



Variación temporal de la resistencia mecánica y contenido de humedad de un Eutric Fulvudands después de la incorporación de rastrojo de Avena (*Avena sativa*), un estudio de caso

Temporal variation of mechanical strength and moisture content of a Eutric Fulvudands after incorporation of oat (*Avena sativa*) stubble, a case study

Bustos, T.^a, Dec, D.^{a,b}, Valle, S.^{a,b}, Clunes, J.^{a,b}, Dörner, J.^{a,b*}

^a Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

^b Centro de Investigación en Suelos Volcánicos, Universidad Austral de Chile.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 02.11.2021
Accepted 03.03.2022

Keywords:

Penetration resistance
Soil water content
Precompression stress
Stubble
Soil tillage

Original Research Article,
Soil Science

*Corresponding author:

José Dörner
E-mail address:
josedorner@uach.cl

ABSTRACT

Cereal production generates a large volume of stubble that is generally disposed of due to the cost and difficulty of management. However, sustainable management is possible through the incorporation of stubble into the soil. The objective of this study was to evaluate the effect of successive stubble incorporations on mechanical strength and moisture content in an Andisol, using three different incorporation methods: Tines (P), Discs (D), Alternating legs and double discs (PD) and a Control (CT). During the 2018-2019 post-harvest and pre-planting period, three plots of 1 ha were established for P, D and PD; and one of 0.25 ha without incorporation (CT). Penetration resistance (PR), volumetric water content (θ_{vol}) and precompression stress (Pc) were measured. Undisturbed samples were collected before incorporation and after each incorporation, with a rest period for the soils between 30–45 days between samplings. Both PR and θ_{vol} decreased due to the effect of stubble incorporation, exhibiting values lower than CT; however, no differential effect of the use of the different methods of stubble incorporation on soil properties was observed. In treatment D, an increase in PR was observed at 20 cm depth, as well as maximum Pc values at the end of the period analyzed.

RESUMEN

La producción de cereales genera un gran volumen de rastrojos que, generalmente, son eliminados debido al costo y la dificultad del manejo. Sin embargo, es posible realizar manejos sustentables a través de la incorporación del rastrojo en el suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de incorporaciones sucesivas de rastrojos sobre la resistencia mecánica y contenido de humedad en un Andisol, utilizando tres métodos de incorporación mecanizada: Púas (P), Discos (D), Patas y Doble Discos Alternados (PD) y un Control (CT). Durante el periodo de post cosecha y pre siembra 2018-2019, se establecieron tres parcelas de 1 ha para P, D y PD; y una de 0,25 ha sin incorporación (CT). Se midió resistencia a la penetración (RP), contenido volumétrico de agua (θ_{vol}) y valor de precompresión (Pc). Se recolectaron muestras sin disturbar antes de incorporar y posterior a cada incorporación, con un periodo de descanso para los suelos entre 30–45 días entre muestreos. Tanto RP y θ_{vol} disminuyeron por el efecto de la incorporación de rastrojos, presentando valores más bajos que CT; sin embargo, no se observó un efecto diferencial del uso de los distintos métodos de incorporación de rastrojo sobre las propiedades del suelo. En el tratamiento D, se observó un aumento de la RP a 20 cm de profundidad, así como valores máximos de Pc al final del periodo analizado.

Palabras Clave: Resistencia a la penetración, contenido de agua del suelo, capacidad de soporte, rastrojo, labranza de suelo.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población a nivel mundial genera una mayor demanda de alimento. Para suplir esta demanda es necesario aumentar la producción y rendimiento de los cultivos. En este sentido, los cereales constituyen la principal fuente de alimentación en el mundo (FAO, 2019). Sin embargo, un incremento en la

producción de cereales implica un aumento de los residuos post cosecha (tallo o caña del cultivo y las hojas) conocidos como rastrojo o paja (Ruiz, 2015).

La quema de rastrojo es una solución señalada por los productores frente a los altos costos de su manejo, la compleja extracción de los residuos y las enfermedades ligadas al rastrojo (Crovetto, 1992; Madariaga, 2003). Sin embargo, una quema continua de rastrojos

durante un periodo prolongado reduce el contenido de materia orgánica del suelo (Cong *et al.*, 2020), aporta gases de efecto invernadero a la atmósfera (Lenka *et al.*, 2014) y deja el suelo descubierto, afectando negativamente sus propiedades hidráulicas y mecánicas (Roper *et al.*, 2021).

Existen manejos alternativos a la quema de los residuos de la producción de cereales como son la cero labranza o la incorporación de los residuos (Cong *et al.*, 2020). La incorporación de residuos genera beneficios en las propiedades físicas del suelo (Tiessen *et al.*, 1994; Zagal *et al.*, 2010): reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad total y la macroporosidad, la infiltración y retención de agua en el suelo (Pituello *et al.*, 2016; Kumari *et al.*, 2018).

La Macrozona sur de Chile se caracteriza por presentar un gran porcentaje de suelos derivados de cenizas volcánicas, tal que, constituyen cerca del 60% de los suelos arables en Chile (Besoain, 1985). Estos suelos, que se denominan Andisoles, se caracterizan por poseer una alta retención de fósforo (85%), abundante contenido de hierro ($Al_0 + 1/2 Fe_0 \geq 2,0\%$) y una baja densidad aparente ($< 0,90 \text{ g cm}^{-3}$) (USDA-NRCS, 2010). La baja densidad aparente asociada a una alta porosidad y la microagregación, proporciona una gran capacidad para sustentar diferentes manejos (Ellies, 1988; Salas *et al.*, 2016). De esta manera, un mayor tráfico de maquinaria, la frecuencia con la que se realiza la labranza y tipo de gestión agrícola, generan cambios físicos cualitativos y cuantitativos que resultan en el deterioro de la estructura del suelo (Ellies, 1995). Este efecto negativo en la estructura del suelo afecta la morfología de los poros, principalmente la pérdida de la porosidad gruesa traduciéndose en la disminución de la aireación e infiltración del agua, pero en un incremento de poros de almacenamiento de agua (Seguel *et al.*, 2002). Además, un labranza convencional y frecuente provoca una disminución en los contenidos de materia orgánica, y un aumento en la capacidad de soporte y cohesión estructural (Ellies, 1995; Seguel *et al.*, 2002). Estos cambios estructurales se ven reflejados en la resistencia a la penetración y la cohesión interna del suelo (torsión), asociados a un aumento en cohesión y densidad aparente por efectos del uso del suelo (Dörner *et al.*, 2009).

Debido a los altos niveles de productividad de los cereales en el Sur de Chile (Mera *et al.*, 2015), y, por ende, la gran producción de residuos resulta relevante evaluar el efecto del uso de diferentes tipos de incorporadoras (con distinto peso y forma de incorporación) en un rastrojo de avena durante el periodo de pre-siembra en suelos volcánicos. El volumen de rastrojo a incorporar implica que los procedimientos de incorporación se deben repetir durante la pre-siembra. Por lo tanto, ese plantea como hipótesis que el uso de una incorporadora de rastrojo más liviana, con una intervención más superficial sobre el suelo, alterará en un

menor grado la estructura del suelo y con ello su resistencia mecánica. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto y variación temporal de propiedades mecánicas y contenido de agua del suelo por la incorporación de rastrojo de avena con tres métodos diferentes de incorporación mecanizada del rastrojo.

