retención del agua, aumentan el contenido de MOS y la estabilidad de agregados en superficie, además de disminuir la escorrentía superficial (Mulumba y Lal, 2008; Jordán *et al.*, 2010). Finalmente, Novelli *et al.* (2017) concluyen que, indistintamente del sistema de labranza, a mayor tiempo con presencia de cultivos vivos en la superficie, mayor el potencial de captura de Carbono en el suelo, por lo que resulta recomendable el uso de cultivos permanentes y los policultivos en los sistemas agrícolas. Todos estos manejos son altamente compatibles con el enfoque de ecointensificación inteligente, por lo que amerita estudiar cuál de ellos presenta la mayor potencialidad para asegurar la calidad del suelo y sus funciones ecosistémicas.

HIPÓTESIS

El cambio en el uso del suelo hacia distintos manejos agroecológicos con baja, media y alta intensidad de uso, mejoran las propiedades físicas del suelo, en comparación a un manejo convencional de paltos en el valle de Quillota.

OBJETIVOS

Objetivo general

Luego de 3 años de manejo agroecológico, verificar los cambios en las propiedades físicas de un suelo, en comparación al mismo suelo con manejo convencional en la zona agrícola del valle de Quillota.

Objetivos específicos

1. Evaluar las principales propiedades físicas del suelo bajo diferentes manejos agroecológicos y establecer las diferencias con el testigo.
2. Definir los indicadores físicos de calidad del suelo, además de su frecuencia de evaluación, para evaluar los cambios en las propiedades de estos suelos bajo manejo agroecológico.

MATERIALES Y MÉTODO

Sitio de estudio

El estudio se realizó durante el año 2019 en la localidad de Quillota (sector la Palma), Provincia de Quillota, en la Región de Valparaíso (Figura 2); el predio corresponde al Centro Regional de Innovación Hortofrutícola de Valparaíso - CERES, ubicado aproximadamente a 9 km de la ciudad de Quillota. Se encuentra a una altitud promedio de 220 msnm ($32^{\circ}53'S$ y $71^{\circ}12'W$).

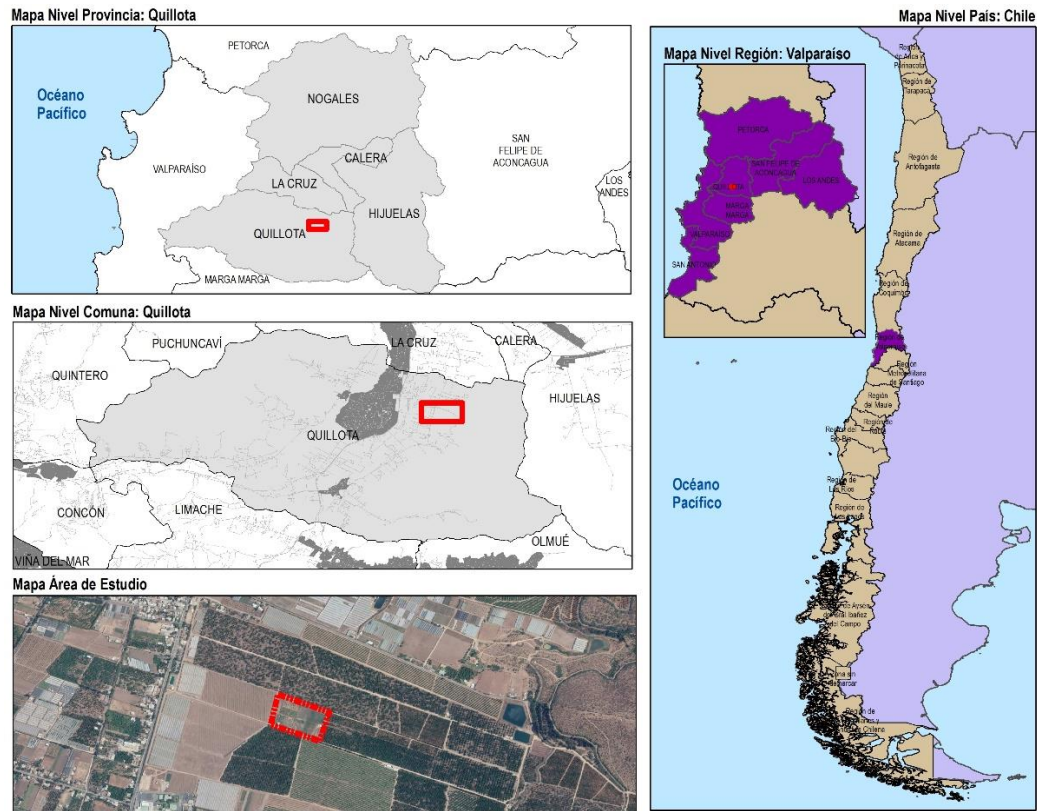


Figura 2. Localización del área de estudio.

El suelo en la zona de estudio pertenece taxonómicamente a la Serie Hijuelas, miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls. Son suelos sedimentarios, de origen coluvial, profundos y derivados de rocas neutras a básicas. Presentan generalmente una clase textural franca y de colores pardo a pardo oscuro en profundidad. La topografía es suavemente inclinada (piedmont) con una pendiente máxima de 2%, de permeabilidad moderada y de buen drenaje (CIREN, 1997).

Según Santibáñez *et al.* (2017) la zona de estudio está ubicada en el Distrito Agroclimático 5-2 (Quillota). De acuerdo a la clasificación de Köppen, el clima es de tipo templado cálido con régimen de humedad semiárido (Csb2Sa). La temperatura varía entre un promedio

máximo de enero de 27,5 °C (máx. de 30°C y mín. de 25,9°C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 5,4°C (máx. de 7°C y mín. de 4,8°C dentro del distrito). La precipitación media anual es de 429 mm y la ETo alcanza los 1350 mm anuales.

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

Trabajo preliminar del Centro Regional de Innovación Hortofrutícola de Valparaíso (CERES)

CERES trabajó un área de 2,2 ha (Anexo 1), el cual había estado bajo manejo convencional para un huerto de paltos (*Persea americana* Mill.) y cuyo suelo presentaría procesos de degradación. Para la recuperación del suelo, se realizaron varias labores (Anexo 2). Como primera etapa, se realizó un subsolado a una profundidad de 60 cm. La segunda etapa consistió en mejorar el suelo mediante tres siembras consecutivas de especies pratenses, con el propósito de cosechar una alta cantidad de biomasa que se incorporó al suelo en junio de 2015, enero de 2016 y mayo de 2016. En base a un levantamiento topográfico, se trazaron y marcaron curvas de nivel con una equidistancia de 50 cm. Finalmente, se elaboró un diseño agroecológico para la distribución de los distintos tratamientos en el predio (Anexo 1).

Tratamientos y diseño del experimento

Debido a la naturaleza del diseño agroecológico, las mediciones se realizaron en los sectores con cultivo de cubierta, no considerando las zonas de hilera de los árboles frutales (Figura 3), debido a que no en todos los tratamientos se han establecido completamente las especies frutales. Para cada tratamiento y el testigo (huerto de paltos aledaño), se realizaron 4 calicatas, para describir morfológicamente el perfil y caracterizar su variabilidad horizontal y vertical, además de verificar las alteraciones respecto a la Serie de suelos a la que pertenecen. Cada calicata fue georeferenciada, para realizar estas mismas evaluaciones en los siguientes años y evitar errores en los siguientes muestreos.

Se tomaron tres muestras de suelos a tres profundidades (0 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), las que mezcladas constituyen una muestra compuesta para cada profundidad. En síntesis, se contó con 60 muestras compuestas: 4 tratamientos más 1 testigo x 3 profundidades x 4 repeticiones. Para el almacenamiento y procesamiento de las muestras de suelo se utilizó la metodología establecida de Sandoval *et al.* (2012) y Sadzawka *et al.* (2006), para los análisis físicos y químicos, respectivamente. Los cuatro tratamientos y el testigo se sintetizan en el Cuadro 2 y se caracterizan en Anexo 2.

Cuadro 2. Tratamientos acordes a los manejos establecidos en el sitio de estudio.

Tratamiento	Manejo	Intensidad de uso	Frutal	Cultivo cubierta	Rotación	Gestión de cobertura y fertilización	Labranza	Riego
T0	Manejo convencional	Control	Palto (<i>Persea americana</i> Mill.)	Sin cobertura	Sin rotación	Fertilización química, no se aplica materia orgánica.	Sin labranza	Microaspersión (palto:1050 mm)
1-S	Cubierta vegetal pratense anual en secano	Baja	Especies de bajo requerimiento hídrico	PMA con especies de hábito de crecimiento invernal	Una cosecha al año y descanso	La cobertura es cortada y dejada en el campo, sin adición de otra enmienda.	Sin labranza	Precipitación (cobertura:300 mm, frutal: 600 mm)
2-N	Cubierta vegetal pratense perenne de raíz profunda	Media	Especies de alta tolerancia al estrés hídrico	Pradera perenne de raíz profunda	Cultivos cubierta permanentes	Detritos de cada corte se dejan en el campo y se extraen para compost.	Sin labranza	Aspersión k-line (850 mm)
4-S	Cubierta vegetal pratense anual y perenne	Media	Especies de clima mediterráneo	Pradera anual y perenne	EPAP con cobertura anual.	Siembra de cobertura en invierno, detritos de los cortes se quedan en campo.	A la siembra de cobertura (tractor)	Microaspersión (frutal: 1200 mm)
4-N	Cubierta vegetal de hortalizas y flores	Alta		Hortalizas y flores	Especies de hoja, raíz y flor. Una temporada de descanso	Cobertura se extrae para compost, aplicación de compost en cada cama.	Mínima: [barra U (40 cm), azadón (15 cm)]	Goteo (frutal: 1250 mm, hortalizas: según demanda)

PMA: pradera mediterránea anual, EPAP: especies pratenses anuales y perennes.

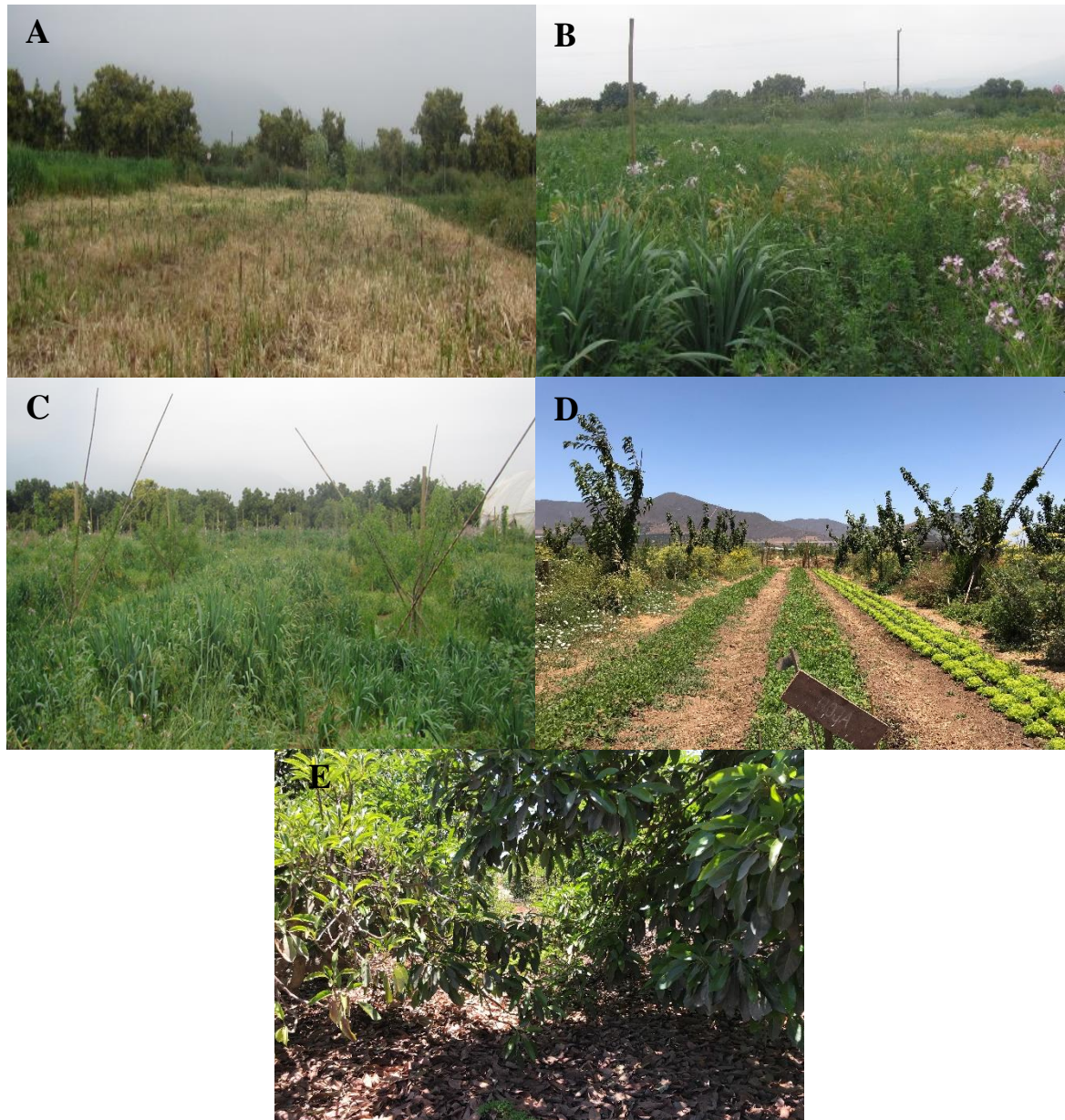


Figura 3. Manejo agroecológico de los tratamientos y testigo. A. Cubierta vegetal pratense anual en seco. B. Cubierta vegetal pratense perenne de raíz profunda. C. Cubierta vegetal pratense anual y perenne. D. Cubierta vegetal de hortalizas y flores. E. Testigo (huerto de paltos).

Propiedades del suelo evaluadas

Durante el año 2019, se tomaron las muestras de suelo y se evaluaron: la textura por el método del hidrómetro de Bouyoucos, la D_a por el método del terrón y cilindro, además de la densidad real por el método del picnómetro (Sandoval *et al.*, 2012). En función de la D_a medida por ambos métodos, se calculó el espacio poroso entre agregados (S_M) donde un mayor valor indica una mayor porosidad entre agregados; para esto se utilizó la relación:

$$S_M = 1 - \frac{D_{ac}}{D_{at}}$$

Donde D_{ac} y D_{at} es la densidad aparente medida con el método del cilindro y el terrón, respectivamente.

La curva de retención de agua se realizó utilizando el método de la cama de arena (Eijkelkamp) y dispositivos de presión (ollas y platos), aplicando presiones crecientes (-2, -6, -33, -100 y -1500 kPa) a muestras saturadas (Sandoval *et al.*, 2012). La distribución del tamaño de poros se determinó a partir de las curvas características de acuerdo a Hartge y Horn (2009). Los poros de drenaje rápido (PDR, $>50\mu\text{m}$) se determinaron como la diferencia entre el contenido de agua a saturación y a -6 kPa; los poros de drenaje lento (PDL, $10-50\mu\text{m}$) se calcularon en función de la diferencia entre el contenido de agua a -6 y a -33 kPa, los poros de agua útil (PAU, $0,2-10\mu\text{m}$) se determinaron como la diferencia entre contenido de agua a -33 y a -1500 kPa, en tanto los poros de agua inútil (PAI), corresponden al remanente, es decir, el contenido de agua retenida a -1500 kPa (Pagliai y Vignossi, 2002).

La conductividad hidráulica saturada (K_s) se midió con un permeámetro de carga constante (Eijkelkamp), según metodología descrita por Klute (1965), para muestras en cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura, al cabo de una y cinco horas de iniciada la prueba. También se evaluó la estabilidad de los macroagregados ($<30\text{mm}$) por el método del tamizaje seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009), calculando la variación de diámetro medio de los agregados (VDMA). La estabilidad de los microagregados (entre 1-2mm) se determinó mediante el método de la relación de dispersión (RD), que mide la dispersión de limo y arcilla por la acción del agua destilada en relación con el limo y la arcilla totales de la muestra (Seguel *et al.*, 2003).

Los límites de Atterberg (límite plástico y límite líquido) se determinaron según metodología establecida por Das (1997), para luego estimar el índice de plasticidad. La resistencia a la penetración (RP) se midió con un dinamómetro digital (Enpai EFG500) de punta cónica (Flores y Alcalá, 2010) en terreno, con el suelo equilibrado aproximadamente a un contenido de agua equivalente a capacidad de campo (24 h después del riego). Para cada repetición se realizaron 6 submuestreos, los cuales se promediaron.

Para medir la hidrofobicidad del suelo se colectaron 3 agregados con diámetros de aproximadamente 3 cm en cada repetición y para las tres profundidades; los 3 agregados se promediaron como uno solo. El índice de repelencia al agua (R) fue determinado con el método de la sorptividad (Tillman *et al.* 1989), midiendo la capacidad de sorción de agua y

etanol (95%) de cada agregado utilizando el dispositivo de Leeds-Harrison *et al.* (1994). Este método relaciona la sorptividad del etanol al 95% respecto a la del agua, infiltrados en un permeámetro hermético, determinando el índice de repelencia R mediante la relación:

$$R = 1,95 \left(\frac{SE}{SW} \right)$$

donde SE es la sorptividad del etanol y SW es la sorptividad del agua. Las mediciones de sorptividad se realizaron a una presión de -1 cm.

La densidad relativa (Rd) cuantifica la compactación de los suelos entre un estado más suelto y un estado más denso. Se estimó según la ecuación:

$$Rd = \frac{(e_{max} - e)}{(e_{max} - e_{min})}$$

donde e = relación de vacío [$e = P / (1 - P)$; P = porosidad total] para cada muestra, e_{max} y e_{min} = valores máximos y mínimos de e observados. Puede variar desde un mínimo de 0 para un suelo muy suelto, a un máximo de 1 para un suelo muy denso (Das, 2013).

Complementariamente, fue determinada la MOS utilizando el método de calcinación a 360 °C por 16 h, método descrito por Sadzawka *et al.* (2006). A partir del contenido porcentual de MOS, arcilla y limo, se calculó el índice de estabilidad estructural (SSI), que indica el riesgo de degradación estructural de un suelo (Pieri, 1992). Se estimó según la ecuación:

$$SSI = \frac{MOS}{\text{limo} + \text{arcilla}} * 100$$

El SSI da cuenta del nivel de MOS complejo en la fracción fina del suelo (limo + arcilla) como indicador de estabilidad y funcionalidad de la estructura, y mientras más bajo su valor mayor el estado de degradación de los suelos (Soto *et al.*, 2019).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis interpretativo de los promedios obtenidos para cada tratamiento y a las tres profundidades. Para establecer los indicadores físicos de calidad del suelo, se utilizó el análisis de componentes principales (ACP). Este permite examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables, identificando las propiedades más sensibles en los tratamientos estudiados. El ACP se realizó con los datos estandarizados, utilizando el software estadístico INFOSTAT. Además, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para observar las relaciones que se pueden generar entre variables. Para ponderar relaciones, se consideró aquellas que fueran estadísticamente significativas ($\alpha = 0,05$ y $\alpha = 0,01$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se muestran y discuten, en primer lugar, como un análisis interpretativo de los promedios para cada propiedad evaluada y a las tres profundidades. Luego se analiza y se discute las asociaciones existentes entre las variables, mediante ACP y el coeficiente de correlación de Pearson para establecer los indicadores de calidad del suelo.

Propiedades del suelo

Análisis interpretativo

Para la clasificación textural, se utilizó el criterio utilizado por USDA. En relación a los tratamientos, la clase textural predominante fue franca (contenidos de arena, limo y arcilla, Cuadro 3). Esta clase textural se encontró a lo largo del perfil en los manejos 4-S y 4-N. El control (T-0) presentó una variación a la profundidad de 40 a 60 cm, clasificándose como franco arenosa. Igualmente 1-S presentó variación a la misma profundidad, clasificándose como franco arcilloso arenosa. El manejo 2-N se diferenció de los demás ya que presentó una clase textural franco arcillosa en las tres profundidades. Los resultados obtenidos coinciden con CIREN (1997), que clasifica al suelo en la Serie Hijuelas; de textura principalmente franca, viéndose variaciones entre franco arcillosa a franco arenosa en profundidad.

En relación a la selección de indicadores, el contenido de arena, limo y arcilla es utilizado en la mayoría de los modelos de evaluación de riesgos hidrológicos, ecológicos y ambientales, debido a que influyen a otras propiedades del suelo (Liess *et al.*, 2012). Esto queda demostrado al observar su correlación con otras propiedades (Apéndices 2, 3 y 4): la arena correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente a la profundidad de 20 a 40 cm con Rp (0,63) y negativamente a la profundidad de 0 a 20 cm con AU (-0,60). Además, como se esperaba, la arena correlacionó negativamente con limo y arcilla en las tres profundidades. En cuanto al limo, este correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente a los 0 a 20 cm con el AU ($r = 0,67$) y negativamente con Rp ($r = -0,60$); a la profundidad de 20 a 40 cm correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente solo con SSI ($r = -0,63$) y a los 40 a 60 cm correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente con SSI ($r = -0,70$). Finalmente, la arcilla a la profundidad de 20 a 40 cm solo correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente con Dac ($r = -0,60$).

La densidad real (D_r) es una propiedad que depende del tipo de suelo (material parental y mineralogía) y de sus compuestos orgánicos; generalmente varía entre 2,60 y 2,75 $Mg\ m^{-3}$, siendo valores ampliamente aceptados para suelos minerales (Lal y Shukla, 2004). Cuando existe la presencia de cantidades inusuales de minerales ferromagnesianos, la D_r puede exceder los 2,75 $Mg\ m^{-3}$ (Brady, 1984). Con respecto a la determinación de la D_r , esta presentó valores entre 2,60 y 2,87 $Mg\ m^{-3}$ para todos los manejos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores promedio y desviación estándar de las propiedades medidas en el suelo, para cada manejo y el testigo por intervalo de profundidad.

Propiedad	Tratamientos					
	T0	1 -S	2 - N	4 - S	4 - N	
a (%)	44,41 ± 2,88	46,21 ± 4,36	37,97 ± 2,17	42,02 ± 3,26	38,36 ± 0,84	
L (%)	32,49 ± 2,05	29,87 ± 2,05	33,37 ± 2,00	33,20 ± 0,48	36,00 ± 1,22	
A (%)	23,10 ± 1,51	23,92 ± 3,40	28,67 ± 3,50	24,78 ± 3,09	25,64 ± 0,90	
Dr (Mg m ⁻³)	2,66 ± 0,11	2,69 ± 0,13	2,60 ± 0,18	2,78 ± 0,28	2,87 ± 0,13	
MOS (%)	4,60 ± 0,94	5,61 ± 0,59	3,71 ± 0,37	5,76 ± 1,36	3,99 ± 0,61	
R (-)	2,68 ± 0,64	6,67 ± 2,65	3,36 ± 2,53	5,38 ± 1,53	4,69 ± 0,96	
0 - 20 cm	Dac (Mg m ⁻³)	1,53 ± 0,12	1,36 ± 0,11	1,28 ± 0,02	1,34 ± 0,07	1,25 ± 0,04
	Dat (Mg m ⁻³)	1,80 ± 0,07	1,76 ± 0,13	1,67 ± 0,09	1,63 ± 0,06	1,53 ± 0,26
	RD (%)	53,77 ± 4,64	45,22 ± 7,25	56,97 ± 4,89	52,68 ± 7,67	62,64 ± 5,94
	VDMA (mm)	4,86 ± 1,94	1,69 ± 0,86	2,23 ± 1,14	2,70 ± 0,94	3,39 ± 1,31
	LL (%)	28,69 ± 1,46	31,86 ± 1,36	25,12 ± 1,94	28,74 ± 2,10	27,25 ± 0,89
	LP (%)	19,78 ± 3,35	24,56 ± 3,99	18,04 ± 2,52	21,88 ± 1,33	20,42 ± 1,42
	RP (N)	206,64 ± 4,99	201,97 ± 17,67	147,06 ± 31,71	161,22 ± 48,94	64,03 ± 18,70
	Θ ₃₃ (cm ³ cm ⁻³)	0,292 ± 0,040	0,232 ± 0,011	0,242 ± 0,022	0,252 ± 0,022	0,248 ± 0,010
	Θ ₁₅₀₀ (cm ³ cm ⁻³)	0,218 ± 0,028	0,171 ± 0,012	0,148 ± 0,021	0,158 ± 0,015	0,128 ± 0,004
	Ks 1 (cm h ⁻¹)	18,23 ± 19,26	69,77 ± 12,48	26,21 ± 5,84	10,98 ± 10,98	14,27 ± 10,83
Ks 5 (cm h ⁻¹)	19,09 ± 18,28	67,52 ± 12,27	26,02 ± 7,22	13,09 ± 7,56	14,90 ± 9,60	
a (%)	49,53 ± 6,12	46,24 ± 3,43	36,10 ± 2,21	42,96 ± 2,51	37,84 ± 2,13	
L (%)	28,47 ± 4,18	27,18 ± 2,59	33,58 ± 1,27	31,56 ± 0,80	36,00 ± 1,04	
A (%)	22,00 ± 2,04	26,57 ± 2,14	30,32 ± 2,96	25,48 ± 2,45	26,15 ± 1,26	
Dr (Mg m ⁻³)	2,75 ± 0,11	2,65 ± 0,13	2,79 ± 0,18	2,76 ± 0,28	2,72 ± 0,13	
MOS (%)	2,63 ± 0,48	3,73 ± 0,56	2,43 ± 0,50	3,37 ± 0,15	3,25 ± 0,43	
R (-)	1,55 ± 0,44	2,40 ± 1,10	1,50 ± 0,11	3,37 ± 0,72	3,10 ± 1,51	
20 - 40 cm	Dac (cm ³ cm ⁻³)	1,63 ± 0,07	1,47 ± 0,10	1,43 ± 0,04	1,51 ± 0,10	1,45 ± 0,09
	Dat (cm ³ cm ⁻³)	1,88 ± 0,05	1,83 ± 0,06	1,77 ± 0,10	1,74 ± 0,08	1,80 ± 0,14
	RD (%)	53,79 ± 6,90	49,75 ± 13,68	56,54 ± 9,88	44,05 ± 12,20	59,37 ± 4,76
	VDMA (mm)	8,05 ± 1,79	3,66 ± 1,12	4,71 ± 0,69	5,53 ± 2,78	5,57 ± 0,96
	LL (%)	25,32 ± 1,72	26,03 ± 1,45	23,30 ± 0,65	25,34 ± 1,06	25,22 ± 0,96
	LP (%)	18,55 ± 2,11	17,82 ± 1,51	15,34 ± 3,29	17,81 ± 1,05	18,99 ± 0,39
	RP (N)	527,79 ± 52,44	284,04 ± 24,79	248,56 ± 78,95	270,10 ± 48,79	152,05 ± 38,52
	Θ ₃₃ (cm ³ cm ⁻³)	0,274 ± 0,022	0,230 ± 0,022	0,229 ± 0,023	0,245 ± 0,014	0,256 ± 0,014
	Θ ₁₅₀₀ (cm ³ cm ⁻³)	0,185 ± 0,012	0,156 ± 0,005	0,155 ± 0,014	0,157 ± 0,009	0,150 ± 0,005
	Ks 1 (cm h ⁻¹)	8,57 ± 7,91	22,63 ± 13,76	3,83 ± 1,97	6,95 ± 6,95	2,80 ± 1,37
Ks 5 (cm h ⁻¹)	14,82 ± 15,39	20,82 ± 11,14	5,45 ± 4,46	7,60 ± 5,46	3,73 ± 0,54	

a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; MOS: materia orgánica; R: índice de repelencia al agua; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; LL: límite líquido; LP: límite plástico; RP: resistencia a la penetración; Θ₃₃: contenido de agua a 33 kPa; Θ₁₅₀₀: contenido de agua a 1500 kPa; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h.

Propiedad	Tratamientos					
	T0	1 -S	2 - N	4 - S	4 - N	
a (%)	61,05 ± 5,88	54,72 ± 7,04	34,44 ± 2,24	48,18 ± 3,62	41,04 ± 1,88	
L (%)	21,22 ± 4,70	23,70 ± 7,16	33,96 ± 1,68	29,10 ± 4,88	32,96 ± 2,16	
A (%)	17,73 ± 1,22	21,58 ± 3,72	31,60 ± 2,43	22,72 ± 2,17	26,00 ± 0,85	
Dr (Mg m ⁻³)	2,69 ± 0,09	2,73 ± 0,12	2,70 ± 0,22	2,85 ± 0,06	2,70 ± 0,27	
MOS (%)	2,17 ± 0,46	2,74 ± 0,34	2,51 ± 0,08	2,99 ± 0,64	2,51 ± 0,25	
R (-)	1,45 ± 0,81	1,61 ± 0,61	1,80 ± 0,50	2,07 ± 0,77	1,45 ± 0,81	
40 - 60 cm	Dac (Mg m ⁻³)	1,64 ± 0,10	1,48 ± 0,14	1,51 ± 0,10	1,50 ± 0,09	1,48 ± 0,03
	Dat (Mg m ⁻³)	1,81 ± 0,07	1,81 ± 0,09	1,83 ± 0,09	1,77 ± 0,04	1,83 ± 0,17
	RD (%)	66,20 ± 4,16	52,20 ± 12,80	62,39 ± 3,98	57,73 ± 16,77	60,77 ± 6,02
	VDMA (mm)	7,03 ± 1,05	3,87 ± 2,40	5,69 ± 2,34	7,64 ± 1,65	6,91 ± 1,05
	LL (%)	21,10 ± 1,44	22,47 ± 1,83	22,23 ± 0,56	22,62 ± 1,42	22,82 ± 0,41
	LP (%)	17,85 ± 1,44	15,06 ± 0,82	15,90 ± 0,82	17,65 ± 1,40	16,50 ± 1,75
	RP (N)	612,29 ± 23,21	282,47 ± 28,35	381,02 ± 139,33	370,54 ± 71,39	226,50 ± 74,53
	Θ ₃₃ (cm ³ cm ⁻³)	0,258 ± 0,038	0,199 ± 0,045	0,258 ± 0,009	0,216 ± 0,015	0,243 ± 0,016
	Θ ₁₅₀₀ (cm ³ cm ⁻³)	0,158 ± 0,019	0,123 ± 0,016	0,156 ± 0,029	0,137 ± 0,002	0,133 ± 0,007
	Ks 1 (cm h ⁻¹)	2,36 ± 1,16	12,87 ± 1,86	4,43 ± 1,99	4,68 ± 4,68	2,30 ± 0,89
Ks 5 (cm h ⁻¹)	2,27 ± 1,46	11,10 ± 1,47	4,08 ± 0,83	5,34 ± 1,89	2,51 ± 0,89	

a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; MOS: materia orgánica; R: índice de repelencia al agua; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; LL: límite líquido; LP: límite plástico; RP: resistencia a la penetración; Θ₃₃: contenido de agua a 33 kPa; Θ₁₅₀₀: contenido de agua a 1500 kPa; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h.

Los suelos de la Cordillera de la Costa, donde está ubicado el Valle de Quillota, se caracterizan por formarse a partir de rocas graníticas (Luzio *et al.*, 2010), pero la Serie Hijuelas particularmente, al estar ubicada en posición de Piedmont, se considera un suelo sedimentario de origen coluvial, pudiéndose presentar material basáltico o andesítico (CIREN, 1997); así, la presencia de este tipo de minerales probablemente aumentó los valores de Dr.

La MOS influye en varias propiedades físicas: su presencia mejora la capacidad de retención de agua (Rawls *et al.*, 2003), la estructura del suelo y el índice de estabilidad estructural (Soto *et al.*, 2019), además protege al suelo frente a acciones antrópicas (laboreo) o naturales (efecto del golpe de la gota de lluvia sobre los agregados) (Jordán *et al.*, 2010). Dado lo anterior, se consideró importante su descripción.

Castellanos *et al.* (2000), clasifica el contenido de MOS en función de la textura y para condiciones de clima templado (Anexo 3.1). Sobre esta base, para las condiciones del ensayo (grupo textural medio a lo largo del perfil) se presentaron valores de MOS muy altos en superficie a medios en profundidad (Figura 4.A). La Serie Hijuelas (Mollisol) se caracteriza por tener valores altos de MOS (6,6%), disminuyendo en profundidad (CIREN, 1997). Se observó que todos los manejos presentaron valores menores, indicando la pérdida de la MOS por labranza convencional y biodegradación (Cuadro 3). En general los manejos que presentaron contenidos muy altos de MOS en los primeros 20 cm fueron T-0, 1-S y 4-S; los dos últimos se caracterizaron por dejar una cobertura vegetal después de su cosecha, que habría favorecido el incremento de MOS en el suelo (Zhang *et al.*, 1997). Los manejos 2-N

y 4-N sólo presentaron contenidos altos de MOS. A la profundidad de 20 a 40 cm, 1-S, 4-S y 4-N presentaron contenidos altos de MOS, en tanto T-0 y 2-N presentaron contenidos moderadamente altos. Finalmente, a la profundidad de 40 a 60 cm todos los manejos agroecológicos presentaron contenidos de MOS moderadamente altos y solo el testigo presentó valores medios.

Con respecto al índice de repelencia al agua (Anexo 3.2), todos los manejos en superficie (0-20 cm) presentaron un comportamiento hidrofóbico del suelo (Tillman *et al.*, 1989) y este disminuye en profundidad llegando a comportarse como un suelo humectable ($R < 1,95$) entre 40 a 60 cm (Figura 4.B). Tanto T-0 como 2-N solo presentaron un comportamiento hidrofóbico de 0 a 20 cm; y a partir de los 20 cm se comportaron como suelos humectables. Los altos valores de R en los manejos 1-S y 4-S, seguidos por 4-N obedecen a que se caracterizan por recibir detritos de cosecha (1-S y 4-S) o compost (4-S). Harper *et al.* (2000) precisan que en general R aumenta al incrementar el contenido de MOS (1-S, 4-S y 4-N) y disminuye con mayores contenidos de arcilla (probablemente el manejo 2-N).

Si bien la MOS tiene como una de sus propiedades aumentar la retención del agua en el suelo, esta depende de su grado de descomposición, cantidad y calidad (Piccolo y Mbagwu, 1999). Así mismo, la repelencia al agua se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos, que no presentan un grado de alteración muy avanzado, y que tienen su origen en la descomposición de organismos o derivados de plantas o microorganismos vivos (Doerr *et al.*, 2000). El suelo de los manejos 1-S y 4-N presentaron un comportamiento hidrofóbico hasta los 40 cm, mientras que el manejo 4-S se comportó como un suelo hidrofóbico hasta los 60 cm. La alta hidrofobicidad de 1-S y 4-S en superficie puede estar relacionada a las especies vegetales que se cultivan como cobertura, que son principalmente poáceas y fabáceas (Anexo 2).

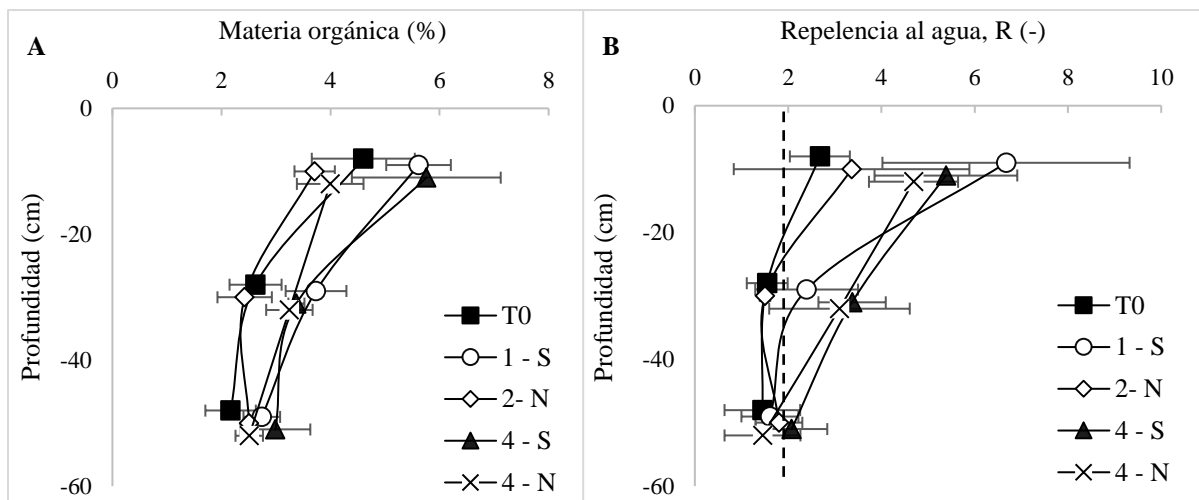


Figura 4. Contenidos de materia orgánica (A) e índice de repelencia al agua (B) para los manejos agroecológicos y testigo. Se presentan las profundidades desfasadas para incluir las barras de $\pm DS$. En el índice R se incluye valor crítico ($R=1,95$).

Las plantas hacen el mayor aporte de sustancias que pueden generar repelencia al agua, debido a que contienen varios compuestos hidrofóbicos que pasan al suelo (Jaramillo, 2006). Doerr *et al.* (2000) destacan como especies que promueven la hidrofobicidad: cereales cultivados (principalmente *Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*), Las plantas hacen el mayor aporte de sustancias que pueden generar repelencia al agua, debido a que contienen varios compuestos hidrofóbicos que pasan al suelo (Jaramillo, 2006). Doerr *et al.* (2000) destacan como especies que promueven la hidrofobicidad: cereales cultivados (principalmente *Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*), leguminosas (principalmente *Medicago sativa* y *Trifolium sp.*), además probablemente de microorganismos que están asociados a estas especies (Jaramillo, 2006).

La Da es un buen indicador de varias propiedades importantes del suelo, entre las cuales se puede destacar: la porosidad, el grado de aireación y la capacidad de infiltración, las cuales pueden verse afectadas por factores como la textura, estructura y MOS; así, valores bajos de Da implican suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y crecimiento radical (Warrick, 2002).

En función de la textura, la Da presenta distintos valores. Para suelos francos, la Da por el método del cilindro (Dac) es de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ en promedio, variando en función del contenido de arena y arcilla principalmente (Anexo 3.3); por su parte, los valores de la Da por terrón (Dat) siempre van a ser mayores a los de la Dac, debido a que esta última incluye el espacio entre los agregados, a diferencia de la Dat (Sandoval *et al.*, 2012) y para suelos francos, la Dat es de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ en promedio. Valores más altos a los normales implicaría compactación del suelo (Baver *et al.*, 1991).

Para todos los manejos, los valores de Dac y Dat en superficie (0-20 cm) fueron menores, aumentando en profundidad (Figura 5.A y 5.B). Hazelton y Murphy (2016), clasifican la condición de un suelo en función de la Dac (Anexo 3.4), así los cuatro manejos agroecológicos presentaron una Dac considerada como adecuada para suelos de clase textural franca (Cuadro 3). Para las siguientes profundidades, todos los manejos se clasifican como algo compactados. Con respecto a T-0, presentó compactación en las tres profundidades evaluadas, siendo menor en superficie y clasificándose como muy compactado en las siguientes profundidades.

Dado lo anterior, se observó una disminución de la compactación debido al efecto del subsolado inicial que se le dio a todo el área experimental, a diferencia del testigo, que no tuvo esta labor. A nivel de superficie se observó que existe la efectividad de los manejos agroecológicos, ya que han mantenido valores bajos de Da; para las siguientes profundidades, los valores de Dac fueron mayores debido a que el suelo manifiesta procesos de reasentamiento (Hakansson, 2005). La disminución de la Da puede deberse a varios factores: niveles adecuados de MO contribuyen a disminuir la Dac y la resistencia a la compactación del suelo (Carter, 2002; Seguel y Horn, 2006; Sandoval *et al.*, 2012). La adición de detritos (1-S y 4-S), producto de los residuos de la cobertura y de compost (4-N) probablemente promovieron la disminución de la Dac, ya que se incrementa la macroporosidad del suelo, siendo esto determinante en la permeabilidad y aireación, además de aumentar la infiltración del agua (Bruce *et al.*, 1992). Valores altos de Dac, como el caso del manejo T-0, corresponden a suelos compactados o poco porosos, con baja aireación, y con baja

conductividad hidráulica saturada, pudiendo provocar anegamiento y dificultad de las raíces para poder elongarse y penetrar en el suelo (Sandoval *et al.*, 2008).

En relación con otras propiedades (Apéndices 2, 3 y 4), a la profundidad de 0 a 20 cm, la *Dac* correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente con el contenido de agua en el suelo a -33 kPa ($r = 0,73$) y -1500 kPa ($r = 0,82$), debido a la disminución de la macroporosidad y el aumento de poros de menor tamaño.