MATERIAL Y MÉTODO

Sitio e historial de manejo

El ensayo se realizó en un predio de la empresa Semillas SEK ubicado en la zona de Pelchuquín a 18 km de la ciudad de Valdivia ($39^{\circ}41'52.93''\text{S}$; $73^{\circ}6'34.18''\text{O}$). El sitio en estudio consta de una superficie total de 60 ha actualmente destinadas a la producción de semillas de Avena (*Avena sativa* L.) variedad URANO-INIA caracterizada por presentar una altura de 120-150 cm con caña débil y moderadamente resistente a la tendadura, con un rendimiento de siembra primaveral de 6,62 ton ha^{-1} e invernal de 7,38 ton ha^{-1} (Berato *et al.*, 1994). El 50% de la superficie total ha sido manejada durante los últimos 15-20 años de forma consecutiva con la incorporación total o parcial de los rastrojos generados por la producción de distintos cereales del mismo sitio donde se estableció el ensayo. En la mitad restante del predio se ha realizado un manejo convencional en base a retiro de rastrojo como bolos, quema, uso de herbicidas principalmente, debido a las limitaciones físicas de relieve.

El suelo corresponde a la Serie Pelchuquín miembro de la Familia media, mélica de los Eutric Fulvudands (Andisol), caracterizado por ser un suelo profundo y bien drenado, de textura franco limosa, con contenidos de carbono orgánico en superficie del 12% disminuyendo en profundidad y una densidad aparente de 0,7 g cm^{-3} en superficie (CIREN, 2003). La topografía del lugar es casi plana con una pendiente de 1 al 3% y otras zonas con lomajes suaves.

El clima es templado lluvioso con influencia mediterránea (Di Castri y Hajek, 1976). La estación meteorológica Isla Teja, localizada en la ciudad de Valdivia (25 m s.n.m.) a 18 km de distancia del ensayo, registra una temperatura promedio anual de 12,0 °C (promedio de enero = 17,0 °C, promedio de julio = 7,6 °C) y una precipitación promedio anual de 2.280 mm. La lluvia está concentrada en invierno, desde mayo hasta agosto (62%), y decrece fuertemente en verano, entre enero y marzo (9%) (Figura 1).

Establecimiento de parcelas

Se utilizó un bastón agrológico para determinar la homogeneidad del sector donde se realizó en el ensayo, en función de la profundidad efectiva y variabilidad morfológica del suelo. Posterior a esto y para facilitar las labranzas con la maquinaria, se sectorizó en tres gran-

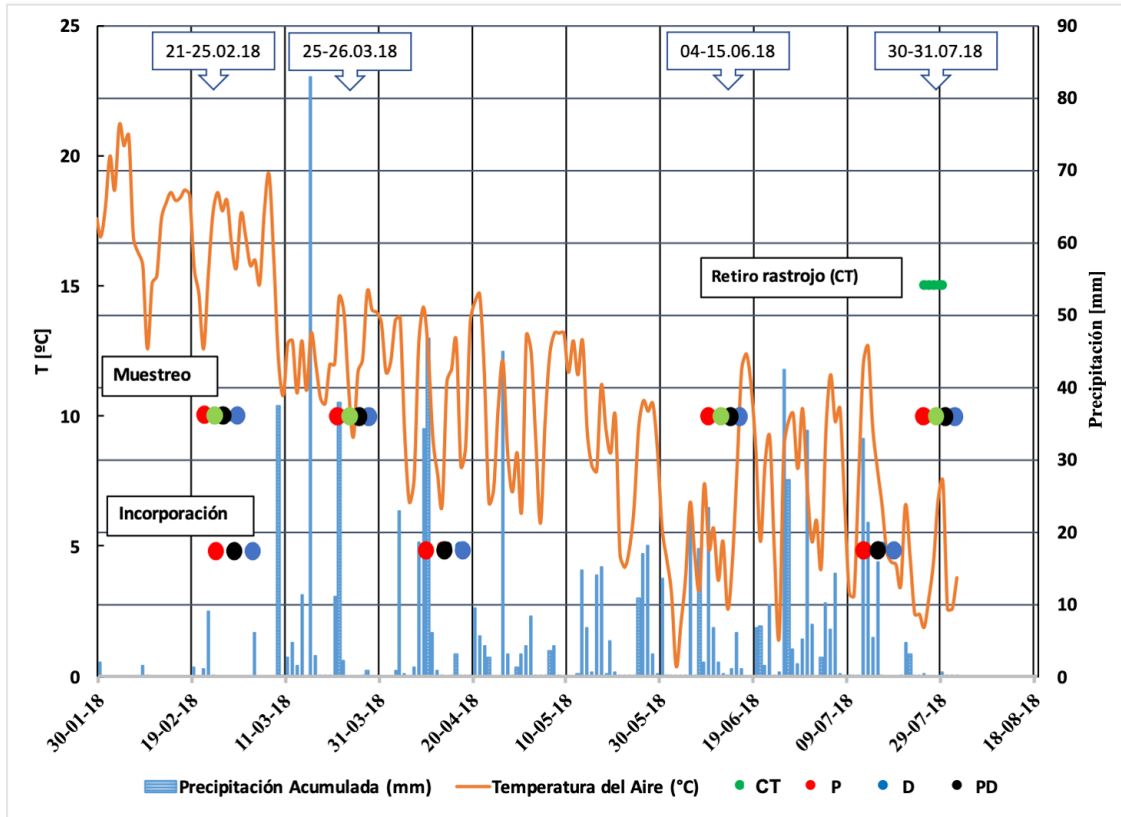


Figura 1. Precipitaciones y temperatura diaria de Valdivia durante el periodo del ensayo. Círculos con distintos colores destacan las fechas de labranza (incorporación), retiro de rastrojo en control y muestreos de suelo en el ensayo. Control (CT) en verde, Púas (P) en rojo, Discos (D) en azul, Patas y doble disco alternado (PD) en negro.

Figure 1. Daily rainfall and temperature in Valdivia during the experiment. Circles with different colours highlight the dates of tillage, stubble removal in control and soil sampling in the trial. Control (CT) in green, Tines (P) in red, Discs (D) in blue, Alternate legs and double disc (PD) in black.

des zonas utilizando como división entre ellas las zanjas de drenaje existentes: i) incorporador de púas en 8,9 ha, ii) incorporador de discos en 8,6 ha y iii) incorporador de patas y discos alternados en 10,8 ha. En cada una de estas zonas se delimitó y georreferenció una parcela de 1,0 ha con dimensiones de 100 x 100 m. Dentro de la parcela se marcó una grilla regular de puntos equidistantes a 10 m, obteniendo 100 puntos que se georreferenciaron para ser utilizados en las mediciones de campo y colecta de cilindros (Figura 2). Además, se georreferenció una parcela control de 0,25 ha sin incorporación de rastrojo, sobre la cual, se marcó una grilla regular de 5 m x 5 m para la realización de los muestreos.

Labores de cosecha, retiro y preparación de rastrojo

La cosecha de la avena se efectuó a partir del 30 de enero del 2018. Las 60 ha del cultivo se cosecharon con dos trilladoras en simultáneo cada una con un tractor y un carro de arrastre que retiraban el grano del predio.