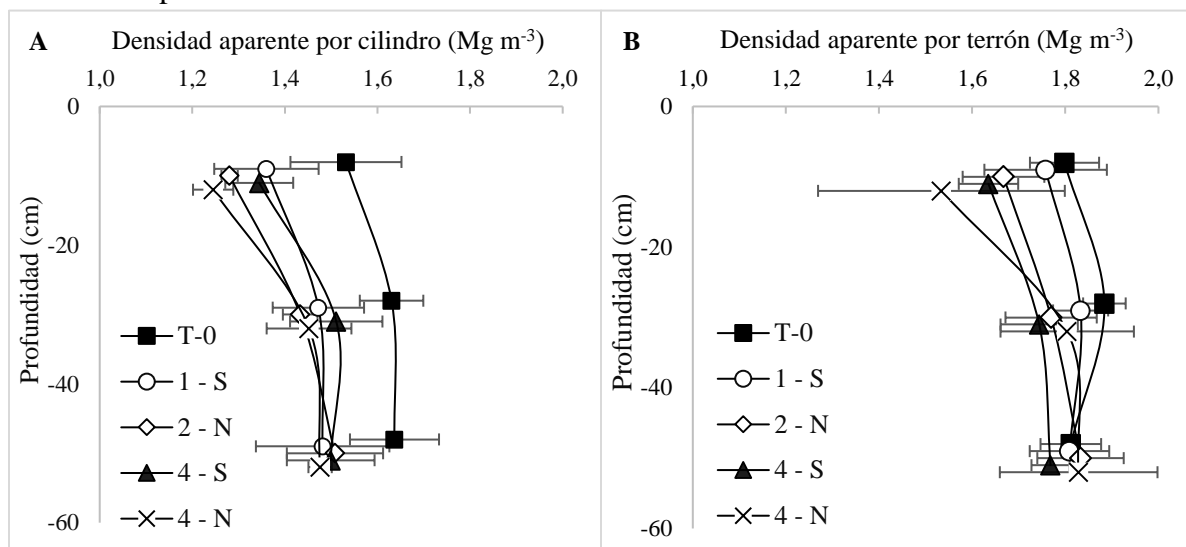


Figura 5. Densidad aparente por cilindro (A) y terrón (B) para los manejos agroecológicos y testigo. Se presentan las profundidades desfasadas para incluir las barras de $\pm DS$.

A la profundidad de 20 a 40 cm, la *Dac* correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente con *Rp* ($r = 0,66$). Esto coincide con lo que señala Blanco (2009), quien establece que a mayor *Dac*, mayor será *Rp*, con el mismo contenido de agua en el suelo. A esta misma profundidad, la *Dac* correlacionó negativamente con *PDR* ($r = -0,85$) y *S_M* ($r = -0,70$), coincidente con lo señalado por Bruce *et al.* (1992), quienes señalan que, a mayor densidad del suelo, existe una disminución de los macroporos. Finalmente, a la profundidad de 40 a 60 cm, la *Dac* se correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente con el contenido de agua en el suelo a -1500 kPa ($r = 0,63$), *Rp* ($r = 0,61$) y *Rd* ($r = 0,76$), pero negativamente con *MOS* ($r = -0,64$), *PDR* ($r = -0,75$) y *P* ($r = -0,74$). La *Dat* a la profundidad de 0 a 20 cm solo correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente con *Rp* ($r = 0,67$), no presentando otras correlaciones en las demás profundidades. Abassi y Rasool (2005) demostraron que la calidad del suelo disminuye con el incremento en la *Dac*, e igualmente tiene un efecto en los parámetros asociados al contenido de agua en el suelo. La *Da* se relaciona con la porosidad total del suelo y con su condición estructural, y es un índice importante para evaluar el manejo del suelo, ya que refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire (Warrick, 2002). Si bien esta no refleja la calidad del sistema poroso (tamaño de los poros y su continuidad), es útil para hacer comparaciones de un mismo sitio sometido a distintos manejos (Ellies, 1995; Seguel *et al.*, 2015).

La estabilidad de los agregados es uno de los principales indicadores de la calidad del suelo y juega un papel muy importante en el movimiento y almacenamiento de agua y aire en el

perfil del suelo. RD y VDMA se evaluaron mediante métodos de dispersión en agua, por lo que los menores índices reflejan una mayor estabilidad (Seguel *et al.*, 2003; Hartge y Horn, 2009). El detalle de los resultados de las pruebas de estabilidad se presenta en el Cuadro 3, en tanto la comparación gráfica se puede observar en la Figura 6.

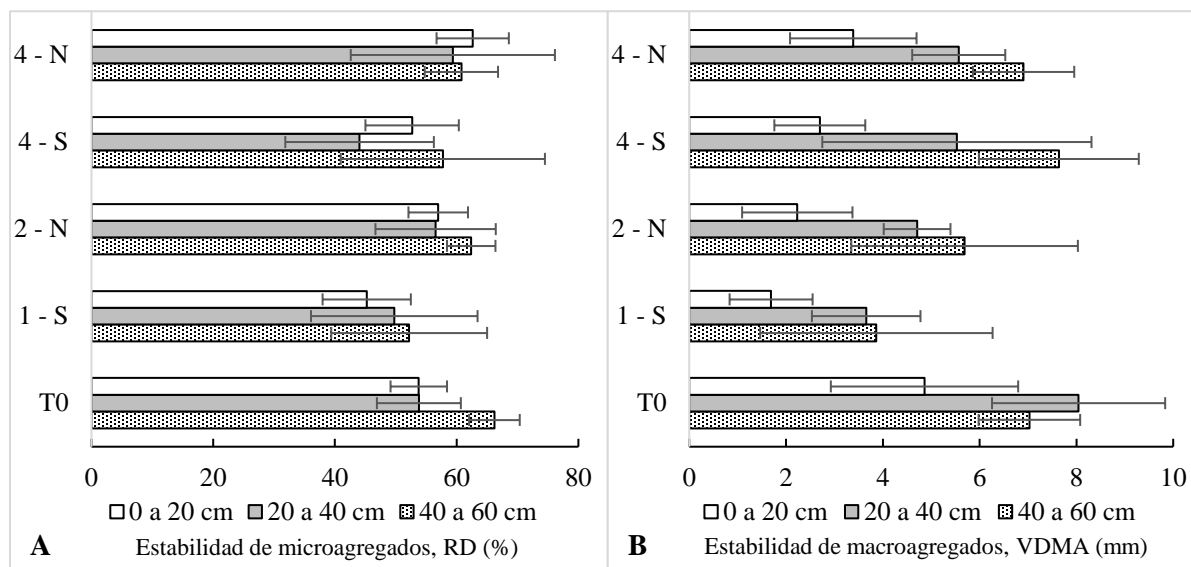


Figura 6. Resultados de la estabilidad de microagregados (A) y macroagregados (B) para los manejos agroecológicos y testigo.

De manera general, RD aumentó a mayor profundidad para los manejos T-0, 1-S y 2-N (Figura 6.A), resultado que está relacionado con los contenidos de MOS que disminuyen en profundidad. Esta propiedad está fuertemente ligada tanto al contenido total de MOS como a la composición de la misma (Cuevas *et al.*, 2006). El manejo 1-S presentó los menores valores de RD (mayor estabilidad) para las tres profundidades evaluadas. Singh *et al.* (2014) observaron una menor RD en todo el perfil, en tres clases texturales distintas bajo cero labranza debido a una menor alteración de los macroagregados, lo cual permite un mayor tiempo para la unión de la MO con minerales del suelo como arcillas y compuestos provenientes de los microorganismos y generar una mayor formación de microagregados (Six *et al.*, 2000). Para el caso de 4-S y 4-N, se observó mayores valores de RD a la profundidad de 0 a 20 cm, probablemente influenciados por el movimiento del suelo debido a la labranza mínima que se realiza en estos manejos.

Berryman *et al.* (1982), establecen que porcentajes mayores al 30% de la RD indican suelos muy inestables. Los resultados obtenidos (Cuadro 3) indicaron que todos los manejos agroecológicos y el testigo (T-0) presentaron suelos muy inestables, tanto en superficie como en profundidad. Se hubiera esperado que el manejo 1-S tuviera valores de RD por debajo del 30% y por lo tanto ser categorizado como estable, debido al alto contenido de MOS y uso de labranza cero. Probablemente no se pudo observar algún efecto ocasionado por el corto tiempo de implementación del manejo (1 año aproximadamente) y a la baja intensidad de uso del suelo, ya que según Abiven (2009), para ver resultados del efecto de la adición de enmiendas orgánicas se deben mantener los manejos por lo menos 6 a 10 años.

Los resultados de la prueba de la variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) indican que para todos los manejos se observaron menores valores en superficie (mayor estabilidad), los cuales aumentaron en profundidad (Figura 6.B). Esto está asociado con la disminución de la MOS del suelo a mayor profundidad, ya que ésta une las partículas del suelo para resistir la degradación y mejorar la porosidad del suelo, reduciendo así el colapso y la dispersión de los agregados (Chenu *et al.*, 2000). La habilidad de los macroagregados para resistir los procesos de humedecimiento está dada principalmente por la tasa de humedecimiento del agregado y la resistencia de las uniones de las partículas que lo componen, características que están controladas por agentes estructuradores como la MO y la arcilla (Kay y Angers, 2000).

De acuerdo a la categorización de Hartge y Horn (2009), valores de VDMA menores a 1,2 mm corresponden a estructuras estables. En relación al ensayo, el manejo 1-S fue el que presentó los menores valores a lo largo del perfil, siendo la profundidad de 0 a 20 cm la más estable. Se esperaba que el manejo 1-S estuviera clasificado como un suelo estructuralmente estable, debido a la cero labranza y la cubierta vegetal que promueve una mayor agregación (Brady y Weil, 2000), pero la baja intensidad de uso del suelo y el tiempo de implementación fueron factores que retrasaron esta estabilidad. Con respecto a los demás manejos, estos fueron considerados como suelos con agregados estructuralmente inestables, donde el testigo (T-0) presentó los mayores valores (menor estabilidad).

En relación con otras propiedades (Apéndices 2, 3 y 4), una mayor estabilidad de macroagregados se relacionó a suelos no compactados, ya que la VDMA correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente con R_p ($r = -0,68$) a la profundidad de 0 a 20 cm, con una mayor retención de agua a -33 kPa, con correlación significativa ($p < 0,01$) y positiva ($r = 0,71$) a la profundidad de 20 a 40 cm y con menores PDR, mostrando correlación significativa ($p < 0,01$) y negativa ($r = -0,73$) a la profundidad de 40 a 60 cm. La intervención del suelo aumenta los valores de VDMA, lo que refleja la pérdida de la calidad estructural por efecto de la labranza, la cual destruye los agregados en cada temporada y genera una pérdida en la estabilidad estructural del suelo (Six *et al.*, 2004; Franzluebbers, 2009).

Los límites de consistencia de Atterberg relacionan los contenidos de agua en los que el suelo se comporta como un líquido, plástico, friable o sólido (Kézdi, 1979). El uso de los límites líquido y plástico permite determinar el rango de contenido de agua en el que la labranza generará fuertes impactos negativos sobre la estructura del suelo, y demuestra el efecto de la MOS al aumentar el rango óptimo de friabilidad en el suelo (Le Bissonais y Arrouays, 1997). Los resultados obtenidos del límite líquido (LL) y límite plástico (LP) se encuentran en el Cuadro 3, y el índice plástico (IP) se presenta en el Cuadro 4. El LL presentó valores entre 25 a 32 % en superficie y estos fueron disminuyendo en función de la profundidad. Esto probablemente está asociado a los contenidos de MOS a lo largo del perfil, donde en superficie el contenido de MOS es más alto. Se observó de igual forma mayores valores de LP en superficie (19 a 25 %), disminuyendo en profundidad. Vargas (2014) en un ensayo realizado en la región Metropolitana, estableció que el LL y el LP aumentan a mayores contenidos de MOS, pues esta genera una mayor microagregación y retención de agua, pero a la vez disminuye el IP. De igual forma, Stock y Downes (2008) explican que el incremento de la MOS en el suelo favorece un comportamiento mecánico más estable en un rango amplio de humedad. Esto se puede verificar al observar las correlaciones altas ($p < 0,01$) y positivas

del LP con la MOS de 0 a 20 cm ($r = 0,75$), de 20 a 40 cm ($r = 0,64$) y de 40 a 60 cm ($r = 0,69$); además del LL con la MOS a la profundidad de 0 a 20 cm, con una correlación significativa ($p < 0,05$) y positiva ($r = 0,52$).

Dada la clasificación de Hazelton y Murphy (2016) que relaciona el LL con el IP para determinar el grado de compresibilidad del suelo (Anexo 3.5), todos los manejos presentaron un grado de compresibilidad bajo. Los valores de LL variaron de 21 a 32 % y el IP varió de 3 a 9 % a lo largo del perfil. Casagrande (1932) propuso una carta de plasticidad, la cual clasifica al suelo en estudio como un suelo poco cohesivo, con presencia de arcillas de plasticidad baja.

La resistencia a la penetración (R_p) permite estimar el esfuerzo necesario que debe ejercer la raíz en el suelo para poder abrirse paso a través del perfil (Schäffer *et al.*, 2010). Valores elevados de R_p se relacionan con problemas de compactación, los cuales pueden causar un impedimento al crecimiento radical (Linstrom y Voorhees, 1994). En el Cuadro 3 se presentan los valores de R_p .

De manera general, para todos los manejos se observó una menor R_p en superficie, aumentando en profundidad (Figura 7.A). Particularmente para los manejos agroecológicos, la aplicación del subsolado al inicio del ensayo mejoró notablemente las condiciones del suelo en comparación al testigo (T-0). De acuerdo a la clasificación de Hazelton y Murphy (2016) presentada en el Anexo 3.6, el manejo 4-N presentó los menores valores, clasificándose como un suelo medianamente compactado en superficie, a denso (20 a 40 cm) y muy denso (40 a 60 cm). Si bien esta clasificación condiciona a 4-N aún con problemas de compactación, Schoeneberger *et al.* (2012) considera que valores mayores a 160 N son suelos con alta R_p , debiendo tomarse medidas a partir de los 80 N. El manejo 4-N se caracteriza por una alta intensidad de uso de suelo, realizándose labores de labranza mínima para el acondicionamiento de las camas hasta los 40 cm, y debido a esto los valores de R_p son bajos.

La intensidad del uso del suelo ha influido en el nivel de recuperación de los manejos 2-N y 4-S, que fueron clasificados como de mediana intensidad, presentando menores valores de R_p en comparación a 1-S y el testigo (T-0) especialmente en superficie. La cobertura permanente en 2-N y la labranza que se realiza previa a la siembra de la cobertura en 4-S generaron menores valores de R_p en superficie clasificándolos como suelos densos, aumentando a muy densos (de 20 a 40 cm) y extremadamente densos (40 a 60 cm). El manejo 1-S se clasificó como un suelo muy denso a lo largo del perfil, esto probablemente asociado a la baja intensidad de uso del suelo ya que se reasentó después del subsolado. El efecto de la cobertura en 1-S no generó una mejor categorización, probablemente asociado a la intensidad de uso y especialmente por ser un manejo con cero labranza. Blanco-Canqui y Ruis (2018) al revisar varios trabajos con cero labranza, establecieron que el 50 % de los autores determinaron que este sistema incrementa la R_p debido a una mayor consolidación y a la falta de mezcla del suelo. Finalmente, T-0 presentó valores muy altos de R_p , influenciado principalmente por el uso intensivo de maquinaria agrícola dentro de su manejo.

La conductividad hidráulica saturada (K_s) se evaluó en dos tiempos: a una hora y la quinta hora de iniciada la prueba (Cuadro 3). Para ambas mediciones se observó que en superficie

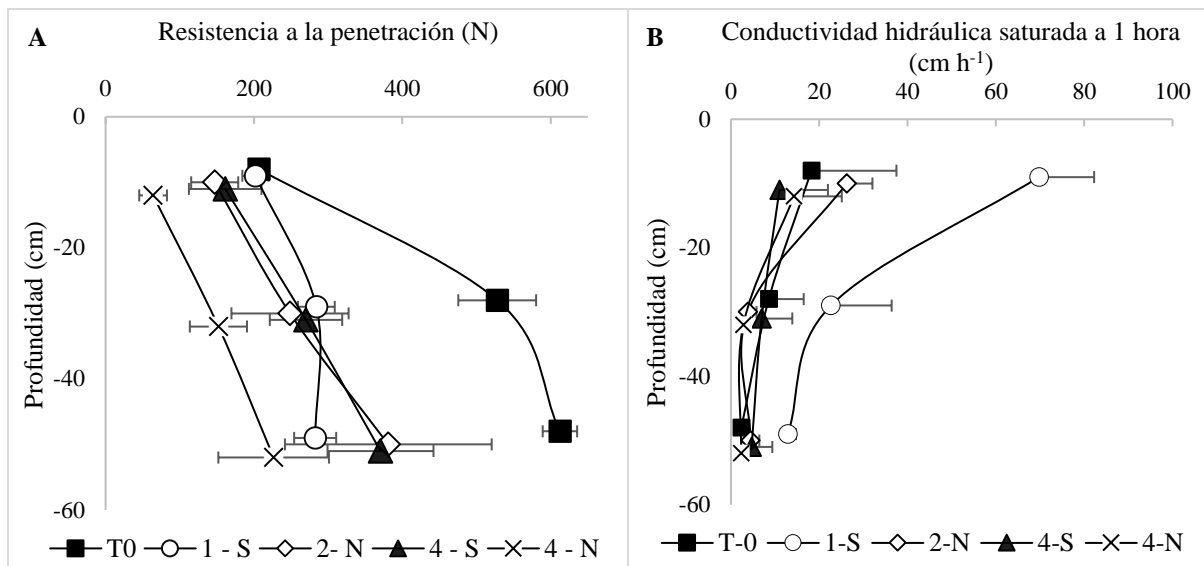


Figura 7. Resistencia a la penetración (A) y conductividad hidráulica saturada (Ks) a 1 h (B) para los manejos agroecológicos y el testigo. Se presentan las profundidades desfasadas para incluir las barras de \pm DS.

se presentaron mayores valores de Ks, y estos fueron disminuyendo en profundidad. La razón de esta variación dentro del perfil se debe al hecho que Ks se ve afectada por varias propiedades físicas (textura, densidad aparente, porosidad total, etc.) y por los contenidos de MOS, que se encuentra en mayor porcentaje en superficie e incrementan la macroporosidad, permitiendo un flujo hídrico mucho más rápido (Iqbal *et al.*, 2005).

Hazelton y Murphy (2016) clasificaron la Ks en función al suelo y a los cultivos (Anexo 3.7). A una hora (Figura 7.B), el testigo (T-0) presentó un flujo rápido en superficie, disminuyendo en las siguientes profundidades de moderadamente rápido (20 a 40 cm) a moderado (40 a 60 cm). El manejo 1-S se caracterizó por presentar los valores más altos en relación a los demás manejos; de 0 a 20 cm presentó un flujo muy rápido, disminuyendo a rápido a las siguientes profundidades. El manejo 2-N se diferenció por presentar un flujo muy rápido en superficie, disminuyendo a un flujo moderado para las siguientes profundidades. Con respecto al manejo 4-S, este presentó un flujo moderadamente rápido de 0 a 40 cm, disminuyendo a moderado de 40 a 60 cm. Finalmente, el manejo 4-N presentó un flujo rápido de 0 a 20 cm, disminuyendo a moderado en las siguientes profundidades. Respecto a Ks a la quinta hora, se observó un comportamiento similar a Ks a una hora para todos los manejos.

Con relación al testigo (T-0), el manejo 1-S fue el único que presentó mayores valores de Ks a lo largo del perfil, mientras que los demás manejos agroecológicos presentaron valores similares o menores. Esto puede estar asociado a los altos contenidos de MOS y a la presencia de grava (aproximadamente 20 a 40%) que se encontró en 1-S (Apéndice 5). Si bien, T-0 presentó similares condiciones en su perfil (contenidos altos de MOS y presencia de gravas), este fue influenciado fuertemente por la compactación, disminuyendo su Ks. Una alta compactación genera el colapso del sistema poroso grueso (Horn y Lebert, 1994) y un cambio en la continuidad de los poros, ya que modifica su orientación de un patrón vertical a uno

horizontal (Ellies y Ramírez, 1992; Horn, 2003; Dörner y Horn, 2006) ralentizando el flujo de agua.

La curva característica permite relacionar la capacidad que tiene el suelo de retener agua a medida que se aplican distintas tensiones; dicho esto, se puede apuntar que la porosidad y la retención de agua son dos parámetros estrechamente vinculados, ya que esta última es dependiente de la cantidad total de poros, la distribución de tamaño de estos y de la superficie específica de las partículas (Krull *et al.*, 2004). Las curvas características para los distintos manejos agroecológicos y a las tres profundidades, se observan en las figuras 8.A, 8.B y 8.C. Para una mejor visualización se utilizó una escala logarítmica (log hPa) en la escala de tensión. Se consideró como capacidad de campo (CC) al contenido de agua a una tensión de 33 kPa (330 hPa) y punto de marchitez permanente (PMP) al contenido de agua a una tensión de 1500 kPa (15000 hPa), como una aproximación general.

En superficie (0 a 20 cm) y a bajas tensiones mátricas, el mayor contenido de agua se presentó en el manejo 4-S, seguido de 4-N y 2-N; los dos primeros están asociados a los contenidos de MO que aumentan la retención del agua (Seguel *et al.*, 2003) y 2-N al contenido de arcilla (clase textural franco arcillosa). Si bien los manejos T-0 y 1-S presentan valores altos de MOS (Cuadro 3), los bajos contenidos de agua que presentan pueden estar asociados a la presencia de gravas observadas en la descripción del perfil (aproximadamente 20 a 30 %, Apéndice 5), las cuales disminuyen la retención del agua. A mayores tensiones, la retención de agua se debe principalmente a la estructura del suelo (para el caso de CC) y a la textura (para el caso del PMP). Para estas tensiones, todos los manejos presentaron valores similares, excepto T-0, que presentó mayores promedios asociados a la alta compactación, pues esta disminuye los PDR y aumenta los poros de almacenamiento de agua (Lipiec, 2004).

Para la profundidad de 20 a 40 cm (Figura 8.B) los manejos presentaron la misma tendencia respecto a la profundidad de 0 a 20 cm, afectando principalmente a la retención del debido a la disminución del efecto estructural generado por la MOS, la cual disminuye en profundidad. A la profundidad de 40 a 60 cm (Figura 8.C) todos los manejos presentaron promedios similares a lo largo de la curva, solo destacando 2-N, que a bajas tensiones retuvo una mayor cantidad de agua, influenciado por un mayor contenido de arcilla. Como era de esperar, a mayor profundidad la retención de agua disminuye, ya que, al disminuir la MOS, la conformación de la curva característica se constituye solo de las propiedades intrínsecas del suelo (contenido de arcilla y estructuración). Con respecto a CC y PMP, el manejo que presentó los mayores promedios fue el testigo (T-0) a lo largo del perfil, mientras que los manejos agroecológicos presentaron valores similares y menores (Cuadro 3). Los valores altos en T-0 no se pueden asociar a un efecto positivo de la compactación, pensando en un mayor contenido de agua, ya que, al calcular el agua útil, los manejos con problemas de compactación presentan los menores valores (Cuadro 4). Esto se pudo observar al correlacionar negativamente el AU ($p < 0,01$) con R_p ($r = -0,65$). Un alto contenido de arcilla, una baja porosidad total y una alta D_a , permite que las partículas de arcilla retengan el agua en los microporos y se libere menos agua (Warrick, 2002). El manejo que presentó los mayores promedios de AU a lo largo del perfil fue 4-N.

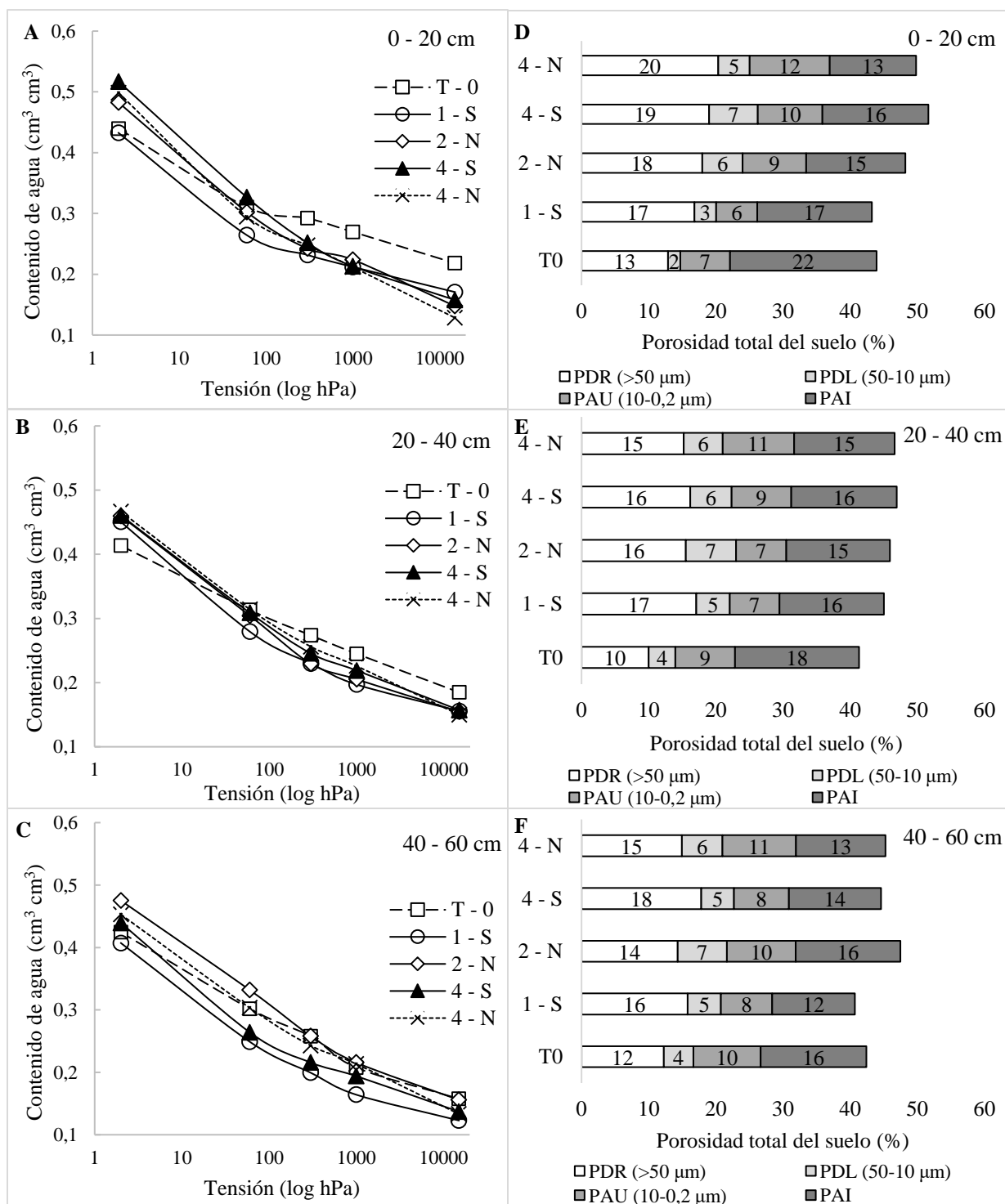


Figura 8. Curva característica de agua en el suelo para los distintos manejos agroecológicos y testigo: de 0 a 20 cm (A), de 20 a 40 cm (B) y de 40 a 60 cm (C). Porosidad total del suelo para los distintos manejos agroecológicos y testigo: de 0 a 20 cm (D), de 20 a 40 cm (E) y 40 a 60 cm (F).

La cuantificación del espacio poroso permite entender las modificaciones inducidas por las prácticas de manejo y con ello se puede identificar a aquellas que son más compatibles con la protección de la estructura del suelo (Hartge y Horn, 2016). Flores y Alcalá (2010) establecieron una clasificación de la porosidad total del suelo (Anexo 3.8), así, los manejos T-0, 1-S, 2-N y 4-N presentaron una porosidad media (40-50 %) a lo largo del perfil. Solo el manejo 4-S presentó una porosidad alta en superficie (50-60%) variando a media a las siguientes profundidades (Cuadro 4). Al comparar los manejos agroecológicos con el testigo (T-0), no se observaron diferencias para esta propiedad, salvo por el manejo 4-S en superficie. Si bien el subsolado que se aplicó al establecimiento debió generar diferencias con relación al testigo, si no se asegura una estabilidad física-mecánica, este es efímero y su persistencia en el tiempo es corta, especialmente si posterior al subsolado se ejerce tránsito de maquinaria agrícola (Botta *et al.*, 2010).

Cuadro 4. Valores promedio y desviación estándar de las propiedades calculadas para el suelo, para cada tratamiento y el testigo por intervalo de profundidad.

Propiedad		Tratamientos				
		T0	1-S	2-N	4-S	4-N
0 - 20 cm	P (%)	43,96 ± 3,57	43,25 ± 5,39	48,25 ± 3,06	51,67 ± 1,27	49,84 ± 3,09
	PDR (%)	12,91 ± 4,83	16,81 ± 1,32	18,01 ± 1,56	19,01 ± 0,63	20,38 ± 0,77
	PDL (%)	1,83 ± 0,58	3,26 ± 0,41	6,00 ± 1,00	7,26 ± 1,74	4,68 ± 1,92
	AU (%)	7,39 ± 1,48	6,10 ± 2,20	9,47 ± 1,11	9,62 ± 1,16	11,93 ± 0,84
	IP (%)	8,92 ± 3,76	7,30 ± 2,65	7,08 ± 1,77	6,86 ± 2,33	6,82 ± 0,58
	S _M (%)	14,63 ± 8,75	22,62 ± 3,16	23,06 ± 3,48	16,57 ± 4,11	17,14 ± 3,17
	SSI (%)	8,33 ± 1,93	10,52 ± 1,73	5,99 ± 0,64	10,01 ± 2,74	6,47 ± 0,92
	Rd (-)	0,55 ± 0,14	0,50 ± 0,21	0,46 ± 0,12	0,33 ± 0,06	0,17 ± 0,16
20 - 40 cm	P (%)	41,35 ± 4,14	45,05 ± 4,87	45,96 ± 4,17	46,94 ± 3,48	46,65 ± 1,51
	PDR (%)	10,02 ± 4,04	17,11 ± 2,55	15,55 ± 1,78	16,21 ± 2,36	15,24 ± 1,83
	PDL (%)	3,96 ± 2,37	4,96 ± 0,82	7,47 ± 1,51	6,17 ± 0,90	5,81 ± 1,22
	AU (%)	8,89 ± 1,61	7,42 ± 2,00	7,47 ± 2,86	8,86 ± 1,87	10,62 ± 1,02
	IP (%)	6,78 ± 1,40	8,22 ± 1,87	7,96 ± 3,01	7,53 ± 1,32	6,23 ± 1,30
	S _M (%)	13,36 ± 5,82	19,72 ± 3,46	18,74 ± 6,68	18,51 ± 4,07	19,28 ± 6,14
	SSI (%)	5,36 ± 1,77	6,95 ± 0,99	3,82 ± 0,88	5,92 ± 0,25	5,21 ± 0,56
	Rd (-)	0,58 ± 0,15	0,67 ± 0,16	0,54 ± 0,15	0,52 ± 0,14	0,40 ± 0,07
40 - 60 cm	P (%)	42,44 ± 3,06	40,71 ± 7,45	47,51 ± 7,58	44,62 ± 4,57	45,29 ± 5,33
	PDR (%)	12,25 ± 3,36	15,81 ± 4,08	14,32 ± 2,68	17,86 ± 2,52	14,96 ± 0,67
	PDL (%)	4,43 ± 0,48	4,96 ± 2,80	7,36 ± 0,99	4,86 ± 2,45	6,04 ± 0,96
	AU (%)	9,99 ± 1,91	7,65 ± 3,70	10,24 ± 2,45	8,19 ± 2,07	10,95 ± 2,12
	IP (%)	3,25 ± 0,16	7,41 ± 1,08	6,34 ± 0,59	4,97 ± 0,40	6,31 ± 1,90
	S _M (%)	8,96 ± 6,06	18,04 ± 8,17	17,71 ± 3,85	15,40 ± 5,67	18,72 ± 8,22
	SSI (%)	5,70 ± 1,70	6,09 ± 0,60	3,83 ± 0,25	5,83 ± 1,49	4,26 ± 0,43
	Rd (-)	0,67 ± 0,10	0,62 ± 0,28	0,68 ± 0,22	0,58 ± 0,17	0,45 ± 0,21

P: porosidad total; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; AU: agua útil; IP: índice de plasticidad; S_M: porosidad entre agregados; SSI: índice de estabilidad estructural; Rd: densidad relativa.

Si bien los valores de la porosidad total indicarían que no habría problemas severos relacionados a una baja porosidad, se debe tener en cuenta su distribución en función del tamaño de los poros. Los medios porosos como el suelo no deberían ser solo evaluados por su volumen total o por la capacidad de transmitir fluidos como el agua o el aire, sino también

por la distribución que estos tienen (Dörner y Horn, 2006). En las figuras 8.D, 8.E y 8.F se observa la distribución del tamaño de poros para todos los manejos agroecológicos y el testigo.

Respecto a los poros de drenaje rápido (PDR), Pagliai y Vignozzi (2002) establecen que es necesario al menos un 12 % de PDR ($> 50 \mu\text{m}$) para asegurar una adecuada aireación de las raíces. Se observó que para todos los manejos agroecológicos se presentaron valores adecuados de PDR, alcanzando mayores promedios en superficie, y que van disminuyendo en profundidad (Cuadro 4). Si bien no se pudo realizar una comparación de medias debido a la naturaleza del ensayo, se pudo observar que los manejos 4-N y 4-S presentaron los mayores promedios de PDR, probablemente asociado a labores de labranza mínima y el contenido de MO que presentan ambos manejos. Esta última favorece la macroporosidad y la estructuración del sistema edáfico (Seguel *et al.*, 2003). Pikul y Allmaras (1986) estudiaron la distribución del espacio poroso con diferentes manejos de suelo y encontraron que un aporte de residuos de cosecha aumentaba los poros de mayor diámetro (PDR), los cuales retienen el agua con menor energía, influyendo directamente sobre el sistema hídrico del suelo.

Con respecto al testigo (T-0), este presentó menores promedios en todo su perfil en comparación con los manejos agroecológicos. Si bien T-0 en superficie supera el 12% de PDR, en las siguientes profundidades presenta limitaciones, afectando el normal crecimiento de la raíz, ya que para estas no alcanzó dicho porcentaje. Es importante mencionar que, si se sigue manteniendo las mismas prácticas de manejo en T-0, los PDR seguirán disminuyendo hasta afectar el crecimiento normal de la raíz, sobre todo en los primeros 20 cm. Esta disminución está asociada a los efectos de la compactación; lo cual se puede verificar al observar la correlación significativa ($p < 0,01$) y negativa de los PDR con R_p de 0 a 20 cm ($r = -0,62$) y de 20 a 40 cm ($r = -0,60$), corroborando que a una mayor R_p hay una disminución de PDR. Los poros de drenaje lento (PDL) se encontraron en una menor proporción con respecto al resto de las otras clasificaciones (Cuadro 4), observándose valores entre 2 y 5% en superficie y aumentado de 20 a 40 cm (4 a 7%) y 40 a 60 cm (4 a 7%).

Según la clasificación para los poros de agua útil (PAU) realizada por Reynolds *et al.* (2009) y detallada en el anexo 3.9, los manejos T-0, 1-S y 4-S presentaron valores menores al 10% en todo el perfil y fueron clasificados como suelos con poros pobres para mantener un normal crecimiento y funcionamiento de la raíz. 2-N igualmente presentó poros pobres en los primeros 40 cm y ya en la profundidad de 40 a 60 cm, alcanzó una mejor clasificación (PAU limitados). Finalmente 4-N se clasificó como un suelo con PAU limitados a lo largo del perfil y si bien no alcanzó los valores ideales de PAU, este presentó las mejores condiciones entre todos los tratamientos, probablemente atribuido a su alta intensidad de uso, la cual considera la aplicación de compost (MO estabilizada) y a una mejor estructuración del suelo, ya que este manejo presentó menores efectos de la compactación. El aumento de la MOS ayuda a mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, pero se debe considerar también el tipo y el grado de descomposición de esta (Serme *et al.*, 2003).

Finalmente, los poros de agua inútil (PAI, θ_{1500}) se encontraron en mayor proporción con respecto al resto de los otros poros (Cuadro 4), observándose valores entre 15 y 22% en superficie y disminuyendo progresivamente de 20 a 40 cm (15 a 18%) y de 40 a 60 cm (14 a

16%). Los PAI no están influenciados por las prácticas de manejo; estos poros permanecen llenos de agua durante una proporción de tiempo mucho mayor que las otras clases de poros y la velocidad del flujo de agua a través de ellos es muy lenta. Son inactivos biológicamente y esta característica da lugar a una de sus funciones más importantes, la protección física del C orgánico (Warrick, 2002). Dado lo anterior, estos suelos tienen un alto potencial como reservorios de C orgánico, especialmente en superficie (valores entre 13 a 22 % de PAI).

El índice de estabilidad estructural (SSI) reveló que, a mayor profundidad, se presentaron menores valores de SSI para todos los manejos (Figura 9.A). Según la clasificación de (Pieri, 1992) que se presenta en el Anexo 3.10, solo los manejos 1-S y 4-S se presentaron como suelos con estructura estable en superficie (Cuadro 4). Ambos manejos se caracterizaron también por contener los mayores niveles de MOS (Cuadro 3). El testigo (T-0) a la misma profundidad se categorizó como un suelo con bajo riesgo de degradación estructural, relacionado también a su contenido de MOS. Serme *et al.* (2016) utilizaron el SSI para evaluar la estabilidad estructural del suelo con diferentes cantidades de enmiendas orgánicas y concluyeron que el SSI aumenta con mayores porcentajes de MOS, ya que esta promueve la estabilidad del suelo al generar una humectabilidad lenta en los agregados y generar enlaces orgánicos-minerales con las partículas del suelo, evitando el efecto dispersivo del agua (Chenu *et al.*, 2000; Dexter, 2002; Reynolds *et al.*, 2009).

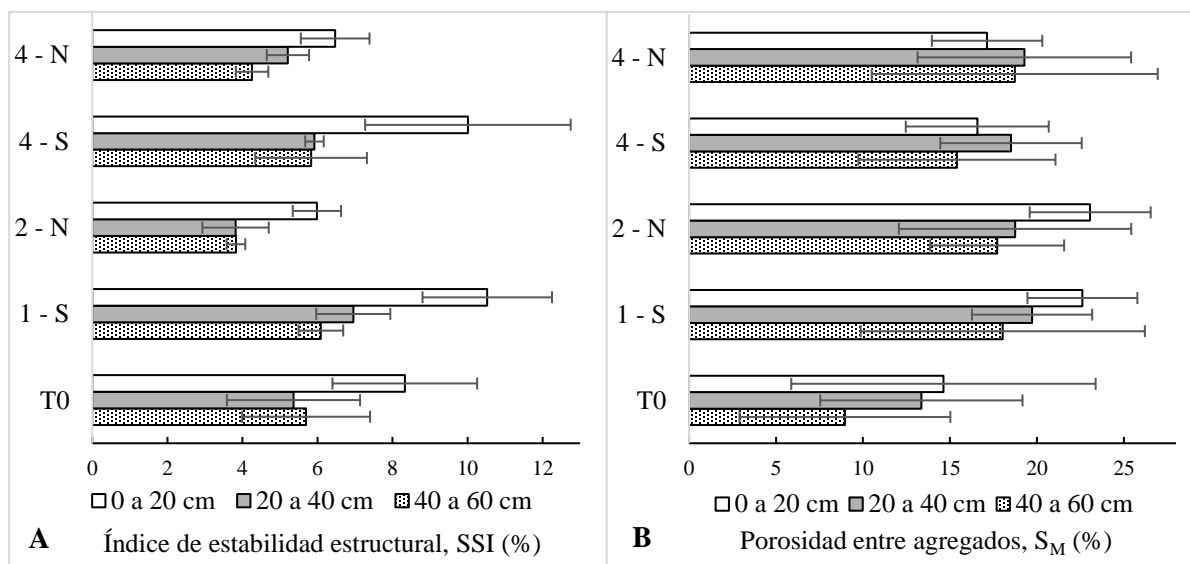


Figura 9. Índice de estabilidad estructural (A) y de la porosidad entre agregados (B) para los manejos agroecológicos y testigo.