En forma simultánea al trillado se realizó el embolado de la paja de avena utilizando una rotoenfardadora emboladora. Los bolos fueron transportados por un tractor con levantador frontal y retirados en camiones antes del periodo de incorporación. La etapa final de la preparación del rastrojo fue el doble picado de rastrojo o paja con un picador remolcado por un tractor, para asegurar un tamaño menor del rastrojo. En el Cuadro 1 se puede observar el detalle de las máquinas utilizadas en las distintas labores de preparación y retiro de rastrojo.

En el caso de la parcela control (CT) el rastrojo remanente sobre el suelo fue rastrillado y retirado en forma manual para facilitar las labores de siembra debido a que no hubo incorporación.

Incorporación de rastrojo y control químico

Se realizó la incorporación total o parcial del rastrojo posterior a la cosecha, dejando pasar 15 días para una segunda incorporación y 30 días para una tercera incorporación (círculos con distintos colores indican las

fechas de incorporación de rastrojo en la Figura 1). En cada incorporación la profundidad de trabajo aumentó de la siguiente forma: i) primera incorporación a nivel superficial donde prácticamente se mueve el rastrojo y se raspa la superficie del suelo, para mezclar la paja con el suelo y fomentar la emergencia de malezas, ii) segunda incorporación a 5-8 cm de profundidad y, iii) tercera

incorporación final a 10-12 cm de profundidad. Las profundidades indicadas son variables, ya que dependen de la humedad, cantidad y tamaño de rastrojo que se tenga que incorporar en el suelo donde se esta trabajando. Entre cada incorporación se aplicó herbicida de amplio espectro (Glifosato), para eliminar las malezas y la cama de semillas que dejó el cultivo cosechado.

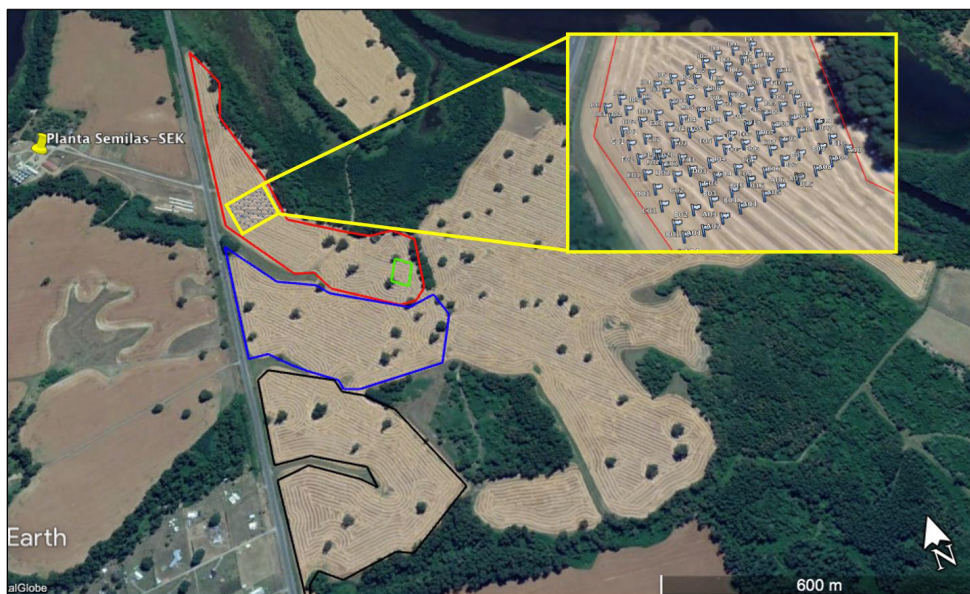


Figura 2. Sectorización en tres grandes unidades de trabajo y parcela control. Control (CT) demarcado en verde, Púas (P) demarcado en rojo, Discos (D) demarcado en azul, Patas y doble disco alternado (PD) demarcado en negro. Delimitado en amarillo se presenta la grilla en la Parcela con incorporadora de púas (P) y los 100 puntos georeferenciados. Fuente: Google Earth Pro.

Figure 2. Sectorization into three large work units and control plot. Control (CT) delimited in green, Tines (P) delimited in red, Discs (D) delimited in blue, Legs and double alternating disc (PD) delimited in black. The grid in the Plot with spike incorporator(P) and the 100 georeferenced points is delimited in yellow. Source: Google Earth Pro.

Cuadro 1. Detalles técnicos de la maquinaria usada en la cosecha y manejo del rastrojo.

Table 1. Technical details of the machines used for harvesting and stubble handling.

<i>Tipo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potencia ejercida o requerida</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Capacidad de carga</i>
Trilladora	John Deere 9770 STS	268,5 kW	14.862	10.600 [l] y 945 [l] de combustible
Tractor	John Deere 782	280 kW	N/D	N/D
Tractor	John Deere 6415	79,5 kW	4.470 kg	154 [L] combustible
Emboladora	John Deere 468	48,5 kW	575 kg	1.000 [kg] Bolo
Tractor	John Deere 7715	134 kW	8.100 kg	392 [L] combustible
Tractor levanta bolos	John Deere 6605	90 kW	N/D	N/D
Picador de Paja	Kuhn RM-610	140 kW	3.200 kg	-
Tractor	John Deere 7815	149 kW	8.100 kg	392 [L] combustible
Pulverizador de arrastre	Hardy	N/D	N/D	4.000 [L], ancho de trabajo 25 [m]

Se establecieron cuatro manejos de rastrojo diferentes: i) retiro de la totalidad de la paja sin incorporación (CT), ii) incorporación de rastrojo mediante discos (D), iii) incorporación mediante púas (P) y iv) incorporación mediante patas y doble discos alternados (PD). Se utilizó una versión más pequeña de un incorporador de discos para la primera incorporación, pero para la segunda y tercera se utilizó uno de mayor ancho de trabajo y peso. Las incorporaciones de rastrojo se realizaron con el mismo tractor (John Deere 7815), para descartar los efectos del peso y diferencia de potencias en las evaluaciones físicas realizadas (Cuadro 2). Las incorporaciones realizadas van cambiando el sentido de paso de la maquinaria para favorecer las mezclas del rastrojo con el suelo.

Mediciones de campo y recolección de muestras de suelo y rastrojo

El muestreo y las mediciones en campo se efectuaron en 4 fechas. El primer muestro se realizó previo a las incorporaciones para constatar las condiciones iniciales del suelo y los restantes se realizaron en función de los momentos de las labores mecánicas realizadas. El muestreo final se efectuó diez días después del paso de maquinaria por estar muy cerca de la fecha de siembra del cultivo temporada 2018-2019.

Simultáneamente en cada muestreo mencionado se determinó la resistencia penetración (RP) y contenido volumétrico de agua del suelo (θ_{vol}) *in situ* según una grilla de puntos (Figura 1). En el caso de haber alguna irregularidad, no propia del terreno (huella de vehículo, rocas, madera, etc.), se midió a una distancia inferior de 50 cm desde el punto señalado por el GPS Garming S64. Para el muestreo de RP y θ_{vol} en terreno, se midió con una distancia no mayor a 20 cm entre los instrumentos. Para evitar repetir la colección de cilindros y las mediciones en terreno, los puntos de colección de muestras en cada muestreo fueron registrados.