El manejo 4-N en los primeros 40 cm se categorizó como un suelo con un alto riesgo de degradación estructural, al igual que T-0, 1-S y 4-S, pero estos a la profundidad de 20 a 60 cm (Cuadro 4). Con relación a 2-N, este se categorizó como un suelo estructuralmente degradado de 20 a 60 cm, al igual que 4-N a la profundidad de 40 a 60 cm. La disminución de la MOS en profundidad influyó en el comportamiento del SSI, presentando una correlación significativa ($p < 0,01$) y positiva de 0 a 20 cm ($r = 0,97$), de 20 a 40 cm ($r = 0,89$) y de 40 a 60 cm ($p < 0,05$; $r = 0,58$). A mayores contenidos de arcilla en el suelo, el valor de SSI disminuye [correlación significativa ($p < 0,01$) negativa de 0 a 20 cm ($r = -0,60$), de 20 a

40 cm ($r = -0,63$) y 40 a 60 cm ($p < 0,05$; $r = -0,58$) (Apéndices 2, 3 y 4)], tal como se observó en el manejo 2-N. Además, el efecto de la labranza promueve la perturbación del suelo (disminución de la estabilidad) y la pérdida de C (Powlson *et al.*, 2014), como es el caso de 4-N.

Los resultados para el espacio poroso entre agregados (S_M) se muestran en el Cuadro 4. Si bien no se realizó una prueba de comparación de medias debido a la naturaleza del ensayo, se pudo observar ciertas tendencias importantes. Para todos los manejos se observaron mayores valores de S_M en superficie y estos disminuyen en profundidad (Figura 9.B). Mayores valores de S_M están relacionados con una mayor macroporosidad en el suelo, ya que presentaron una correlación significativa ($p < 0,01$) y positiva con PDR de 20 a 40 cm ($r = 0,60$) y 40 a 60 cm ($r = 0,64$); Apéndices 3 y 4. Los manejos agroecológicos presentaron los mayores promedios respecto a T-0 y esta tendencia se mantuvo en profundidad. Menores valores de S_M para T-0 indicarían un efecto persistente de la compactación, la cual disminuye el volumen del suelo, modifica su estructura y aumenta la D_a (Baver *et al.*, 1991). Además, en relación a S_M y los PDR, se observó que los manejos 4-S y 4-N presentaron menores promedios para S_M y mayores promedios para PDR a la profundidad de 0 a 20 cm (Cuadro 4), lo que indica que para ambos manejos, parte de la porosidad gruesa se encuentra en el interior de los agregados, como resultado de la porosidad residual dejada por las raíces que se descomponen (Kay, 1990; Hartge y Horn, 1992).

El término densidad relativa (R_d) se utiliza comúnmente para indicar la densidad *in situ* o soltura de un suelo granular. Das (2013) clasificó esta propiedad en función de su nivel de soltura o densificación (Anexo 3.11). Los resultados se muestran en el Cuadro 4. Para todos los manejos se observó que existe un menor R_d en superficie, aumentando en profundidad, indicando que todos los suelos estaban más sueltos de 0 a 20 cm y a mayor profundidad se fueron densificando. Los manejos que se clasificaron con una mayor densificación fueron T-0 y 1-S (densidad media) a lo largo del perfil (Cuadro 4); T-0 presentó esa condición debido al afecto de la compactación y 1-S probablemente a la baja intervención. En los manejos 2-N y 4-S se presentaron suelos sueltos de 0 a 20 cm, y para las siguientes profundidades se clasificaron como suelos con densidades medias. Para el caso de 2-N, probablemente el cultivo de cubierta influyó en esta propiedad, ya que la alfalfa se caracteriza por un sistema radical de gran longitud y diámetro, que promueve la macroporosidad del suelo y el flujo del agua (Rasse *et al.*, 2000). Con respecto a 4-S, la labranza que se realiza previa a la siembra de la cobertura aumenta la porosidad y disminuye la densificación del suelo en superficie, pero puede aumentarla en profundidad (Hakansson, 2005). Finalmente, 4-N fue el único que se clasificó como un suelo suelto a lo largo de todo el perfil, asociado al movimiento del suelo por mínima labranza. R_d está asociada con la D_{ac} [correlación significativa ($p < 0,01$) y positiva de 0 a 20 cm ($r = 0,66$) y 40 a 60 cm ($r = 0,76$)] y con P [correlación significativa ($p < 0,01$) y negativa de 0 a 20 cm ($r = -0,99$), 20 a 40 cm ($r = -1,00$) y 40 a 60 cm ($r = -0,99$)] y esto está relacionado a problemas de compactación (Pagliai y Vignozzi, 2002).

Determinación de indicadores físicos de calidad del suelo

Para la determinación de los indicadores, se estableció seleccionar el grupo de indicadores que más contribuyeron a la calidad del suelo, calificar los indicadores en función a su desempeño dentro de las funciones del suelo y emplear los criterios de clasificación para las propiedades seleccionadas definidos por diversos autores.

Para observar el comportamiento de las propiedades físicas en los distintos manejos agroecológicos y el testigo y determinar los indicadores de calidad de suelo, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para las tres profundidades (Apéndice 1), solo considerando los dos primeros componentes, ya que estos resumen los mayores porcentajes de variabilidad. El ACP es ampliamente utilizado como herramienta para identificar indicadores de calidad del suelo (Masto *et al.*, 2009; Sharma *et al.*, 2014; Barrezueta *et al.*, 2017). Para tener representatividad de datos, los autovalores de cada componente deben ser mayores a 1 (autovalor > 1) (Bolaños *et al.*, 2012; Doukas *et al.*, 2012; Barrezueta *et al.*, 2017). Solo las variables que tuvieran los mayores autovectores fueron seleccionadas para cada componente, para esto se utilizaron aquellos autovectores con valor absoluto que su distancia represente como máximo una variación del 10 % con respecto al autovector más alto (Masto *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2015; Barrezueta *et al.*, 2017). Para la eliminación de las variables redundantes del ACP, se aplicó la correlación de Pearson con un $\alpha \leq 0,01$ y $\alpha \leq 0,05$; los indicadores seleccionados dentro de un CP que mantuvieron alta correlación entre ellos fueron descartados y solo se seleccionó a uno (Vasu *et al.*, 2016) en función de la representatividad de este frente a las demás propiedades agrupadas.

Previo al ACP, se observó que se obtuvieron menores valores de autovectores para todos los componentes, a diferencia de Masto *et al.* (2008) que presentaron mayores valores. Esto se debió principalmente a la cantidad de datos que se están procesando y a la estandarización de los mismos para obtener los CP. Para observar el resultado de los manejos en las propiedades evaluadas se decidió considerar los cuatro puntos de muestreo en el ACP, con el objetivo de verificar si el efecto de un determinado manejo se está repitiendo en cada punto de muestreo, metodología previamente utilizada por Rodríguez *et al.* (2009). Cabe mencionar que esta forma de expresar los datos reduce la variabilidad explicada de cada componente, pero permite observar los datos más a detalle.

La Figura 10 muestra el ACP para las propiedades físicas a la profundidad de 0 a 20 cm, observándose que la máxima variabilidad es explicada en un 54,4% por los dos primeros componentes, siendo las variables del primer componente las que resumen un 32,4%, en tanto el segundo componente aporta con una variabilidad de un 22,0%.

A lo largo de CP 1 se observó que las variables: arena (0,29), AU (-0,29), Rp (0,28), LP (0,28) y limo (-0,27) fueron las variables más sensibles a los cambios producto de los distintos manejos agroecológicos.

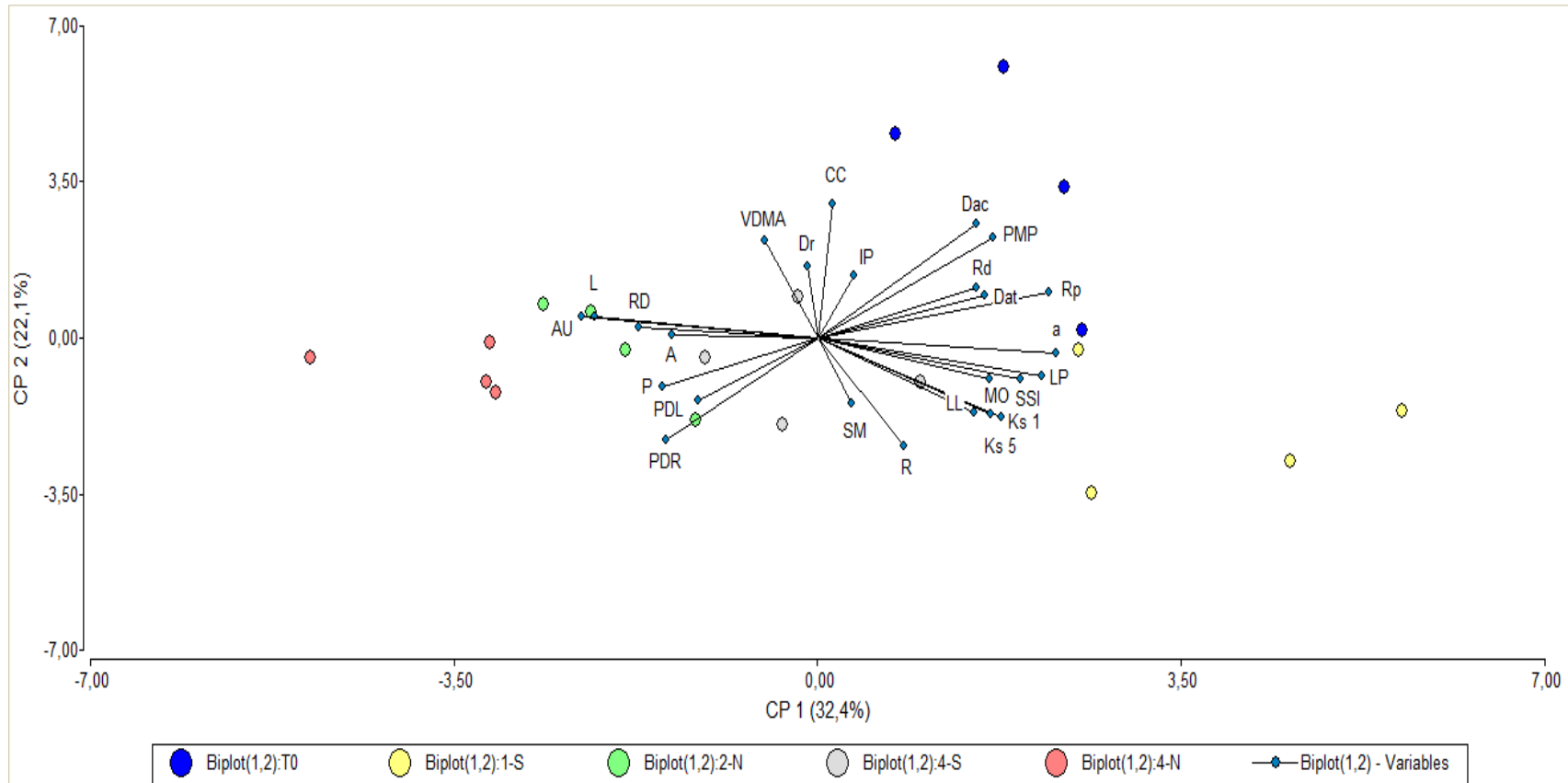


Figura 10. Análisis de componentes principales (ACP) a la profundidad de 0 a 20 cm. a: arena; L: limo; A: arcilla; MO: materia orgánica del suelo; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Rp: resistencia a la penetración; CC: contenido de agua a 33 kPa; PMP: contenido de agua a 1500 kPa; R: índice de repelencia al agua; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; AU: agua útil; S_M: porosidad entre agregados; SSI: índice de estabilidad estructural; Rd: densidad relativa.

Al analizar CP 2, se observó que solo CC (0,38) fue la variable más sensible. La matriz de correlación (Apéndice 2) muestra que el contenido de arena se correlacionó significativa ($p < 0,01$) y positivamente con LP ($r = 0,65$), pero como se esperaba, negativamente con el AU ($r = -0,60$) y el limo ($r = -0,69$). La textura del suelo es un elemento esencial que establece y define propiedades permanentes en el largo plazo (Sandoval *et al.*, 2012), y no refleja cambios a corto y mediano plazo por el efecto de manejos agrícolas (Astier *et al.*, 2002). Los indicadores físicos del suelo, especialmente los relacionados con el almacenamiento de agua, se propusieron con frecuencia en los esquemas de evaluación a corto plazo (Bünemann *et al.*, 2018). Debido a la alta correlación que tienen estas variables, se seleccionó solo al AU como el indicador que represente estas tres propiedades. En resumen, las propiedades que fueron seleccionadas fueron: Rp, AU y CC.

Con relación a los manejos agroecológicos y el testigo, se observó que los promedios de los cuatro puntos de muestreo tienen una distribución a lo largo del primer componente, demostrando que el efecto de cada manejo se está diferenciando con respecto a los otros para esta profundidad. Los manejos 2-N y 4-N son explicados principalmente por el contenido de agua y la porosidad del suelo. Estos manejos se caracterizaron por presentar altos contenidos de AU, una mayor porosidad, especialmente relacionada a los PDR y en menor medida a los PDL, además de presentar una baja estabilidad de microagregados. Para el caso de T-0 y 1-S, se relacionaron a propiedades que expresan el efecto de la compactación del suelo: presentó mayores valores de CC y PMP (producto de la disminución de los PDR y PDL), valores altos de Dac y de Rp y en menor medida una mayor Dat y Rd. Para el caso del manejo 4-S, éste se mantuvo cercano al origen, no asociándose a ninguna propiedad en particular. En resumen, se puede observar que todos los manejos agroecológicos se distinguen del testigo, a excepción de 1-S, el cual presenta una tendencia similar, es decir, la baja intensidad de uso de suelo que se le da a este tratamiento permite una recuperación lenta del suelo.

La Figura 11 muestra el ACP para las propiedades físicas a la profundidad de 20 a 40 cm, observándose que la máxima variabilidad es explicada en un 47,9% por los dos primeros componentes, siendo las variables del primer componente las que resumen un 26,3%; el segundo componente solo resume un 21,6%.

A lo largo de CP 1 se observó que las variables Dac (0,36) y PDR (-0,36) fueron las más sensibles a los cambios producto de los distintos manejos agroecológicos. Igualmente, al analizar CP 2, se observó que las variables: SSI (0,38), Ks 1 (0,35) y limo (-0,34) fueron las más sensibles. La matriz de correlación para esta profundidad (Apéndice 3) muestra que la Dac se correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente con PDR ($r = -0,85$). La Dac se usa tanto como un indicador de aireación del suelo, como un indicador de la resistencia del mismo (Reynolds *et al.*, 2003; Drewry *et al.*, 2008), donde mayores valores (en función de la textura) implican una disminución de la porosidad y un impedimento al crecimiento de las raíces y, por lo tanto, se interpretaría como un efecto negativo en la calidad de los suelos (Sithole y Magwaza, 2016). Li *et al.* (2020), en un análisis global de los efectos de los sistemas de labranza, concluyen que la Dac se mantuvo e incluso aumentó en un corto (<6 años) y mediano plazo (6-12 años) en sistemas de cero labranza, como es el caso de 1-S. Esto podría generar una mala interpretación, sobre todo para este manejo, ya que se le relacionaría a un aumento de la compactación.

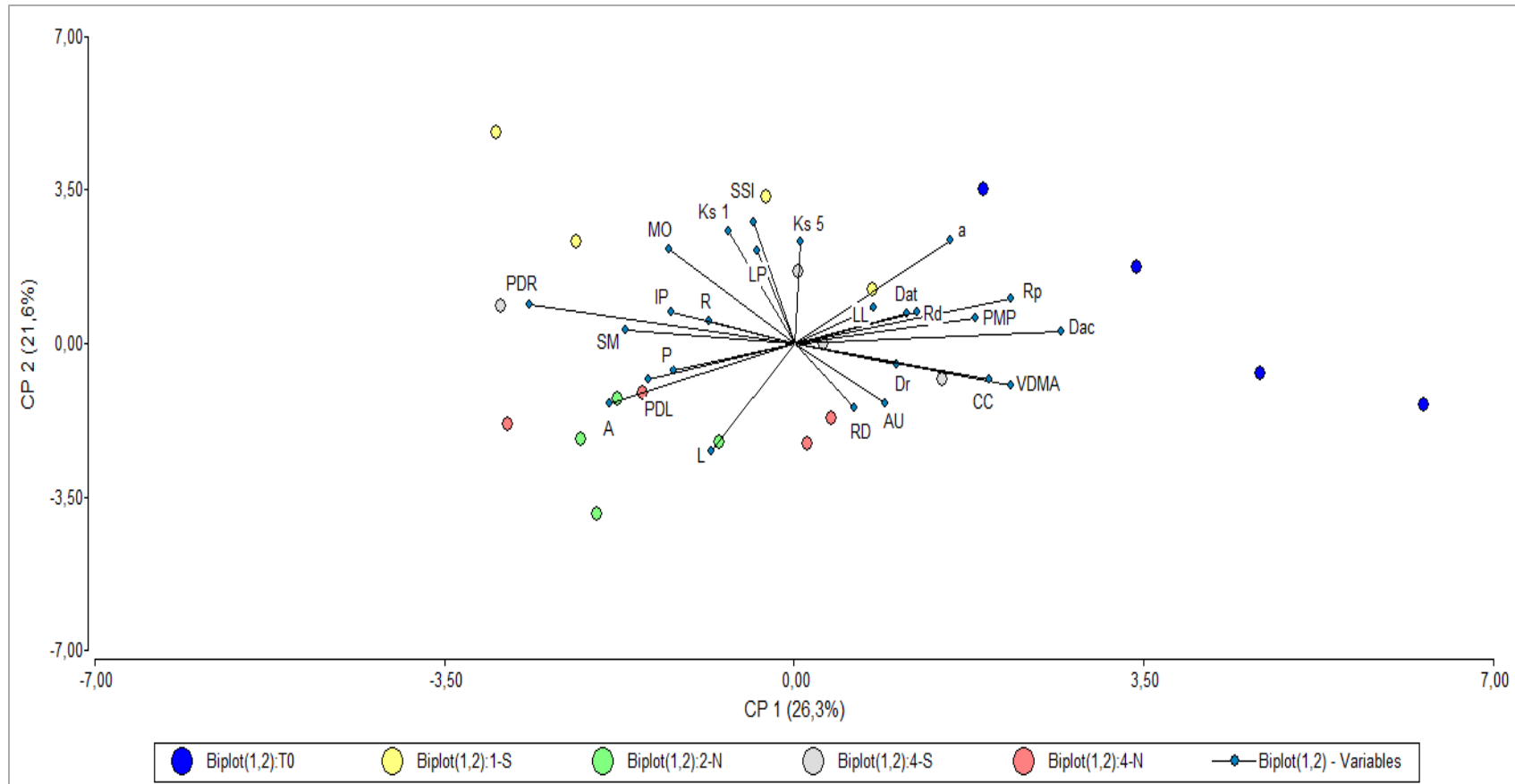


Figura 11. Análisis de componentes principales (ACP) a la profundidad de 20 a 40 cm. a: arena; L: limo; A: arcilla; MO: materia orgánica del suelo; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Rp: resistencia a la penetración; CC: contenido de agua a 33 kPa; PMP: contenido de agua a 1500 kPa; R: índice de repelencia al agua; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; AU: agua útil; SM: porosidad entre agregados; SSI: índice de estabilidad estructural; Rd: densidad relativa.

Por ello, se prefirió elegir como indicador a los PDR. El limo fue descartado como indicador debido a que se busca propiedades que muestren cambios en un corto y mediano plazo, además que estas propiedades sean influenciadas por manejos del suelo. Finalmente se seleccionó como indicadores a los PDR, SSI y K_s 1.

En relación a los manejos agroecológicos y el testigo, se observó que los promedios de los cuatro puntos de muestreo, si bien mantienen una tendencia similar, estos están más dispersos, explicando que para esta profundidad hay una disminución del efecto de cada manejo en el suelo. Los manejos 2-N y 4-N se comportan como si fueran un solo manejo y son explicados principalmente por los contenidos de arcilla y limo. Otras propiedades que representan a estos manejos, pero en menor medida son la porosidad total, en la cual destaca mayores porcentajes de PDL, un mayor contenido de AU y una menor estabilidad de microagregados. Para el caso de T-0, al igual que a la profundidad de 0 a 20 cm, se relacionó a propiedades que expresan el efecto de la compactación: una alta R_p y Dac , un alto contenido de arena y una menor estabilidad de macroagregados. En menor medida se presentaron mayores valores del contenido de agua a -33 y -1500 kPa (producto de la disminución de los PDR y PDL). El manejo 1-S se relacionó a valores altos de PDR, MOS, K_s , arena y a una mayor estabilidad estructural. Se puede observar que para esta profundidad todos los manejos agroecológicos tienden a agruparse, diferenciándose por algunas propiedades, pero siempre en contraste con el testigo. Cabe mencionar que previo a la sectorización de los manejos agroecológicos, se realizó un subsolado y por ello los resultados del ACP muestran diferencias con respecto a T-0.