Para estimar el contenido de rastrojo por hectárea se escogieron dos parcelas con incorporación que

presentaron mayor heterogeneidad y diferencia en la cantidad de rastrojo. En cada parcela, se seleccionaron cinco zonas que van de sectores de mayor cantidad a menor cantidad de rastrojos. Se colectó el rastrojo presente en un cuadrante de 1 m² el cual posteriormente fue secado al horno a 60 °C hasta alcanzar peso constante. Se calculó la producción de paja (Ruiz, 2015) y los rendimientos obtenidos por la empresa Semillas SEK, para obtener la cantidad estimada de la producción total de rastrojo y la retirada a través de los bolos. La ecuación (1.0) se utilizó para estimar la producción de paja (P.P) en t ha⁻¹:

$$P.P = \frac{P.G \times (1-IC)}{IC} \quad 1.0$$

Donde P.G es la producción real o esperada por el productor (Semillas SEK 9,0 t ha⁻¹) e IC es el Índice del cultivo (Avena= 0,37) (Rouanet, 2006).

La RP se determinó con un penetrómetro (06.01 Hand Penetrometer, Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek, The Netherlands). El penetrómetro es de punta cónica con una superficie de contacto de 2 cm². Se midió en dos profundidades a 5 y 20 cm de acuerdo con las profundidades de trabajo para ver el resultado de la incorporación considerando el efecto de la labranza en la profundidad de suelo alterada y bajo esta.

El contenido volumétrico de agua fue registrado por medio del sensor portátil TDR SM200 (Moisture sensor) en profundidad de 5 cm. El instrumento está previamente calibrado para suelos volcánicos (Panguinao, 2014).

Análisis de laboratorio

El valor de precompresión o capacidad de soporte del suelo, (Pc) fue determinada mediante el ensayo de consolidación, utilizando un odómetro y la aplicación de presiones consecutivas sobre las muestras de suelo. Las muestras de suelo no disturbadas colectadas en cilindros metálicos de 110 cm³ a dos profundidades

Cuadro 2. Información técnica de las incorporadoras de rastrojo usadas en el estudio.

Table 2. Technical information of the stubble incorporators used in the study.

<i>Incorporador/ Característica</i>	<i>Modelo</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Ancho de trabajo [m]</i>	<i>Cantidad de implementos de incorporación</i>	<i>Medidas o característica del implemento</i>
Púas	SuperMaxx Güttler	1.600	4,8	37 púas	N/D
Discos	Lemken	1.480	2,5	32 discos	620 mm diámetro
	Rubin 9	5.800	5,0	40 discos	620 mm diámetro
Patas y discos alternados	Lemken Smaragd	3.225	4,0	9 patas	N/D
				4 pares de discos	N/D

(5 cm y 20 cm), fueron saturadas por ascenso capilar y posteriormente equilibradas a -6 kPa de potencial mátrico en bandejas de arena. Luego, fueron pesadas y colocadas en el odómetro. Una vez instaladas en el odómetro se adicionaron, cada 6 minutos, cargas consecutivas de 6, 25; 12,5; 25; 50; 100; 200 y 400 kPa (Payahuala y Dörner, 2009). A partir de los datos obtenidos en la curva de consolidación se determinó la Pc utilizando el programa RETc (RETention Curve) v.6.02.

Análisis estadístico

Se realizó un Test de Shapiro–Wilk para verificar la distribución normal de los datos. De presentar una distribución normal se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía para cada factor (tiempo y método incorporación según la máquina utilizada), ya que no se observó un efecto significativo de la interacción entre los factores sobre la variable respuesta (RP). Se realizó un test de Tukey (HSD) para determinar las diferencias estadísticamente significativas entre las medias ($p < 0,05$) de cada factor.

Además, se realizó análisis de regresión para la relación entre θ_{vol} y RP a 5 cm y para la relación entre Pc y RP a 5 cm y 20 cm, para determinar el grado de relación entre las variables a través de los distintos métodos de incorporación y tiempos de muestreo. Los softwares utilizados para los análisis estadísticos y graficar fueron GraphPad Prism 8.0, Infostat 7.0, Microsoft Office Excel y RStudio Version 1.3.1073 (RStudio, Inc., MA, USA).

RESULTADOS

Estimación de la cantidad de rastrojo producido previo a su incorporación

Con el objetivo de determinar la cantidad de rastrojo que fue incorporado durante el experimento, se seleccionaron al azar las parcelas P y D. La cantidad de

rastrojo estimada a través de la ecuación 1.0, con índice de cosecha (I.C) de 0,37 para la avena y un rendimiento de 9 ton ha⁻¹, alcanzó 15,32 ton ha⁻¹. En las dos parcelas donde se midió el rastrojo este fue menor a la cantidad estimada (Figura 3). El tratamiento P presentó un 90,04% más de rastrojo que el tratamiento D ($p < 0,05$), equivalente a 3,89 ton ha⁻¹.

Cambios temporales en la resistencia mecánica y contenido de agua del suelo

El contenido volumétrico de agua (θ_{vol}) en el suelo aumentó alrededor de un 50% en los cuatro tratamientos desde el C. Inicial a la 1^{ra} Incorp (Cuadro 3). A partir de la 2^{da} Incorp. CT fue el único que incrementó el θ_{vol} a 53,9%. Los demás tratamientos comenzaron a dismi-

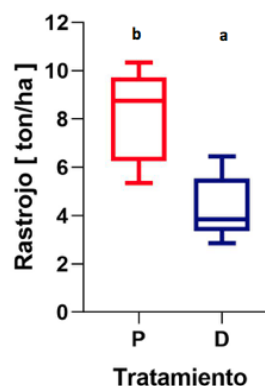


Figura 3. Cantidad de rastrojo previo a incorporación, dentro de dos parcelas con incorporación Púas (P) y Discos (D). Letras distintas indican diferencias en la cantidad de rastrojo ($p < 0,05$) (n=5).

Figure 3. Amount of stubble before incorporation, in two plots with incorporation of Púas (P) and Discos (D). Different letters indicate differences in the amount of stubble ($p < 0,05$) (n=5).

Cuadro 3. Contenido volumétrico de agua (θ_{vol}) para Control (CT), Púas (P), Discos (D) y Patas y discos alternados (PD) a 5 cm de profundidad, se indica el valor promedio \pm 1 error estándar (n=100) excepto CT (n=90).

Table 3. Volumetric water content (θ_{vol}) for Control (CT), Spikes (P), Discs (D) and Alternate Legs and Discs (PD) at 5 cm depth, average value \pm 1 standard error (n=100) except CT (n=90) is indicated.

Tiempo(→→) Manejos(↓↓)	Contenido volumétrico de agua (θ_{vol})			
	C.Inicial *21-25.02.18	1 ^{ra} Incorp. 25-26.03.18	2 ^{da} Incorp. 04-15.06.18	3 ^{ra} Incorp. 30-31.07.18
CT	19,71 \pm 0,63	37,82 \pm 0,55	53,85 \pm 0,36	49,76 \pm 3,33
P	13,18 \pm 0,29	36,34 \pm 0,45	32,16 \pm 0,55	20,10 \pm 0,48
D	15,61 \pm 0,41	35,64 \pm 0,60	33,08 \pm 0,59	22,66 \pm 0,53
PD	15,05 \pm 0,38	34,50 \pm 0,60	21,23 \pm 0,37	21,87 \pm 0,28

*Fechas indicadas en Figura 1 según manejo.

nir progresivamente el θ_{vol} en un 12%, 8% y 39% para P, D y PD, respectivamente. CT presenta un 30% más de agua en promedio al compararlo con los tratamientos de P, D y PD. De esta manera, CT tiende a mantener su θ_{vol} más estable en el tiempo a diferencia de la reducción observada en los tratamientos con labranza.