La Figura 12 muestra el ACP para las propiedades físicas a la profundidad de 40 a 60 cm, observándose que la máxima variabilidad es explicada en un 49,1 % por los dos primeros componentes, siendo las variables del primer componente las que explican un 28,9% de la variabilidad; con respecto al segundo componente, este resume una variabilidad de un 20,2 %.

A lo largo de CP 1 se observó que las variables: Dac (0,33) y S_M (-0,30) fueron las más sensibles a los cambios producto de los distintos manejos agroecológicos, seguidos muy de cerca por los PDR y la MO. Al analizar CP 2, se observó que las variables arena (0,41) y limo (-0,38) fueron las más sensibles al cambio. La matriz de correlación para esta profundidad (Apéndice 4) muestra que la Dac se correlacionó significativa ($p < 0,01$) y negativamente con S_M ($r = -0,70$).

Si bien la Dac es utilizada como uno de los principales indicadores de la calidad de suelo (Drewry *et al.*, 2008), se explicó que podría generarse una inadecuada interpretación en sistemas de cero labranza; además la Dac está representada por otras propiedades ya establecidas como indicadores. Para CP 2, la arena tuvo una correlación significativa ($p < 0,01$) y negativa con el limo (-0,86). Como se explicó anteriormente, los contenidos de arena, limo y arcilla son generalmente utilizados para estudios de pérdida de suelo y dada a condiciones de este ensayo (buscar indicadores que puedan reflejar cambios a un corto a mediano plazo), estos indicadores no fueron seleccionados; por lo tanto, S_M fue el único indicador seleccionado para esta profundidad.

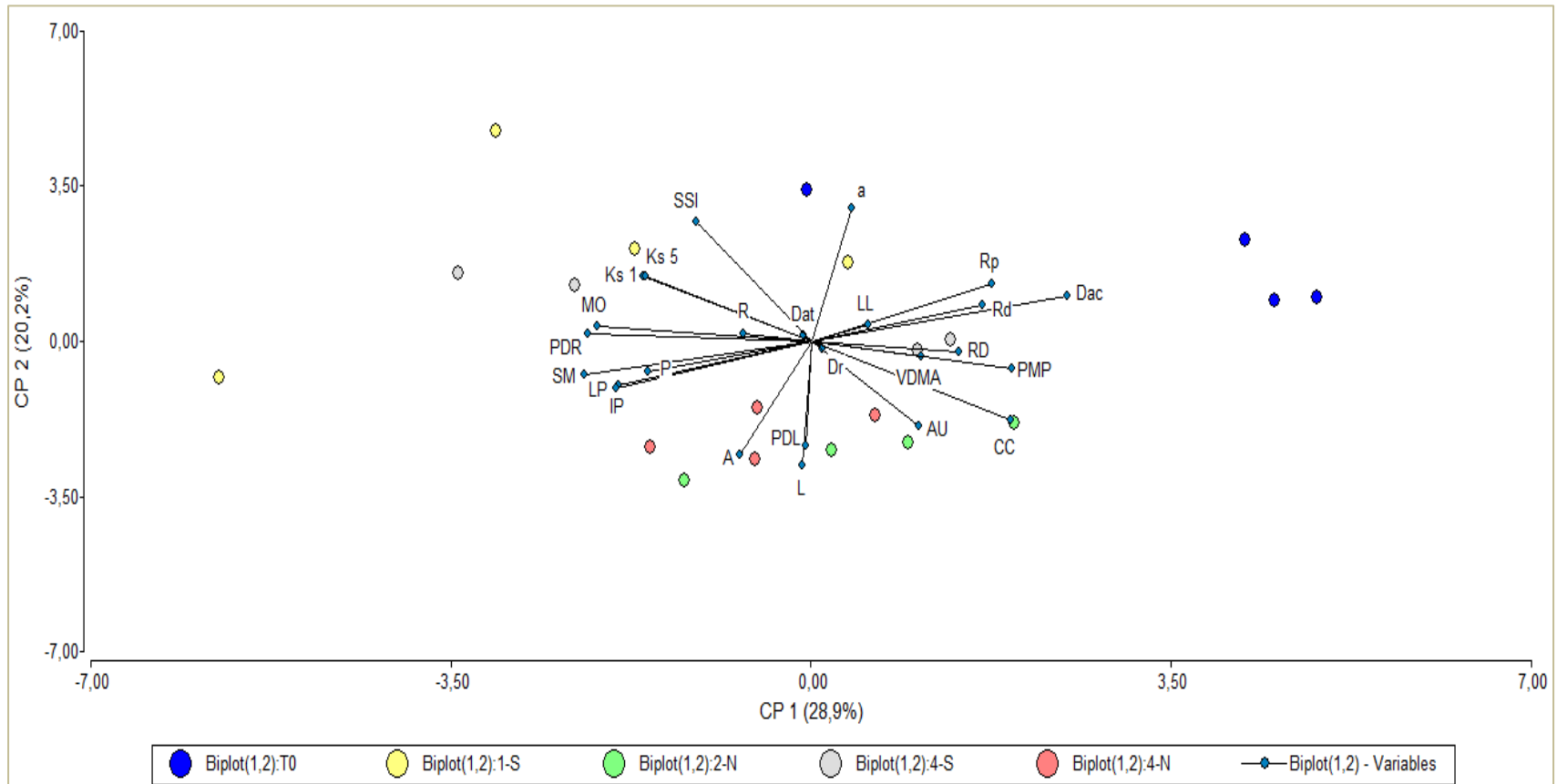


Figura 12. Análisis de componentes principales (ACP) a la profundidad de 40 a 60 cm. a: arena; L: limo; A: arcilla; MO: materia orgánica del suelo; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Rp: resistencia a la penetración; CC: contenido de agua a 33 kPa; PMP: contenido de agua a 1500 kPa; R: índice de repelencia al agua; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; AU: agua útil; S_M: porosidad entre agregados; SSI: índice de estabilidad estructural; Rd: densidad relativa.

En relación a los manejos agroecológicos y el testigo, se observó que los promedios de los cuatro puntos de muestreo se encuentran mucho más dispersos a esta profundidad, donde probablemente solo se puede diferenciar el efecto del subsolado inicial que se realizó previo a la instalación de los manejos y el efecto de la compactación que tiene el testigo. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurrió entre 0-20 cm, T-0 y 1-S se discriminaron claramente, con la excepción de una repetición en cada caso.

Después de analizar 25 variables mediante ACP, se seleccionaron 7 como indicadores de la calidad física del suelo. Los indicadores seleccionados fueron: resistencia a la penetración, agua útil, capacidad de campo, conductividad hidráulica saturada, poros de drenaje rápido, índice de estabilidad estructural y porosidad entre agregados.

Una característica común entre los indicadores seleccionados es que la mayoría son expresiones directas o indirectas del volumen y/o función del espacio poroso del suelo. AU y CC dependen directamente de la porosidad y de las características de almacenamiento del agua en el suelo (Dexter, 2004), mientras que el SSI (Pieri, 1992) se relaciona indirectamente con el espacio y/o función de los poros a través del contenido de MOS y la textura. La macroporosidad (PDR) y S_M están en función del volumen de los poros tanto de la matriz como en los agregados (Reynolds *et al.*, 2009). La R_p es una forma de cuantificar la compactación *in situ*; es una propiedad que es utilizada para analizar la degradación del suelo, siendo sensible a los cambios producidos en el suelo por microgrietas, planos de fractura y porosidad estructural, a diferencia de la D_{ac} , que solo es sensible a los cambios de porosidad del suelo (Blanco, 2009). En este sentido, la R_p sería un método más sensible para medir la compactación del suelo, sobre todo en profundidad (Clark *et al.*, 2004). Sin embargo, requiere especial atención en el protocolo de medición, debiendo estandarizarse con mediciones a capacidad de campo, dada la variación exponencial de la R_p a medida que el suelo se seca (Stock y Downes, 2008). Finalmente, la conductividad hidráulica saturada representa la continuidad y la funcionalidad del sistema poroso, ya que los procesos de compactación modifican ambos factores (Horn y Fleige, 2009).

Las propiedades inherentes (textura o el tipo de arcilla del suelo) cambian poco o nada con el uso o con las prácticas de manejo, por lo que son valiosas para la caracterización inicial del suelo, pero no para monitorear el cambio a corto plazo (Oliver *et al.*, 2013).

En relación a la frecuencia de evaluación, Astier *et al.* (2002) recopilan información de varios autores y clasifican indicadores en función al tiempo requerido para percibir los cambios, donde se observó que los indicadores seleccionados para este ensayo pueden mostrar cambios entre uno a dos años. Finalmente se decidió que la medición de los indicadores se deberá realizar cada dos años.

CONCLUSIONES

La degradación a la cual fue sometido el suelo por el efecto de la compactación se reflejó en las propiedades físicas, especialmente aquellas relacionadas a la porosidad y a la densificación del suelo. Los manejos agroecológicos presentaron diferencias en varias propiedades, especialmente a la profundidad de 0 a 20 cm, observándose un efecto restaurador en función de la intensidad de uso.

La clase textural predominante del suelo fue la franca, con valores de densidad real entre 2,60 y 2,87 Mg m⁻³. Los manejos 1-S y 4-S (intensidades de uso baja y media) presentaron contenidos muy altos de materia orgánica (MOS) y a la vez los mayores valores de hidrofobicidad en superficie. Los cuatro manejos agroecológicos presentaron una densidad aparente medida con el método del cilindro (Dac) categorizada como adecuada en superficie, densificándose a mayor profundidad. En relación a la resistencia a la penetración (Rp), 4-N (alta intensidad de uso) presentó la más baja compactación a lo largo del perfil; los demás manejos agroecológicos fueron clasificados como compactados. El manejo T-0 presentó una mayor Dac a las tres profundidades, al igual que una mayor Rp, ocasionado principalmente por el uso de maquinaria. En relación a la porosidad entre agregados (S_M), esta fue mayor en los manejos agroecológicos, diferenciándose del T-0, el cual presentó una baja S_M.

Debido al corto tiempo de establecimiento de los manejos, no se observó una buena estabilidad tanto de macroagregados como de microagregados, destacando solo el manejo 1-S (baja intensidad) por presentar una mayor estabilidad. En relación al índice estructural (SSI), 1-S y 4-S (intensidades de uso baja y media) se clasificaron como suelos estables en superficie, relacionado a altos contenidos de MO; los manejos 2-N y 4-N (intensidades de uso media a alta), al presentar los menores promedio, fueron clasificados con un alto riesgo de degradación estructural, relacionados a bajos contenidos de MOS y al efecto de la labranza (particularmente 4-N). No se presentaron problemas con la conductividad hidráulica (Ks) en todos los manejos, destacando el manejo 1-S por presentar valores muy altos, asociados a la MOS y un mayor porcentaje de grava. T-0, pese a la compactación, presentó valores altos, también asociados al contenido de MOS y grava en el suelo. El manejo T-0 presentó mayores valores de CC y PMP, relacionados a una mayor compactación, pero con una menor cantidad de agua aprovechable (PAU). Los manejos agroecológicos presentaron mayores valores de PAU, siendo 4-N el cual presentó la mejor condición. De igual forma, los cuatro manejos agroecológicos presentaron mayores valores de poros gruesos (PDR) en comparación al T-0, en el cual fueron muy bajos.

Después del ACP se seleccionaron siete indicadores físicos de la calidad de suelo: resistencia a la penetración, agua útil, capacidad de campo, conductividad hidráulica saturada, poros de drenaje rápido, índice de estabilidad estructural y porosidad entre agregados, los cuales serán evaluados cada dos años.

LITERATURA CITADA

- Abassi, M., and G. Rasool. 2005. Effects of different land-use types on soil quality in the hilly area of Rawalakot Azad Jammu and Kashmir. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science* 55(3): 221-228.
- Abiven, S., S. Menasseri, and C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability. A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41(1): 1-12.
- Alam, A. 2014. Soil degradation: A challenge to sustainable agriculture. *International Journal of Scientific Research in Agricultural Sciences* 1(4): 50-55.
- Albiero, D., A. Da Silva-Maciel, y R. Tunussi. 2011. Características del suelo en respuesta al uso de la herramienta de labranza conservacionista Paraplow rotatorio. *Agrociencia* 45: 147-156.
- Altieri, M.A. 1995. *Agroecología, bases científicas para una agricultura sustentable*. CLADES. Santiago, Chile.
- Altieri, M.A. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93(1-3): 1-24.
- Altieri, M.A., y C. Nicholls. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas* 16(1): 3-12.
- Andrews, S., D. Karlen, and J. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90(1): 25-45.
- Astier, M., M. Moreno, M. Etchevers, y J. Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5): 605-620.
- Barrezueta, S., A. Paz, y J. Chabla. 2017. Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia de El Oro-Ecuador. *Revista Cumbres* 3(1): 17-24.
- Bautista, A., J. Etchevers, R. del Castillo, y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2): 90-97.
- Baver, L., W.H. Gardner, y W. R. Gardner. 1991. *Física de Suelos*. Limusa, México.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner, R. Swain, and D. Soane. 1982. *Techniques for measuring soil physical properties*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Swedish.
- Bilotta, G., R. Brazier, and P. Haygarth. 2007. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in Agronomy* 94: 237-280.
- Blanco, R. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia* 43: 231-239.
- Blanco-Canqui, H., and S. Ruis. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326: 164-200.
- Blanco-Canqui, H., T. Shaver, J. Lindquist, C. Shapiro, C. Francis, G. Hergert, and R. Elmore. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal* 107: 2449-2474.
- Bolaños, N., A. Tapia, G. Soto, y E. Filho. 2012. Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi. *InterSedes* 13(26): 85-105.

- Bommarco, R., D. Kleijn, and S. Potts. 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology and Evolution* 28: 230-238.
- Botta, G., D. Jorajuria, and L. Draghi. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics* 39(1): 47-54.
- Botta, G., A. Tolon-Becerra, X. Lastra-Bravo, and M. Tourn. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research* 110: 167–174.
- Brady, N. 1984. *The nature and properties of soils*. 9th ed. MacMillan Publishing Company, NJ, USA.
- Brady, N., and R. Weil. 2000. *Elements of the nature and properties of soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Bruce, R., G. Langdale, L. West, and W. Miller. 1992. Soil surface modification by biomass inputs affecting rainfall infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1614-1620.
- Bünemann, E., G. Bongiorno, Z. Bai, R. Creamer, G. De Deyn, R. De Goede, and L. Brussaard. 2018. Soil quality: A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.
- Carter, M. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94: 38-47.
- Casagrande, A. 1932. Research of Atterberg limits of soils. *Public Roads* 3(8): 121-136.
- Casanova, M., O. Seguel, J. Haberland y C. Kremer. 2008. Propiedades Físicas: Indicadores de calidad y salud de suelos. *Antumapu* 6(12): 3234.
- Cass, A. 1999. Interpretation of some soil physical indicators for assessing soil physical fertility. p. 95-102. *In: Perevil, K., L. Sparrow, and D. Reuter (eds.). Soil Analysis: An interpretation manual*. 2nd ed. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Cass, A., D. Hansen, and A. Dowley. 2002. Grape performance and soil conditions. p. 5-15. *In: Cass, A. (ed.). Sustainable viticultural production: optimizing soil resources*. Alfred Cass and Associates, Calistoga, California, USA.
- Castellanos, J., J. Uvalle, y A. Aguilar. 2000. *Manual de interpretación de suelos y aguas*. 2^{da} ed. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola, México.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais, and D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1479-1486.
- CIREN. 1997. *Estudio agrológico V Región*. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación CIREN N° 116. Santiago, Chile.
- Clark, J., J. Russell, D. Karlen, P. Singleton, W. Busby, and B. Peterson. 2004. Soil surface property and soybean yield response to corn stover grazing. *Agronomy Journal* 96: 1364-1371.
- Costantini, C., A. Edoardo, C. Branquinho, A Nunes, G. Schwilch, I. Stavi, A. Valdecantos, and C. Zucca. 2016. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. *Solid Earth* 7: 397-414.
- Cuevas, J., O. Seguel, A. Ellies, y J. Dörner. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 6 (2): 1-12.
- Das, B. 1997. *Soil mechanics laboratory manual*. 5th ed. Engineering Press, Texas, USA.
- Das, B. 2013. *Fundamentos de ingeniería geotecnia*. 4^{ta} ed. Cengage Learning, Texas, USA.

- Defossez, P., and G. Richard. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research* 67: 41–64.
- Dension, R. 2012. *Darwinian Agriculture: How understanding evolution can improve agriculture*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Dexter, A. 2002. Soil structure: the key to soil function. *Advances in Geocology* 35: 57-69.
- Dexter, A. 2004. Soil physical quality. *Soil and Tillage Research* 79: 129-130.
- Dietrich, J., C. Schmitz, C. Müller, M. Fader, H. Lotze-Campen, and A. Popp. 2012. Measuring agricultural land-use intensity - A global analysis using a model-assisted approach. *Ecological Modelling* 232: 109-118.
- Doerr, S., R. Shakesby, and R. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews* 51(1-4): 33-65.
- Doran, J., and T. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. p. 3-21. *In: Doran, J., D. Coleman, D. Dezdicek, and B. Stewart (eds.). Defining and assessing soil quality for sustainable environment*. Soil Science Society of America, Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Dörner, J., and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 213-220.
- Doukas, H., A. Papadopoulou, N. Savvakis, T. Tsoutsos, and J. Psarras. 2012. Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(4): 1949-1957.
- Drewry, J., K. Cameron, and G. Buchan. 2008. Grass performance and physical soil property properties to soil compaction by stepping and grazing - a review. *Australian Journal of Soil Research* 46: 237-256.
- Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* 16: 101-110.
- Ellies, A., y C. Ramirez. 1992. Efecto de la compactación de suelos volcánicos sobre el crecimiento de *Lolium multiflorum* y *Lolium pratense*. *Agricultura Técnica* 52: 450- 455.
- Flores, L., y J. Alcalá. 2010. *Manual de procedimientos analíticos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Franzluebbers, A. 2009. Linking soil organic carbon and environmental quality through conservation tillage and residue management. p: 263-289. *In: Lal, R., and R. Follet (eds.). Soil carbon sequestration and the greenhouse effect*. 2nd ed. Soil Science Society of America, Special Publication 57, Madison, WI, USA.
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. De León, C. Hidalgo, L. Dendooven, K. Sayre, and J. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy* 30: 228-237.
- Gomiero, T. 2016. Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability* 8: 1-41.
- Gover, G., R. Merckx, B. van Wasemael, and K. Van-Oost. 2017. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *Soil* 3: 45-59.
- Grandy, A., and G. Robertson. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems* 10 (1): 59-74.
- Gregorich, E., M. Carter, D. Angers, C. Monreal, and B. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385.

- Hakansson, I. 2005. Machinery-induced compaction of arable soils incidence consequences counter measures. Reports from the division of soil management N°. 109. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Uppsala, Sweden.
- Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82: 121-145.
- Harper R., I. McKissock, R. Gilkes, D. Carter, and P. Blackwell. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency. *Journal of Hydrology* 231: 371-383.
- Hartge, K., und R. Horn. 1992. *Bodenphysikalisches Praktikum* 3rd ed. Enke Verlag, Stuttgart, Germany.
- Hartge, K., und R. Horn. 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. Vollst. Überarbeitete Auflage.* Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, Germany.
- Hartge, K., and R. Horn. 2016. *Essential soil physics. An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics.* Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Hazelton, P., and B. Murphy. 2016. *Interpreting soil test results: what do all the numbers mean?* 3rd ed. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Hill, S., and R. MacRae. 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7: 81-87.
- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116: 77-88.
- Horn, R., and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102: 201–208.
- Horn, R., and M. Lebert. 1994. Soil compactability and compressibility. p. 45-69. *In: Soane, B., and C. Van Ouwerkerk (eds.). Soil compaction in crop production.* Elsevier, New York, USA.
- Huggins, D., and J. Reganold. 2008. No-till. The quiet revolution. *Scientific American* 299 (1): 70-77
- Hunt, N., and R. Gilkes. 1992. *Farm Monitoring handbook: A Practical down to earth manual for farmers and other land users.* Land Management Society, Perth, Australia.
- Iqbal, J., J. Read, A. Thomasson, and J. Jenkins. 2005. Relationships between soil-landscape and dryland cotton lint yield. *Soil Science Society of America Journal* 69: 872-882.
- Jaramillo, D. 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista Académica Colombiana de Ciencias* 30(115): 215-232.
- Jordán, A., L. Zavala, and J. Gil. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81: 77-85.
- Karlen, D., J. Kovar, A. Cambardella, and T. Colvin. 2013. Thirty year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil and Tillage Research* 130: 24-41.
- Karlen, D., M. Mausbach, J. Doran, R. Cline, R. Harris, and G. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Kay, B. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12: 1-52.
- Kay, B., and D. Angers. 2000. Soil structure. p. 229-276. *In: Summer, M. (ed.). Handbook of Soil Science.* CRC Press, Boca Raton, USA.
- Kézdi, A. 1979. *Soil physics: Selected topics.* Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

- Klute, A. 1965. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. p. 210-221. *In*: Black, B. (ed.). *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Wisconsin, USA.
- Krull, E., O. Skjemstad, and J. Baldock. 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Grains Research and Development Corporation, Report Project No CSO 00029.
- Lal, R., and M. Shukla. 2004. *Principles of soil physics*. Marcel Dekker. New York, USA.
- Le Bissonnais, Y., and D. Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48: 39-48.
- Leeds-Harrison, P., E. Youngs, and B. Uddin. 1994. A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 45: 269-272.
- Li, Y., Z. Li, S. Cui, and Q. Zhang. 2020. Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture. *Geoderma* 361: 114099.
- Liess, M., B. Glaser, and B. Huwe. 2012. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture comparison of regression tree and random forest models. *Geoderma* 170: 70-79.
- Linstrom, M., and W. Voorhees. 1994. Responses of temperate crops in North America to soil compaction p. 265-286. *In*: Soane, B., and C. Van Ouwerker. (eds.). *Soil compaction in crop production*. Developments in Agricultural Engineering, Vol. 11. Elsevier, New York, USA.
- Lipiec, J. 2004. Compaction effect on soil physical properties and root and shoot growth. p. 124-133. *In*: Glinsky, J., G. Jozefacink, K. Stahr (eds.). *Soil plant atmosphere aeration and environmental problems*. Lublin, Stuttgart, Germany.
- Lipiec, J., A. Ferrero, V. Giovanetti, A. Nosalewicz, and M. Turski. 2002. Response of structure to simulated trampling of woodland soil. *Advances in Geocology* 35: 133-140.
- López, R. 2002. *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. 2^{da} ed. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Luzio, W., M. Casanova, y O. Seguel. 2010. Suelos de la zona mediterránea árida. p. 125-174. *In*: Luzio, W. (Ed.). *Suelos de Chile*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Mac-Ewan, R. 2007. Soil health for Victoria's agriculture context, terminology and concepts, Melbourne, Australia. Disponible en: <http://vro.agriculture.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/vluis> (Consultado en diciembre de 2018).
- Martínez, J., J. Galantini, M. Duval, y F. López. 2015. Indicadores edáficos de la calidad de suelos con trigo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencias Agronómicas* 26(15): 23-31.
- Masto, R., P. Chhonkar, D. Singh, and A. Patra. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136: 419-435.
- Masto, R., P. Chhonkar, D. Singh, and A. Patra. 2009. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a sub-tropical environment. *Environmental Geology* 56(6): 1237-1243.
- Mc-Garry, D. 2001. Tillage and soil compaction. p. 281-291. *In*: *Proceeding of First World Congress on Conservation Agriculture*. 1-5 October 2001. Natural Resource Sciences, Madrid, Spain.
- Mirsal, I. 2008. Soil Degradation. p. 95-114. *In*: *Soil Pollution: Origen, monitoring and remediation*. 2nd ed. Springer, Heidelberg, Berlin, Germany.

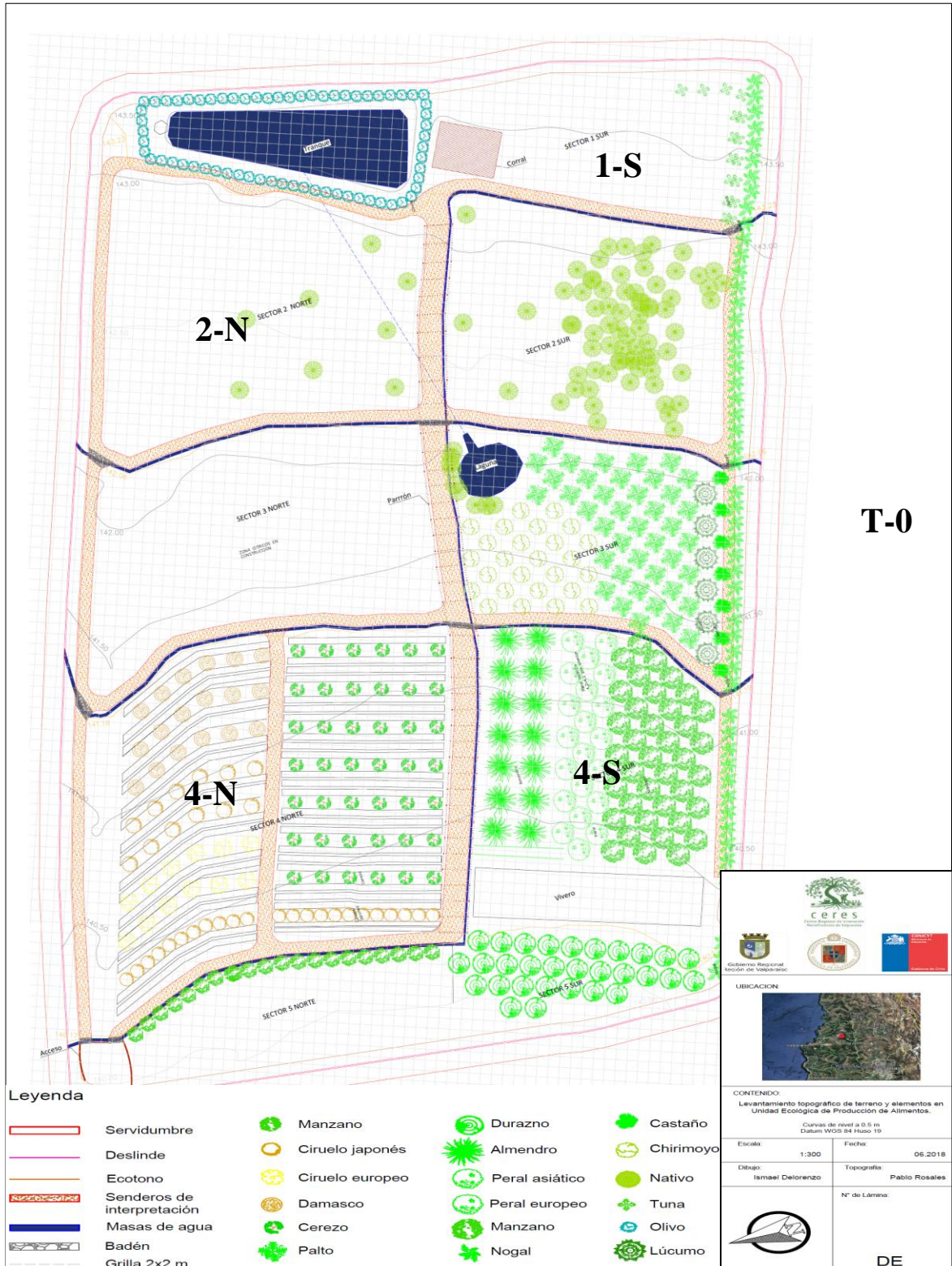
- Mulumba, L., and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 98: 106-111.
- Nortcliff, S. 2002. Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88(2): 161-168.
- Novelli, L., O. Caviglia, and G. Piñeiro. 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil and Tillage Research* 165: 128-136.
- Oliver, D., G. Bramley, D. Riches, I. Porter, and J. Edwards. 2013. Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19: 129-139.
- Pagliai, M., and N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. p. 71-82. *In: Pagliai, M., and R. Jones. (eds.). Sustainable land management environmental protection. A soil physical approach. Advances in Geocology. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.*
- Parras-Alcántara, L., L. Díaz-Jaimes, and B. Lozano-García. 2015. Organic farming affects C and N in soils under olive groves in Mediterranean areas. *Land Degradation and Development* 26: 800-806.
- Paz-Ferreiro, J., C. Trasar-Cepeda, M. Leirós, S. Seoane, y F. Gil-Sotres. 2007. Propiedades bioquímicas de suelos ácidos bajo pastizales nativos en una zona húmeda templada. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50: 537-548.
- Piccolo, A., and J. Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1801-1810.
- Pieri, C. 1992. *Fertility of Soils: A future for farming in the west African savannah.* Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pikul, J., and R. Allmaras. 1986. Physical and chemical properties of a Haploxeroll after fifty years of residue management. *Soil Science Society of America Journal* 50: 214-219.
- Powlson, D., C. Stirling, M. Jat, B. Gerard, C. Palm, P. Sanchez, and K. Cassman. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 4: 678-683.
- Rasse, D., A. Smucker, and D. Santos. 2000. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 64: 725-731.
- Rawls, W., Y. Pachepsky, J. Ritchie, T. Sobecki, and H. Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116(1-2): 61-76.
- Reynolds, W., C. Drury, C. Tan, C. Fox, and X. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume- function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Reynolds, W., X. Yang, C. Drury, T. Zhang, and C. Tan. 2003. Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science* 83(4): 318-393.
- Rodríguez, N., A. Florentino, D. Torres, H. Yendis, y F. Zamora. 2009. Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro, estado Falcón. *Revista de la Facultad de Agronomía* 26(3): 340-361
- Rusu, T. 2014. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. *International Soil and Water Conservation Research* 2:42-49.

- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores, y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie Actas INIA (Instituto de Investigación Agropecuaria) N°34. Santiago, Chile.
- Sandoval M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal, M. Mardones, y J. Celis. 2008. Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un Andisol de la Precordillera Andina Chilena. *Agrociencia* 42(2): 139-149.
- Santibáñez F., P. Santibáñez, C. Caroca, y P. González. 2017. Atlas agroclimático de Chile: Tomo III Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. Centro de Agricultura y Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- Schäffer, B., P. Boivin, and R. Schulin. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. *Soil Science Society of America Journal* 74(5): 1483-1492.
- Schoeneberger, P., D. Wysocki, and A. Benham. 2012. Field book for describing and sampling soils. Version 3.0. Natural resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 221-232.
- Seguel, O., E. Farías, W. Luzio, M. Casanova, I. Pino, and A. Parada. 2015. Physical properties of soil after change of use from native forest to vineyard. *Agrosur* 43(2): 29-39.
- Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 36(3): 287-297.
- Serme, I., K. Ouattara, B. Ouattara, and S. Taonda. 2016. Short term impact of tillage and fertility management on Lixisol structural degradation. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 4(1): 1-6.
- Serme, W., Y. Pachepsky, J. Ritchie, T. Sobecki, and H. Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116(1-2): 61-76.
- Sharma, K., J. Grace, M. Chandrika, K. Vittal, S. Singh, A. Nema, and K. Rani. 2014. Effects of soil management practices on key soil quality indicators and indices in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.))-based system in hot semi-arid inceptisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45(6): 785-809.
- Singh, A., V. Phogat, R. Dahiya, and S. Batra. 2014. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 140: 98-105.
- Sithole, L., and P. Magwaza. 2016. Mafongoya conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: A South African perspective. *Soil and Tillage Research* 162: 55-67.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Six, J., E. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32(14): 2099-2103.

- Sohail-Ijaz, S., and S. Ali. 2011. Replacing clean fallow with minimum tilled pulse legume in a subtropical dryland at Pothwar, Pakistan. *Agroscience* 45 (1): 43-53.
- Soto, L., M. Galleguillos, O. Seguel, B. Sotomayor, and A. Lara. 2019. Assessment of soil physical properties' statuses under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation* 74(1): 12-23.
- Sparling, G., L. Schipper, W. Bettjeman, and R. Hill. 2004b. Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104(3): 523-534.
- Sparling, G., W. Rijkse, H. Wilde, T. vander Weerden, M. Beare, and G. Francis. 2004a. Implementing soil quality indicators for land. Research Report for 2000-2001 and Final Report for MFE Project Number 5089. Landcare Research Contract Report: LC0102/015. Ministry for the Environment Sustainable Management Fund, New Zealand.
- Stock, O., and N. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil and Tillage Research* 99(2): 191-201.
- Tillman, R., D. Scotter, M. Wallis, and B. Clothier. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research* 27: 637-644.
- Vargas, D. 2014. Evaluación de uso del minidisco infiltrómetro para la determinación in situ de la hidrofobia de suelos. Memoria Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 59 h.
- Vasu, D., S. Singh, K. Ray, S. Duraisami, V. Tiwary, P. Chandran, and S. Anantwar, 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282: 70-79.
- Vaz, C., L. Bassoi, and J. Hopmans. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil and Tillage Research* 60: 35-42.
- Verdoodt, A. 2012. Soil Degradation: Course land degradation 2011-2012. Universiteit Gent, Belgium.
- Warrick, A. 2002. Soil physics compaction. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Wezel, A., M. Casagrande, F. Cellete, J-F. Vian, A. Ferrier, and J. Peigné. 2013. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 1-20.
- White, R. 2010. The status of soil health in the viticulture and wine industry: A review. University of Melbourne, Melbourne, Australia. Disponible en: <http://www.gwrdc.com>. (Consultado en enero de 2018).
- Wojtkowski, P. 2006. Introduction to agroecology. Principles and practices. Haworth Press, Binghamton, New York, USA.
- Zhang, H., K. Hartge, and H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Science Society of America Journal* 61: 239-245.

ANEXOS

1. Croquis de identificación de los tratamientos en el campo experimental.
Proporcionado por CERES.



2. Esquema de desarrollo de los tratamientos en campo.

2.1 Cronología del manejo y la instalación de los tratamientos:

Fecha	Manejo
Oct-14	Evaluación de la condición inicial del suelo, Subsolado de todo el campo a 0,60 m de profundidad en dos direcciones.
Mar-15	Levantamiento topográfico, curvas de nivel (equidistancia de 0,5 m).
Jun-15	Siembra de la 1ª cubierta vegetal (poáceas y fabáceas).
Oct-15	Corte de la 1ª cubierta vegetal.
Ene-16	Siembra de la 2ª cubierta vegetal (poáceas y fabáceas).
Abr-16	Corte de la 2ª cubierta vegetal.
Jun-16	Siembra de la 3ª cubierta vegetal (poáceas y fabáceas).
Nov-16	Corte de 3ª cubierta vegetal.
Ene-17	Establecimiento del diseño agroecológico por subsitios.

2.2 Composición vegetal de los tratamientos

Tratamiento	Especie Frutal	Cultivo de cobertura
T0	Palto (<i>Persea americana</i> Mill.)	Sin cobertura
1-S	Frutales de bajo requerimiento hídrico: higuera (<i>Ficus carica</i> L.), tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill.), granado (<i>Punica granatum</i> L.), vid (<i>Vitis sp.</i>)	Avena (<i>Avena sativa</i> L.), centeno (<i>Secale cereale</i> (L.) M.Bieb.), vicia (<i>Vicia sativa</i> L.), 4 especies de trébol subterráneo, trébol balanza y hualputra (<i>Medicago polymorpha</i> L.).
2-N	Frutales de alta tolerancia al estrés hídrico: almendro (<i>Prunus dulcis</i> Mill).	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.), achicoria (<i>Sichorium intibus</i> L.)
4-S	Almendro (<i>Prunus dulcis</i> Mill), <i>Prunus comunis</i> L., manzano (<i>Malus pumila</i> L.), castaño (<i>Castanea sativa</i> Mill.), nogal (<i>Juglans regia</i> L.)	Anuales [arveja (<i>Pisum sp.</i>), haba (<i>Vicia faba</i> L.), avena (<i>A. sativa</i> L.)], <i>Perennes</i> [festuca (<i>Festuca sp.</i>), trébol blanco (<i>Trifolium repens</i> L.), trébol rosado (<i>Trifolium pratense</i> L.), achicoria (<i>Sichorium intibus</i> L.), siete venas (<i>Plantago lanceolata</i> L.)]
4-N	Cerezo (<i>Prunus avium</i> L.), ciruelo chino (<i>Prunus salicina</i> L.), ciruelo (<i>Prunus domestica</i> L.), albaricoque (<i>Prunus armeniaca</i> L.), cerezo ácido (<i>Prunus cerasus</i> L).	Hortalizas y flores

3. Interpretación de algunas propiedades físicas de los suelos

3.1 Clasificación de la MOS en función de la textura y de clima templado (Castellanos *et al.*, 2000).

Grupo textural	Materia orgánica (%)						
	Muy baja	Baja	Mod. Baja	Media	Mod. Alta	Alta	muy Alta
Fino	< 1,00	1,01-1,50	1,51-2,00	2,01-2,50	2,51-3,20	3,21-4,20	> 4,21
Medio	< 0,80	0,81-1,20	1,21-1,80	1,81-2,30	2,31-3,00	3,01-4,00	> 4,01
Grueso	< 0,50	0,51-0,80	0,81-1,20	1,21-1,60	1,61-2,00	2,01-3,00	> 3,00

Grupo textural fino: arcillosa, arcillo limosa y arcillo arenosa; Grupo textural medio: franco arcillo limosa, franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco limosa, franco arenosa y franca; Grupo textural grueso: areno francosa y arenosa.

3.2 Comportamiento del suelo en función al índice de repelencia al agua (Tillman *et al.*, 1989).

R (-)	Comportamiento del suelo
< 1,95	Suelo humectable
> 1,95	Suelo repelente

3.3 Clasificación de la densidad aparente por cilindro y terrón para suelos francos (Sandoval *et al.*, 2012).

Clase textural	Dac (Mg m ⁻³)	Dat (Mg m ⁻³)
Franca	1,23	1,39
Franco arenosa	1,36	1,50
Franco arcillo arenosa	1,29	1,51
Franco arcillosa	1,37	1,87

3.4 Densidad aparente por cilindro para suelos de clase textural franca en función del grado de compactación (Adaptado de Hunt y Gilkes, 1992; Hazelton y Murphy, 2016).

Dac (Mg m ⁻³)	Interpretación
< 1	Adecuada
1,0 - 1,2	Adecuada
1,2 - 1,4	Adecuada
1,4 - 1,6	Algo compactado
1,6 - 1,8	Muy compactado
> 1,8	Extremadamente compactado

3.5 Clasificación de la compresibilidad según el límite de líquido y el índice de plasticidad (Adaptado de Hazelton y Murphy, 2016).

LL (%)	IP (%)	Grado de compresibilidad
< 45	< 25	Bajo
45 - 55	25 - 35	Medio
55-75	35 - 45	Alto
> 75	> 45	Muy alto

3.6 Clasificación de la resistencia a la penetración medida a capacidad de campo (Adaptado de Cass, 1999; Hazelton y Murphy, 2016).

Resistencia a la penetración (N)	Grado de compactación	Efecto en el crecimiento de las raíces
< 50	Suelto	No afectado
50 – 125	Medio	Las raíces de algunos cereales pueden ser afectadas.
125 – 200	Denso	Las raíces de los cereales son gravemente afectadas.
200 – 300	Muy denso	Muy pocas raíces penetran el suelo
> 300	Extremad. denso	Cesa el crecimiento de las raíces

3.7 Clasificación de la conductividad hidráulica saturada (Adaptado de Hunt y Gilkes, 1992; Hazelton y Murphy, 2016).

Ks (cm h ⁻¹)	Calificación	Interpretación
< 0,04	Extremad. lenta	Rápida acumulación de agua en el suelo y generación de escorrentía, susceptibilidad por anoxia en especie con raíces poco profundas.
0,04 - 0,13	Muy lenta	
0,13 - 0,50	Lenta	La infiltración deficiente puede generar escorrentía y erosión en pendientes. Considerar en la selección del tipo de riego.
0,50 - 2,00	Moderad. lenta	
2,00 - 6,20	Moderada	Sin problemas, excepto en pendientes muy empinadas donde se produciría erosión. Suelo adecuado para cualquier tipo de riego.
6,20 - 12,50	Moderad. rápida	
12,5 - 25,00	Rápida	Sin problemas, excepto en pendientes muy empinadas donde se produciría erosión. El suelo puede presentar problemas de contaminación de aguas subterráneas.
> 25,00	Muy rápida	

3.8 Clasificación de la porosidad total (Flores y Alcalá, 2010).

Porosidad total (%)	Interpretación
<30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
>60	Muy alta

3.9 Clasificación de los poros de agua útil (Reynolds *et al.*, 2009).

PAU (%)	Crecimiento y funcionamiento de la raíz
≥ 20	Ideal
15 ≤ PAU < 20	Bueno
10 ≤ PAU < 15	Limitado
≤ 10	Pobre

3.10 Clasificación de la estabilidad estructural del suelo (Pieri, 1992).

SSI (%)	Estabilidad estructural
> 9	Estable estructuralmente.
$7 < SSI \leq 9$	Bajo riesgo de degradación estructural.
$5 < SSI \leq 7$	Alto riesgo de degradación estructural.
≤ 5	Suelo estructuralmente degradado.