Los tratamientos con labranza a partir de la 2^{da} Incorp. a 5 cm presentaron casi nula resistencia a la penetración (RP). Por el contrario, CT siempre presentó una RP por sobre los 1.000 kPa (Figura 4). Desde Condición Inicial (C.Inicial) a la 1^{ra} Incorp. todos los tratamientos disminuyeron su RP, donde CT y P (1.483 y 1.431 kPa) presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) con D y PD (1.582 y 1.715 kPa). De las parcelas con labranza, en la 2^{da} Incorp. la RP más alta fue de 75,3 kPa de PD y en la 3^{ra} Incorp. la más alta fue P con 51,13 kPa, sin presentar diferencias entre las parcelas con labranza ($p > 0,05$).

A 20 cm de profundidad, se observó un comportamiento diferente de la RP, puesto que al estar bajo la profundidad de labranza no se destruyó la estructura del suelo por ende no se observaron valores tan bajos como a 5 cm (Figura 4). Sin embargo, la evolución de la RP en el tiempo sigue una tendencia de disminución en sus valores en las cuatro parcelas hasta la 2^{da} Incorp. En 2^{da} y 3^{ra} Incorp. PD y CT presentaron la mayor RP con 3.318 y 1.757 kPa, respectivamente; mientras que los menores valores de RP se observaron en CT con 1.598 kPa en la 2^{da} Incorp y P con 1.212 kPa en la 3^{ra} Incorp. En ambos casos se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$). En 3^{ra} Incorp. CT se diferenció significativamente ($p < 0,05$) de los tres tratamientos con incorporación con la RP más alta (1.868 kPa).

La RP en la parcela CT (Figura 5) disminuye conforme aumenta el θ_{vol} en el suelo ($R^2 = 0,97$; $p < 0,001$). La

nube de datos muestra la variación que puede presentar RP en función del contenido de agua y las técnicas de incorporación de rastrojo. En las parcelas con manejo del residuo no se realizó este análisis debido a que la relación no fue significativa dado los bajos valores de RP desde 2^{da} y 3^{ra} Incorp. La línea de tendencia se estableció utilizando los valores promedio de RP y θ_{vol} para cada uno de los muestreos.

El valor de precompresión (Pc), al igual que RP, tiende a disminuir en la profundidad de 5 cm de suelo luego de sucesivas incorporaciones de rastrojo en el tiempo (Figura 6). Sin embargo, no se observó un relación significativa entre tratamientos y eventos de incorporación realizadas en ambas profundidades ($p > 0,05$). Por otro lado, la Pc a los 5 cm se correlaciona directamente con la RP ($R^2 = 0,69$), en función de la incorporación sucesiva de rastrojos (Figura 6). Esta relación entre ambos parámetros se dispersa en la profundidad de 20 cm, probablemente por la profundidad de trabajo de las incorporaciones realizadas.

DISCUSIÓN

Cantidad de rastrojo en las parcelas y características del suelo

Existe una diferencia en la cantidad de rastrojo estimada a partir de la ecuación 1.0 con respecto a la medida en campo, debido al retiro del rastrojo (bolos de paja). A pesar de esto, hay diferencia en la cantidad de rastrojo utilizado entre parcelas (Figura 3). Semillas SEK trabaja con reguladores de crecimiento y presenta un rendimiento de 9,0 ton ha⁻¹, con un 21,95% por sobre el rendimiento de siembras invernales (7,38 ton ha⁻¹; Berato *et al.*, 1994). El aumento en el rendimiento

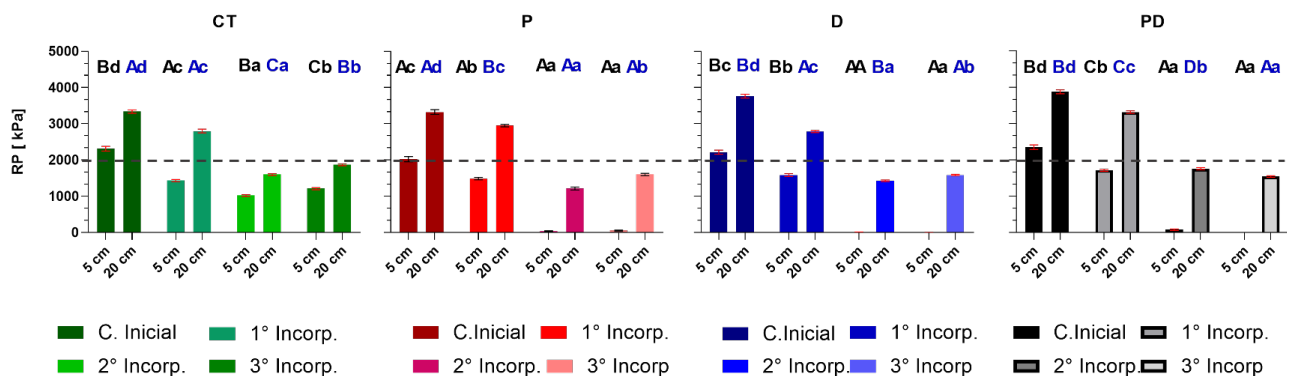


Figura 4. Resistencia a la penetración (RP) para Control (CT), Púas (P), Discos (D) y Patas y Discos Alternados (PD) a 5 y 20 cm de profundidad. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos de incorporación para cada fecha, y letras minúsculas distintas indican diferencias en el tiempo en un mismo tratamiento ($p < 0,05$) ($n=7$).

Figure 4. Penetration resistance (PR) for Control (CT), Spikes (P), Discs (D) and Alternate Legs and Discs (PD) at 5 and 20 cm depth. Different uppercase letters indicate significant differences between treatments at the same sample date, and different lowercase letters indicate differences over time within the same treatment ($p < 0,05$) ($n=7$).

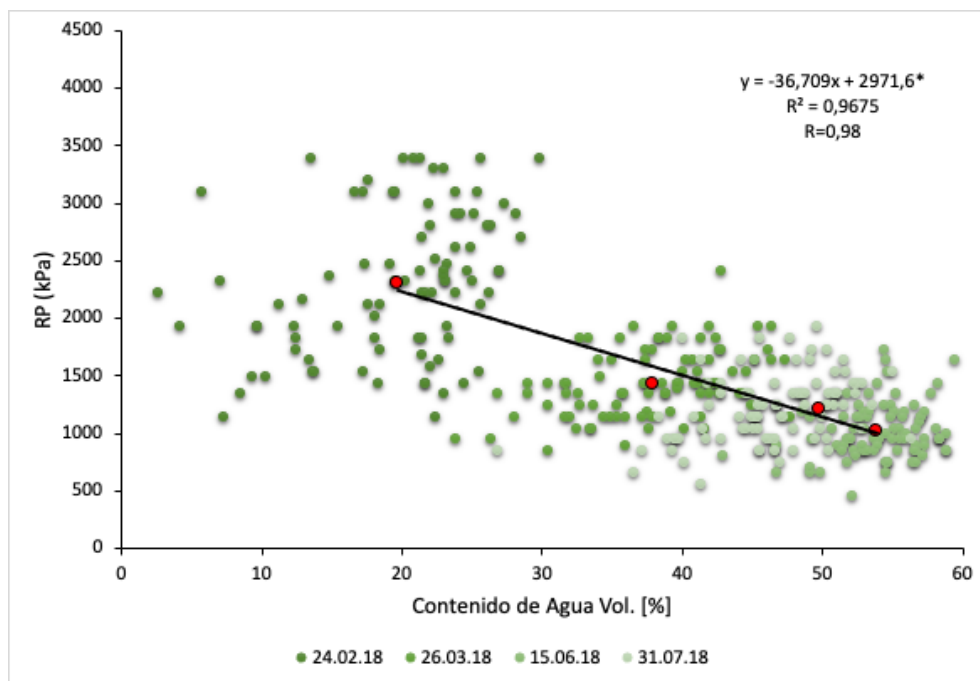


Figura 5. Resistencia a la penetración (RP) en función del contenido volumétrico de agua (%) con a 5 cm en parcela Control (CT) de cuatro muestreos (n=400) y línea de tendencia en base a los valores promedio de los cuatro muestreos (n=4) (* p < 0,05).

Figure 5. Penetration resistance (PR) as a function of volumetric water content (%) at 5 cm in Control plot (CT) of four samples (n=400) and trend line based on the average values of the four samples (n=4) (* p < 0.05).

y la debilidad de la caña aumentan la probabilidad de tendadura (Wu y Ma, 2019), lo que se observa con la diferencia entre rastros entre P y D. Además, debido a topografía del sitio (zonas planas y lomajes suaves), el cultivo en ciertos sectores es expuesto al viento generando la tendadura de la caña.

Cambios temporales en la resistencia mecánica y contenido de humedad del suelo

Para favorecer tanto la labranza del suelo como la descomposición del residuo es necesario que existan ciclos de secado y humectación, que en periodos invernales son irregulares por los escasos días sin precipitaciones y las bajas temperaturas (Figura 1). El aumento en la profundidad de trabajo entre incorporaciones, explica en gran parte los bruscos cambios en la resistencia mecánica del suelo desde la 2^{da} a la 3^{ra} Incorporación (Figura 4). La labranza del suelo rompe su estructura reduciendo la superficie de contacto entre agregados y partículas (Zúñiga et al., 2015; Salas et al., 2016). Esto trae consigo: i) una disminución en la resistencia mecánica (Vásquez et al., 2012) y ii) una mayor exposición del suelo a perder agua por evaporación (Dörner et al., 2012). Este quiebre en los resultados se observa claramente en el θ_{vol} medido en el suelo (Cuadro 3) donde las diferencias se producen a partir

de 2^{da} Incorp. junto con la concentración de las precipitaciones a partir de marzo con tres eventos de lluvias intensas de 40, 40 y 80 mm (Figura 1). En el periodo 1/02/2018 a 1/08/2018 se acumularon 960 mm de precipitaciones que se reflejan en el aumento del contenido de agua en el suelo que tiene CT.

Mediciones *in situ* de RP y θ_{vol} han sido utilizadas para evaluar la estabilidad mecánica y conservación de agua en suelos derivados de cenizas volcánicas estructurados bajo praderas sometidos a eventos de pastoreo (Dec et al., 2010; Salas et al., 2016; Negrón et al., 2019), y bajo labranza (Dörner et al., 2012; Vásquez et al., 2012). Entre la 2^{da} y 3^{ra} Incorp. la estructura está prácticamente destruida por la labranza y no existe relación entre RP y θ_{vol} (Horn y Fleige, 2009; Dec et al., 2011; Dörner et al., 2012). Esto último puede deberse a la pérdida de la continuidad del sistema poroso y el reordenamiento de las partículas del suelo producto de un estrés mecánico externo. En este contexto, y dado que CT no presenta una disturbación de su estructura por la incorporación continua de rastrojo, a partir de la 2^{da} Incorp., CT mantiene una humedad cercana al 50% mientras P, D y PD tienen un menor contenido de agua entre 30-20% y con casi nula resistencia mecánica (< 50 kPa). Independiente del peso y la forma del implemento de incorporación hay un efecto en profundi-