3.11 Clasificación cualitativa de los depósitos granulares del suelo en función de la densidad relativa (Adaptado de Das, 2013).

Rd (%)	Descripción del depósito de suelo
0 - 0,15	Muy suelto
0,15 - 0,50	Suelto
0,50 - 0,70	Medio
0,70 - 0,85	Denso
0,85 - 1,00	Muy denso

APÉNDICES

1. Resultados del análisis de componentes principales (CP) para los dos primeros componentes y a tres profundidades.

Profundidad (cm)	0 - 20		20 - 40		40 - 60	
Componente	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
Autovalor	8,10	5,52	6,58	5,39	7,23	5,04
Porcentaje de varianza (%)	32,40	22,00	26,30	21,60	28,90	20,20
Varianza total (%)	54,40		47,90		49,10	
Variables	Autovector					
a	0,29	-0,04	0,21	0,32	0,05	0,41
L	-0,27	0,06	-0,11	-0,34	-0,01	-0,38
A	-0,18	0,01	-0,25	-0,19	-0,09	-0,35
Dr	-0,01	0,20	0,14	-0,07	0,02	-0,02
Dac	0,19	0,33	0,36	0,04	0,33	0,14
Dat	0,21	0,12	0,15	0,10	-0,01	0,02
RD	-0,22	0,03	0,08	-0,20	0,19	-0,03
VDMA	-0,06	0,28	0,30	-0,13	0,14	-0,04
MOS	0,21	-0,12	-0,17	0,29	-0,28	0,05
Θ_{33}	0,02	0,38	0,27	-0,11	0,26	-0,24
Θ_{1500}	0,22	0,29	0,25	0,08	0,26	-0,08
AU	-0,29	0,06	0,12	-0,19	0,14	-0,26
PDR	-0,19	-0,29	-0,36	0,12	-0,29	0,02
PDL	-0,15	-0,18	-0,20	-0,11	-0,01	-0,32
Ks 1	0,23	-0,23	-0,09	0,35	-0,22	0,20
Ks 5	0,21	-0,22	0,01	0,32	-0,22	0,20
R	0,11	-0,31	-0,12	0,07	-0,09	0,02
Rp	0,28	0,13	0,30	0,14	0,24	0,18
LP	0,28	-0,11	-0,05	0,29	-0,25	-0,13
LL	0,19	-0,21	0,11	0,11	0,08	0,05
IP	0,04	0,18	-0,17	0,10	-0,25	-0,14
SSI	0,25	-0,12	-0,06	0,38	-0,15	0,36
S _M	0,04	-0,19	-0,23	0,04	-0,30	-0,10
P	-0,19	-0,14	-0,16	-0,09	-0,21	-0,09
Rd	0,20	0,14	0,17	0,10	0,22	0,11

a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; MOS: materia orgánica; Θ_{33} : contenido de agua a 33 kPa; Θ_{1500} : contenido de agua a 1500 kPa; AU: agua útil; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; R: índice de repelencia al agua; Rp: resistencia a la penetración; LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; SSI: índice de estabilidad estructural; S_M: porosidad entre agregados; P: porosidad total; Rd: densidad relativa.

2. Matriz de correlación de Pearson para las propiedades evaluadas a la profundidad de 0 a 20 cm.

	a	L	A	Dr	Dac	Dat	RD	VDMA	MOS	Ø33	Ø1500	AU	PDR	PDL	Ks 1	Ks 5	R	Rp	LP	LL	IP	SSI	S _M	P	Rd	
a																										
L	-0,69**																									
A	-0,81**	0,13																								
Dr	-0,05	0,3	-0,17																							
Dac	0,38	-0,25	-0,32	0,35																						
Dat	0,41	-0,56*	-0,11	0,11	0,54*																					
RD	-0,26	0,46*	-0,01	0,02	-0,27	-0,49*																				
VDMA	-0,03	0,22	-0,14	0,27	0,33	-0,08	0,2																			
MOS	0,59*	-0,43	-0,46*	0,09	0,1	0,07	-0,3	-0,15																		
Ø33	-0,07	0,15	-0,02	0,60**	0,73**	0,22	0,03	0,44	-0,15																	
Ø1500	0,35	-0,33	-0,21	0,42	0,82**	0,48*	-0,37	0,24	0,21	0,74**																
AU	-0,60**	0,67**	0,28	0,15	-0,29	-0,42	0,57*	0,19	-0,48*	0,18	-0,54*															
PDR	-0,37	0,23	0,32	-0,21	-0,79**	-0,37	0,18	-0,29	-0,11	-0,67**	-0,81**	0,35														
PDL	-0,29	0,19	0,25	-0,49*	-0,47*	-0,37	0,23	-0,24	0,05	-0,47*	-0,61**	0,3	0,51*													
Ks 1	0,48*	-0,48*	-0,27	-0,15	-0,07	0,1	-0,18	-0,33	0,28	-0,36	-0,06	-0,36	0,05	-0,39												
Ks 5	0,3	-0,25	-0,22	0,3	0,29	0,05	-0,09	-0,03	0,06	0,42	0,59*	-0,34	-0,60**	-0,65**	0,3											
R	0,23	-0,1	-0,23	-0,21	-0,34	-0,19	-0,31	-0,57*	0,50*	-0,54*	-0,23	-0,34	0,26	0,18	0,25	-0,03										
Rp	0,54*	-0,60**	-0,25	0,12	0,70**	0,63**	-0,68**	-0,08	0,33	0,27	0,68**	-0,65**	-0,62**	-0,34	0,17	0,3	0,03									
LP	0,65**	-0,55*	-0,44	0,12	0,27	0,21	-0,47*	-0,3	0,75**	-0,1	0,34	-0,62**	-0,22	-0,29	0,49*	0,32	0,61**	0,49*								
LL	0,56*	-0,24	-0,57*	-0,16	0,06	-0,12	-0,19	-0,49*	0,52*	-0,29	0,05	-0,43	-0,02	-0,04	0,48*	0,23	0,70**	0,19	0,72**							
IP	-0,05	-0,29	0,31	0,36	0,23	0,42	-0,26	0,36	0,12	0,3	0,32	-0,1	-0,23	-0,28	-0,13	0,04	-0,29	0,29	0,13	-0,60**						
SSI	0,76**	-0,55*	-0,60**	0,03	0,17	0,17	-0,3	-0,14	0,97**	-0,15	0,24	-0,54*	-0,19	-0,03	0,39	0,12	0,46*	0,4	0,78**	0,58*	0,07					
S _M	0,08	-0,38	0,2	-0,27	-0,37	0,57*	-0,32	-0,44	-0,02	-0,47*	-0,26	-0,21	0,35	0,11	0,13	-0,25	0,14	0,04	-0,04	-0,17	0,19	0,02				
P	-0,42	0,47*	0,19	0,47*	-0,66**	-0,42	0,25	-0,08	-0,03	-0,2	-0,42	0,37	0,56*	0,05	-0,07	-0,03	0,14	-0,54*	-0,17	-0,2	0,09	-0,14	0,14			
Rd	0,4	-0,49*	-0,15	-0,47*	0,66**	0,45*	-0,28	0,07	0,04	0,2	0,45	-0,4	-0,56*	-0,03	0,03	0,02	-0,15	0,58*	0,17	0,17	-0,05	0,14	-0,11	-0,99**		

N = 20, *, ** Significancia de p = 0,05 y 0,01 respectivamente. a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; MOS: materia orgánica; Ø33: contenido de agua a 33 kPa; Ø1500: contenido de agua a 1500 kPa; AU: agua útil; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; R: índice de repelencia al agua; Rp: resistencia a la penetración; LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; SSI: índice de estabilidad estructural; S_M: porosidad entre agregados; P: porosidad total; Rd: densidad relativa.

3. Matriz de correlación de Pearson para las propiedades evaluadas a la profundidad de 20 a 40 cm.

	a	L	A	Dr	Dac	Dat	RD	VDMA	MOS	Θ33	Θ1500	AU	PDR	PDL	Ks 1	Ks 5	R	Rp	LP	LL	IP	SSI	S _M	P	Rd	
a																										
L	-0,86**																									
A	-0,80**	0,38																								
Dr	0,12	0,14	-0,37																							
Dac	0,58*	-0,38	-0,60*	0,24																						
Dat	0,44	-0,41	-0,31	0,4	0,34																					
RD	-0,2	0,21	0,11	0,06	0,2	-0,06																				
VDMA	0,18	0,12	-0,46*	0,33	0,59*	0,11	0,4																			
MOS	0,25	-0,26	-0,15	-0,27	-0,29	-0,31	-0,33	-0,50*																		
Θ33	0,1	0,14	-0,35	0,43	0,49*	0,22	0,11	0,71**	-0,39																	
Θ1500	0,36	-0,3	-0,29	0,45*	0,50*	0,41	-0,06	0,44	-0,37	0,51*																
AU	-0,15	0,38	-0,19	0,16	0,2	-0,05	0,17	0,50*	-0,18	0,77**	-0,15															
PDR	-0,25	0,04	0,4	-0,34	-0,85**	-0,28	-0,37	-0,73**	0,58*	-0,71**	-0,58*	-0,39														
PDL	-0,55*	0,45	0,48*	-0,50*	-0,47*	-0,59*	0,07	-0,23	0,06	-0,34	-0,34	-0,14	0,37													
Ks 1	0,34	-0,46*	-0,08	-0,45	-0,04	-0,06	-0,2	-0,09	0,52*	-0,12	0,12	-0,23	0,29	0,16												
Ks 5	0,42	-0,46*	-0,22	-0,28	0,11	0,05	-0,2	0,02	0,34	0,05	0,31	-0,17	0,08	0,22	0,89**											
R	-0,02	0,18	-0,16	-0,01	-0,22	-0,18	-0,04	-0,02	0,44	-0,2	-0,39	0,06	0,36	-0,03	0,12	-0,03										
Rp	0,63**	-0,50*	-0,56*	0,31	0,66**	0,37	-0,17	0,48*	-0,31	0,38	0,75**	-0,11	-0,60**	-0,52*	0,05	0,21	-0,3									
LP	0,24	-0,2	-0,2	0,09	-0,13	0,0	-0,35	-0,17	0,64**	0,0	0,23	-0,17	0,28	-0,13	0,58*	0,56*	0,37	0,14								
LL	0,17	0,1	-0,42	0,11	0,3	0,02	-0,02	0,17	0,35	0,12	0,16	0,02	-0,21	0,01	0,18	0,24	0,11	0,16	0,53*							
IP	-0,01	-0,27	0,33	-0,06	-0,45	-0,02	-0,24	-0,34	0,09	-0,15	-0,02	-0,16	0,46*	-0,11	0,24	0,16	0,16	-0,07	0,16	-0,75**						
SSI	0,65**	-0,63**	-0,45	-0,14	-0,01	-0,02	-0,34	-0,36	0,89**	-0,31	-0,15	-0,25	0,4	-0,2	0,56*	0,45	0,31	0,01	0,57*	0,26	0,14					
S _M	-0,21	0,05	0,33	0,07	-0,70**	0,43	-0,25	-0,49*	0,05	-0,31	-0,15	-0,24	0,60**	0,0	-0,01	-0,08	0,06	-0,33	0,14	-0,26	0,41	0,0				
P	-0,36	0,41	0,17	0,65**	-0,58*	0,08	-0,13	-0,18	-0,01	-0,01	0,02	-0,02	0,37	-0,06	-0,35	-0,33	0,14	-0,23	0,18	-0,14	0,3	-0,13	0,62**			
Rd	0,38	-0,43	-0,18	-0,64**	0,58*	-0,05	0,09	0,17	0,0	0,02	0,01	0,02	-0,38	0,05	0,36	0,34	-0,16	0,26	-0,17	0,14	-0,3	0,13	-0,60**	-1,00**		

N = 20, *, ** Significancia de p = 0,05 y 0,01 respectivamente. a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; MOS: materia orgánica; Θ33: contenido de agua a 33 kPa; Θ1500: contenido de agua a 1500 kPa; AU: agua útil; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; R: índice de repelencia al agua; Rp: resistencia a la penetración; LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; SSI: índice de estabilidad estructural; S_M: porosidad entre agregados; P: porosidad total; Rd: densidad relativa.

4. Matriz de correlación de Pearson para las propiedades evaluadas a la profundidad de 40 a 60 cm.

	a	L	A	Dr	Dac	Dat	RD	VDMA	MOS	Θ33	Θ1500	AU	PDR	PDL	Ks 1	Ks 5	R	Rp	LP	LL	IP	SSI	S _M	P	Rd	
a																										
L	-0,92**																									
A	-0,87**	0,60**																								
Dr	0,21	-0,19	-0,19																							
Dac	0,35	-0,23	-0,43	-0,09																						
Dat	0,1	-0,21	0,05	0,1	0,1																					
RD	0,01	-0,03	0,02	0,19	0,48*	0,34																				
VDMA	-0,03	0,19	-0,17	0,15	0,35	0,16	-0,02																			
MOS	-0,11	0,08	0,11	-0,17	-0,64**	-0,09	-0,64**	0,05																		
Θ33	-0,3	0,32	0,19	0,2	0,43	-0,02	0,18	0,36	-0,57*																	
Θ1500	-0,14	0,12	0,14	0,13	0,63**	-0,01	0,28	0,38	-0,41	0,68**																
AU	-0,29	0,34	0,15	0,17	0,06	-0,02	0,01	0,19	-0,44	0,80**	0,11															
PDR	-0,09	0,07	0,1	0,05	-0,75**	-0,03	-0,17	-0,24	0,58*	-0,72**	-0,63*	-0,47*														
PDL	-0,60**	0,58*	0,49*	-0,18	-0,25	-0,17	-0,07	-0,06	-0,06	0,39	0,07	0,48*	-0,09													
Ks 1	0,26	-0,4	-0,03	-0,2	-0,05	0,26	0,17	-0,58*	0,07	-0,67**	-0,28	-0,68**	0,24	-0,46*												
Ks 5	0,32	-0,45	-0,09	-0,22	-0,03	0,29	0,18	-0,56*	0,06	-0,69**	-0,36	-0,64**	0,24	-0,50*	0,99**											
R	-0,05	-0,03	0,14	-0,29	-0,18	0,07	-0,3	0,23	0,46*	-0,08	-0,11	-0,03	0,13	0,0	-0,12	-0,11										
Rp	0,48*	-0,4	-0,47*	0,09	0,61**	0,03	0,33	0,24	-0,34	0,3	0,47*	0,02	-0,33	-0,24	-0,16	-0,15	0,04									
LP	-0,4	0,33	0,39	-0,03	-0,67**	-0,12	-0,44	0,01	0,69**	-0,28	-0,23	-0,19	0,52*	0,18	-0,08	-0,12	0,44	-0,47*								
LL	0,12	-0,05	-0,17	0,17	0,08	-0,44	-0,07	0,37	0,17	0,1	0,24	-0,06	0,03	-0,16	-0,3	-0,31	0,27	0,24	0,28							
IP	-0,4	0,29	0,44	-0,18	-0,57*	0,31	-0,26	-0,33	0,36	-0,3	-0,4	-0,09	0,36	0,28	0,21	0,2	0,08	-0,57*	0,48*	-0,71**						
SSI	0,72**	-0,70**	-0,58*	0,04	-0,16	0,05	-0,38	-0,04	0,58*	-0,66**	-0,4	-0,58*	0,35	-0,51*	0,31	0,34	0,26	0,17	0,11	0,2	-0,1					
S _M	-0,23	0,06	0,4	0,14	-0,81**	0,50*	-0,22	-0,22	0,50*	-0,39	-0,55*	-0,09	0,64**	0,11	0,2	0,2	0,18	-0,49*	0,50*	-0,34	0,68**	0,18				
P	-0,07	0,0	0,13	0,73**	-0,74**	-0,04	-0,21	-0,17	0,31	-0,16	-0,35	0,06	0,55*	0,02	-0,09	-0,12	-0,07	-0,32	0,42	0,08	0,24	0,15	0,61**			
Rd	0,11	-0,04	-0,17	-0,72**	0,76**	0,0	0,22	0,13	-0,33	0,15	0,34	-0,07	-0,55*	-0,07	0,11	0,14	0,07	0,36	-0,48*	-0,06	-0,3	-0,13	-0,65**	-0,99**		

N = 20, *, ** Significancia de p = 0,05 y 0,01 respectivamente. a: arena; L: limo; A: arcilla; Dr: densidad real; Dac: densidad aparente cilindro; Dat: densidad aparente terrón; RD: relación de dispersión; VDMA: variación del diámetro medio ponderado; MOS: materia orgánica; Θ33: contenido de agua a 33 kPa; Θ1500: contenido de agua a 1500 kPa; AU: agua útil; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; Ks 1: conductividad hidráulica a 1 h; Ks 5: conductividad hidráulica a 5 h; R: índice de repelencia al agua; Rp: resistencia a la penetración; LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; SSI: índice de estabilidad estructural; S_M: porosidad entre agregados; P: porosidad total; Rd: densidad relativa.

5. Descripción del perfil del suelo para los manejos agroecológicos y testigo.

Tratamiento: T-0

Profundidad (cm)	Descripción
0-10	Pardo muy oscuro (10YR 2/2); franca; granular media a fina fuerte; no plástica y ligeramente adhesiva; raíces muy finas y finas abundantes, medias pocas; poros finos a medios abundantes; gravas sub -redondeadas comunes; límite lineal abrupto. Observación: Alta actividad biológica.
10-30	Pardo oscuro (10YR 3/3); franca; bloques subangulares medios a finos débiles; moderadamente plástica y moderadamente adhesiva; raíces muy finas abundantes, finas pocas, medias y gruesas comunes; poros medios y gruesos abundantes, finos y muy finos comunes; gravas finas y muy finas (30%); límite quebrado. Observación: Alta actividad biológica, estrata de grava (matriz arenosa con abundante grava).
30-60	Pardo oscuro (10YR 3/3); franca arenosa; bloques angulares medios débiles; ligeramente plástica y moderadamente adhesiva; raíces medias pocas; poros finos y muy finos comunes; poros medios y gruesos abundantes; 20 % de grava. Observación: Presencia de lentes de arena.

Tratamiento: 1-S

Profundidad (cm)	Descripción
0-16	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/3); franca; bloques angulares medios a finos débiles que rompen a granular fino; ligeramente plástica, ligeramente adhesiva y firme en seco; raíces finas abundantes; poros finos abundantes; gravas angulares finas y medias abundantes (20 – 30%); límite lineal claro. Observación: En la parte superior tiende a ser de estructura granular.
16-45	Pardo oscuro (7,5YR 3/3); franca; bloques subangulares medios y finos moderados; muy plástica; muy adhesiva; raíces finas comunes; poros finos abundantes; gravas angulares medias y finas comunes (40 %); límite lineal claro.
46-60	Pardo oscuro (7,5YR 3/4); franco arcillo arenosa; bloques angulares finos débiles; ligeramente plástica; no adhesiva; raíces finas comunes; poros finos abundantes; gravas medias y gruesas comunes.

Tratamiento: 2-N

Profundidad (cm)	Descripción
0-30	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/3); franco arcillosa; bloques subangulares de finos a medios moderados; ligeramente plástica; ligeramente adhesiva; raíces muy finas comunes, finas comunes, medias y gruesas pocas; poros muy finos y finos abundantes; límite lineal claro.
30-60	Pardo fuerte (7,5YR 3/3); franco arcillosa; masiva; ligeramente plástica; no adhesiva; raíces finas, medias y gruesas pocas; poros muy finos y finos abundantes; gravas finas pocas (< 5%).

Tratamiento: 4-S

Profundidad (cm)	Descripción
0-45	Pardo oscuro (7,5YR 3/3); franca; bloques subangulares medios débiles; ligeramente plástica y ligeramente adhesiva; raíces muy finas y finas abundantes y medias pocas; poros muy finos y finos abundantes, medios pocos; gravas finas y medias pocas; límite lineal claro. Observación: Estructura granular a los primeros 5 cm.
45-60	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/2); franca; masiva; ligeramente plástica; ligeramente adhesiva; raíces finas comunes; poros finos y medios abundantes; grava fina poca.

Tratamiento: 4-N

Profundidad (cm)	Descripción
0-45	Pardo oscuro (7,5YR 3/3); franca; bloques subangulares medios débiles; ligeramente plástica; ligeramente adhesiva; raíces muy finas, finas abundantes y medias pocas; poros muy finos y finos abundantes, medios pocos; gravas finas y medias pocas; límite lineal claro. Observación: Estructura granular a los primeros 5 cm.
45-60	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/2); franca; masiva; ligeramente plástica y ligeramente adhesiva; raíces finas comunes; poros finos y medios abundantes; gravas finas pocas.