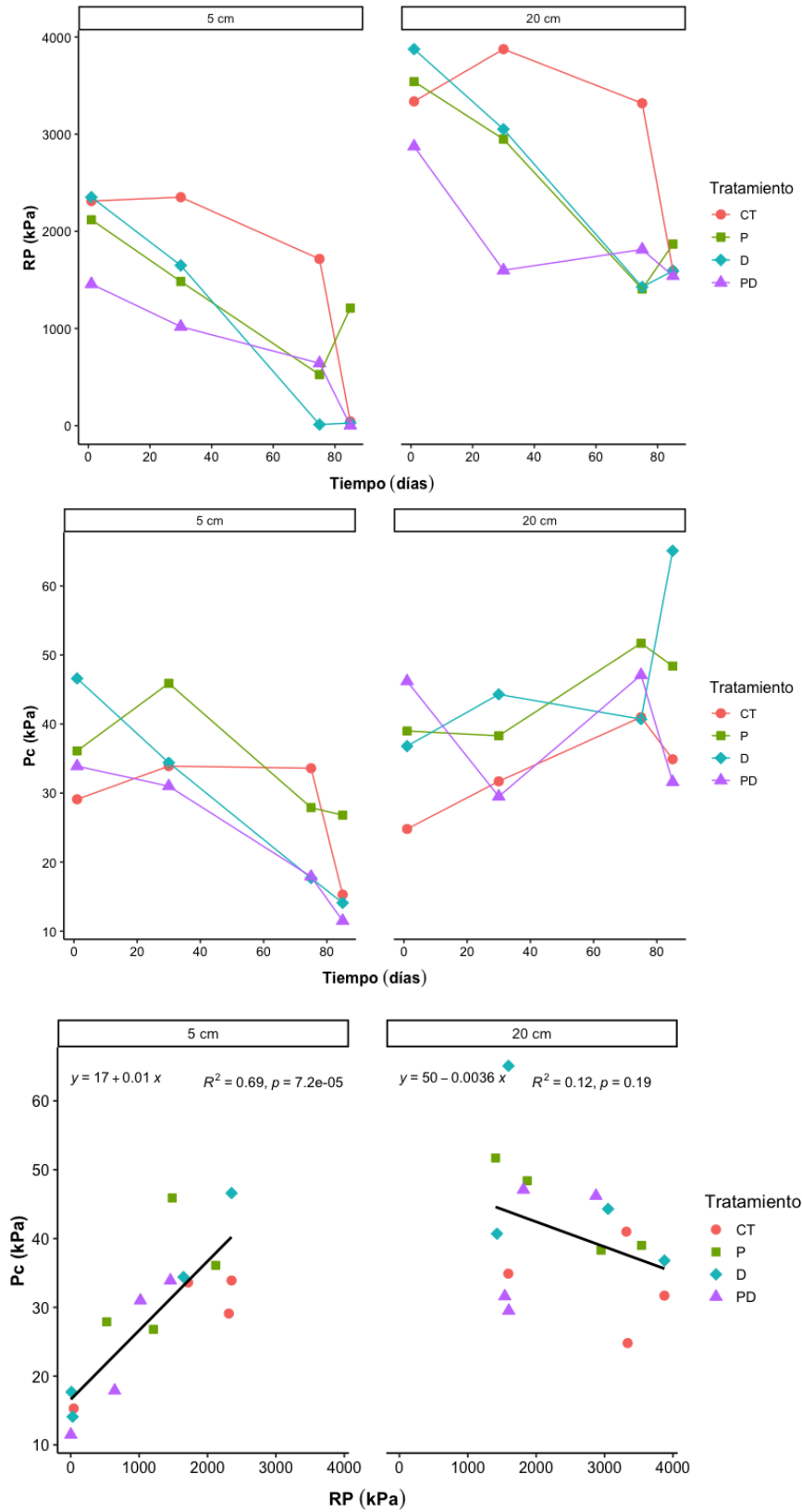


Figura 6. Relación entre Resistencia a la penetración (RP) y valor de precompresión (Pc) en función del número de incorporación para los tratamientos: Control (CT), Púas (P), Discos (D) y Patas y Discos Alternados (PD) a 5 y 20 cm de profundidad.

Figure 6. Relationship between penetration resistance (PR) and precompression stress (Bc) as a function of the number of incorporations for the treatments: Control (CT), Tines (P), Disks (D) and Alternate Legs and Disks (PD) at 5 and 20 cm depth.

dad por la labranza del suelo. En la Figura 4 se observa como los tratamientos con manejo de residuo tienen diferencias ($p < 0,05$) con CT, de estos solo PD mantiene una constante disminución en RP con diferencias en el tiempo ($p < 0,05$), además fue el tratamiento con menor contenido de agua en la 2^{da} Incorp. (21,23%), lo que se debe a una mayor pérdida de agua ya sea por infiltración o evaporación. Por otro lado, la RP en PD a 20 cm presenta los valores más altos en comparación a los otros implementos de incorporación, lo que refleja un mayor impacto por la acción de las púas y discos en profundidad. El efecto en profundidad de los implementos de labranza ha sido materia de preocupación por el potencial efecto de compactación y formación de "Pie de Arado" que pueden provocar (Batey, 2009; Dörner y Horn, 2009; Keller *et al.*, 2019). Los eventos de labranza del suelo se repiten según rotación de cultivo, ejerciendo presiones sucesivas sobre el suelo y deformando la estructura original lo que puede llevar a la formación de estructura de tipo laminar. Esta se caracteriza por estar formada por agregados cuya longitud del eje horizontal es mayor a la del vertical, lo que provoca: i) restricción del crecimiento de las raíces en profundidad (Lipiec y Hatano, 2003), ii) anisotropía de la conductividad hidráulica (Dörner y Horn, 2006), iii) una mayor resistencia mecánica (Dörner y Horn, 2009), y iv) menor capacidad de infiltración de agua lo que se puede traducir en flujos subsuperficiales en suelos en pendiente (Dörner y Dec, 2008; Clothier *et al.*, 2008; Peng, 2011).

El valor crítico de resistencia a la penetración (2.000 kPa) con un contenido de humedad de capacidad de campo (Horn y Fleige, 2009) revela un punto donde existe un daño estructural por manejo y con serios problemas para el crecimiento de las raíces. En el caso del presente estudio, para las cuatro parcelas en C. inicial. a 5 cm y a 20 cm en C. inicial. y 1^{ra} Incorp., bajo condiciones de humedad cercanas a capacidad de campo no se alcanzaron niveles de RP de 2.000 kPa lo que coincide con lo planteado por Zúñiga (2013) en cuanto a que los niveles críticos propuestos por Horn y Fleige (2009) y Reynolds *et al.* (2009), no son aplicables en suelos derivados de cenizas volcánicas; debido a su naturaleza e interacción de sus propiedades órgano-minerales (mayor superficie reactiva), es decir la mineralógica característica de los suelos volcánicos (dominada por componentes alofánicos) y su interacción con componentes orgánicos.

La Pc es una propiedad que caracteriza la estabilidad mecánica del suelo (Dec *et al.*, 2010). Los valores críticos de Pc para un suelo franco superan 90 kPa (cuando las muestras de suelo se equilibran a 60 hPa), lo que indica una compactación perjudicial de subsuelo considerando la producción de cultivos (Horn y Fleige, 2009). Valores de Pc bajo 60 kPa son clasificados como bajo a muy bajo (< 30 kPa), entre 60 y 90 kPa

de Pc son clasificados como valores medios, y valores de Pc sobre 120 kPa y 150 kPa son clasificados muy altos y extremadamente altos, respectivamente (Horn y Fleige, 2003). En el presente estudio, los valores de Pc observados estuvieron por debajo del límite crítico (< 60 kPa) y se clasifican como valores medios a muy bajos (Horn y Fleige, 2003). Se ha mostrado que, en suelos de origen volcánico bajo pradera y pastoreo continuo, los valores de Pc incrementan en profundidad (de 10 a 20 cm), sin superar los 73 kPa (Dec *et al.*, 2021). La incorporación continua de residuos genera que la estructura del suelo se modifique continuamente a través de la labranza, lo cual resulta en una reducción de Pc en los primeros 5 cm de suelo (al igual que en RP hacia el día 80), debido al re-ordenamiento de las partículas durante la labranza (Reichert *et al.*, 2017) lo que se ve reflejado en la relación PR y Pc a 5 cm de profundidad. Esto último, no se observó a los 20 cm en donde no se registra el efecto de la pérdida de estructura por la incorporación de rastrojo, sino más bien el efecto acumulativo de las incorporaciones sobre el suelo lo que se ve reflejado principalmente por el incremento de Pc.

Los valores críticos señalados por Horn y Fleige (2009), son para suelos que presentan problemas de crecimiento radical debido a problemas de compactación. En este caso el suelo está siendo labrado para una siembra invernal, por lo que las consecuencias de la incorporación se observarían mejor post-siembra o durante el desarrollo del cultivo. Aunque para cultivos de enraizamiento más profundo o con diferentes tipos de raíz se podría esperar una respuesta diferente.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con incorporación de rastrojo, en general, presentaron valores más bajos de resistencia a la penetración en comparación al control en los primeros cm del suelo; sin embargo, no se observó un efecto diferencial del uso de distintos métodos de incorporación mecanizada de rastrojo sobre las propiedades dependientes de la estructura del suelo en el periodo de post cosecha a pre-siembra.

El peso y el continuo tránsito de la maquinaria empleada para incorporar el rastrojo, generó un aumento de la resistencia mecánica del suelo en la profundidad de 20 cm, lo que refleja el efecto de compactación en el suelo por debajo de la profundidad de trabajo de las incorporadoras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas COOPRINSEM y Semillas SEK por proveer la maquinaria y Semillas SEK quien ejecutó y dispuso del personal para llevar a cabo las labores de campo.

REFERENCIAS

- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management—a review. *Soil use and management*, 25(4), 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Berato, E., Salvo, H., Rivas, R., 1994. URANO-INIA nueva variedad industrial. *Agricultura técnica (Chile)* 54 (2), 204–205. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/31689>
- Besoain, E., 1985. Minerales secundarios, en: Tosso (Ed.), *Suelos Volcánicos de Chile*, INIA, Santiago, Chile, pp. 153–214.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. Estudio agrológico X Región. Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos. Publicación CIREN N° 123, Santiago, Chile.
- Clothier, B., Green, S., Deurer, M., 2008. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science* 59, 2–13. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00991.x>
- Cong, P., Wang, J., Li, Y., Liu, N., Dong, J., Pang, H., Zhang, L., Gao, Z., 2020. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies. *Soil and Tillage Research* 204, 104735. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104735>
- Crovetto, C., 1992. Rastrojos sobre el suelo, una introducción a la cero labranza. Santiago, Chile. Universitaria. 301 p.
- Dec, D., Dörner, J., Balocchi, O., Gilkes, R., Prakongkep, N., 2010. Spatial and temporal changes of soil physical properties of an Andisol in southern Chile as a consequence of grazing and wetting and drying cycles. In 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World.
- Dec, D., Dörner, J., Balocchi, O. 2011. Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(2), 293–303. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392011000200015>
- Dec, D., Bravo, S., Horn, R., Uteau, D., Peth, S., Zúñiga, F., Clunes, J., Granda, S., Martínez, Ó., Balocchi, Ó., Alonso, M., 2021. Analyzing the impact of grazing and short-term irrigation management on soil mechanical strength of a volcanic ash soil under different types of pastures. *Soil and Tillage Research* 213, 105130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105130>
- Di Castri, F., Hajek, E., 1976. *Bioclimatología de Chile*. Santiago, Chile. Editorial Universidad Católica de Chile. 128 p
- Dörner, J., Horn, R., 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the weichselian moraine region in N Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 213–220. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521844>
- Dörner, J., Dec, D., 2008. Efecto de la estructura sobre el movimiento de agua en una catena de suelos. *Agrosur*, 36(2), 45–52. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2008.v36n2-05>
- Dörner, J., Horn, R., 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 102, 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.004>
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2009. Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: Effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil and Tillage Research* 106 (1), 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.013>
- Dörner, J., Dec, D., Feest, E., Vásquez, N., Díaz, M., 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. *Soil and Tillage Research* 125, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.019>
- Ellies, A., 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils, in: Drescher, J., Horn, R. de Boodt, M. (Eds.), *Impact of water and external forces on soil structure*. Catena Supplement 11. pp. 87–92.
- Ellies, A., 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* 16, 101–110.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019. *Perspectivas de cosechas y situación alimentaria*. Informe trimestral mundial, Marzo 2019. <http://www.fao.org/3/ca3696es/ca3696es.pdf>
- Horn, R., Fleige, H., 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 89–99.
- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.015>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research* 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kumari, K., Prasad, J., Solanki, I.S., Chaudhary, R., 2018. Long-term effect of crop residues incorporation on yield and soil physical properties under rice-wheat cropping system in calcareous soil. *Journal of soil science and plant nutrition* 18(1), 27–40. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000103>
- Lenka, S., Lenka, N.K., Singh, R.C., Rao, A. S., Kundu, S., Raghuvansi, J., Patidar, C.P., 2014. Greenhouse gas emission and soil properties as influenced by wheat biomass burning in Vertisols of central India. *Current Science* 1150–1154.
- Lipiec, J., Hatano, R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116(1-2), 107–136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)
- Madariaga, R., 2003. Vida después de la muerte: rastrojos e incidencias de enfermedades en cultivos anuales. in Acevedo, E. (ed.), *Sustentabilidad en cultivos anuales*. Serie Ciencias Agronómicas N° 8. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Mera, M., Lizana, X.C., Calderini, D.F., 2015. Cropping systems in environments with high yield potential of Southern Chile, in: Sadras, V.O., Calderini D.F. (Eds.), *Crop Physiology*. Academic, pp. 111–140.
- Negrón, M., López, I., Dörner, J., 2019. Consequences of intensive grazing by dairy cows of contrasting live weights on volcanic ash topsoil structure and pasture dynamics, *Soil and Tillage Research* 189, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.025>

- Panguinao, M., 2014. Calibración de sondas de humedad para suelos derivados de cenizas volcánicas. Tesis Lic. Agr. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 41 p.
- Payahuala, M., Dörner, J. 2009. Determinación de la capacidad de soporte de un Andisol (Duric Hapludand) por medio de dos métodos gráficos. *Agro Sur* 37 (3), 220–231.
- Peng, X., 2011. Anisotropy of Soil Physical Properties, in: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, pp. 55–57. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1>.
- Pituello, C., Dal Ferro, N., Simonetti, G., Berti, A., Morari, F., 2016. Nano to macro pore structure changes induced by long-term residue management in three different soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 217, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.029>
- Reichert, J.M., Brandt, A.A., Rodrigues, M. F., da Veiga, M., Reinert, D.J., 2017. Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage?. *Geoderma* 301, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.012>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Rouanet, M., 2006. Manejo integrado suelo planta y respuestas productivas del cultivo de la avena, en Beratto E. 2006 Cultivo de la avena en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro de Investigación Carillanca, Temuco, Chile.
- Roper, M. M., Kerr, R., Ward, P. R., Micin, S. F., Krishnamurthy, P., 2021. Changes in soil properties and crop performance on stubble-burned and cultivated water-repellent soils can take many years following reversion to no-till and stubble retention. *Geoderma* 402, 115361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115361>
- Ruiz, C., 2015. Rastrojos de cultivos y residuos forestales. Boletín del INIA N°308. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillan, Chile.
- Salas, R., Ordóñez, I., Valle, S., López, I., Dec, D., Descalzi, C., Dörner, J. 2016. Variación espacial de propiedades físicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas sometido a distintas estrategias de mejoramiento de una pradera degradada. *Agro Sur* 44(3), 29–40. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n3-04>
- Seguel, O., Ellies, A., Mac Donald, R., Ramírez, C., 2002. Capacidad de soporte y resistencia al corte en suelos sometidos a distinto uso. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*. Boletín N° 18.
- Tiessen, H., Cuevas, E., Chaco, P., 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371, 783–785.
- United States Department of Agriculture (USDA-NRCS), 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, Eleventh Edition.
- Vásquez, N., Salazar, F., Dörner, J., 2012. Variabilidad temporal de las propiedades físico-mecánicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo labranza convencional. *Agro Sur* 40(3), 1–13. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2012.v40n3-01>
- Wu, W., Ma, B.L., 2019. Erect-leaf posture promotes lodging resistance in oat plants under high plant population. *European journal of agronomy* 103, 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.010>
- Zagal, E., Vidal, I., Muñoz, C., Balesdent, J., 2010. Using maize as reference plant material a natural ^{13}C for field assays of soil carbon dynamics. *World Congress of Soil Science*. Brisbane, Australia.
- Zúñiga, F., 2013. Estrategias de mejoramiento de praderas bajo pastoreo ovino desde una perspectiva de calidad física de suelos. Tesis de Tesis Magíster en Ciencias del Suelo, Universidad Austral de Chile. 65 p.
- Zúñiga, F., Ivelic-Sáez, J., López, I., Huygens, D., Dörner, J., 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil and Tillage Research* 145, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>