

COMPACTACIÓN DE SUELOS POST-COSECHA MECANIZADA DE UN MONTE DE EUCALIPTUS EN EL PARTIDO DE SAN CAYETANO, BUENOS AIRES, ARGENTINA¹

COMPACTAÇÃO DO SOLO PÓS-COLHEITA MECANIZADA DE UM MONTE DE EUCALIPTO EM SAN CAYETANO, BUENOS AIRES, ARGENTINA

Victor Hugo MERANI^{2,4}; Matilde MUR²; Luciano LARRIEU²; Daniel Adalberto FERRO²; Facundo Daniel GUILINO²; Juan Manuel VAZQUEZ²; Guillermo José MILLAN³; Tatiana CINQUETTI²; Esteban Iván PEREIRA²; María Clara DONADELLI²; María Florencia ZANARDI³

RESUMEN - La cosecha mecanizada en sistemas forestales genera daños en los suelos que afectan en forma directa la resistencia mecánica a la penetración (RMP) y la porosidad de los suelos y en forma indirecta la capacidad de crecimiento de las plantas y el movimiento de agua por los suelos. El presente ensayo evaluó el efecto de un sistema de cosecha mecanizado sobre los suelos hapludoles del SE bonaerense a través de los parámetros RMP, Infiltración (I), Densidad aparente (DA), Densidad máxima Proctor (DMP) y Compactación Relativa (CR). Se delimitaron tres tratamientos: huella (H), entre huella (EH) y entre caminos (EC), según el nivel de tránsito de la maquinaria. En los mismos se realizó la medición de RMP en forma transversal al avance a fin de determinar las zonas de mayor valor de RMP. Posteriormente se realizaron mediciones longitudinales en los diferentes sitios y se generaron curvas comparativas en dos momentos: inmediatamente después de la cosecha y 6 meses después de la misma. Las mediciones de I junto con las de DA se realizaron inmediatamente después de la cosecha y de forma longitudinales siguiendo las zonas marcadas para RMP. Se determinó que la zona H fue la que presentó los mayores valores de RMP inmediatamente después de la cosecha, no obstante, todos los tratamientos presentaron valores mayores a 2000 kPa. La porosidad y la infiltración se vieron fuertemente afectadas llegando a valores de CR de 99% en superficie (0-0,01m) y 97 % por debajo de 0,1 m hasta 0,3 m. Esto afectó seriamente el crecimiento de los renovales y aumento la muerte de tocones. Seis meses después de la cosecha, todos los sitios presentaron valores menores de RMP, mostrando un efecto de descompactación natural.

Palabras claves: *Eucalyptus globulus*; Densidad Proctor; Compactación Relativa; Tasa de Infiltración.

RESUMO - A colheita mecanizada em sistemas florestais gera danos nos solos que afetam diretamente a resistência mecânica à penetração (RMP) e a porosidade do solo, e indiretamente a capacidade de crescimento das plantas e o movimento de água pelos solos. Esta pesquisa avaliou o efeito de um sistema de colheita mecanizado nos hapludos solos do sudeste da província de Buenos Aires, através dos parâmetros RMP, Infiltração (I), Densidade aparente (DA), Densidade máxima Proctor (DMP) e Compactação Relativa (CR). Foram delimitados três tratamentos: rodas de trator (H), entre rodas de trator (EH) e entre trilhas (EC), de acordo com o nível de tráfego da maquinaria. Nas medições, o RMP foi avaliado transversalmente ao avanço para determinar as zonas de maior valor de RMP. Posteriormente, foram realizadas medições longitudinais nos diferentes locais e foram geradas curvas comparativas em dois momentos: imediatamente após a colheita e seis meses depois. As medições de I, juntamente com as de DA, foram realizadas imediatamente após a colheita e de forma longitudinal seguindo as zonas marcadas para o RMP. Foi observado que a zona H apresentou os maiores valores de RMP imediatamente após a colheita; no entanto, todos os tratamentos apresentaram valores acima de 2000 kPa. A porosidade e a infiltração foram fortemente afetadas, atingindo valores de CR de 99% na superfície (0-0,01 m) e 97% de 0,1 m a 0,3 m de profundidade. Isso afetou seriamente o brotamento dos tocos em regime de talhadia. Seis meses após a colheita, todos os locais apresentaram valores menores de RMP, mostrando um efeito de descompactação natural.

Palavras-chave: *Eucalyptus globulus*; Densidade máxima Proctor; Compactação Relativa Taxa de infiltração.

¹ Recebido para análise em 22.11.2023. Aceito para publicação em 17.04.2024. Publicado em 25.06.2024.

² Cátedra de Mecanización Agrícola y Forestal. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata. 60 y 119 s/n. CP 1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

³ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelo. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata. 60 y 119 s/n. CP 1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Autor para correspondência: Victor Hugo Merani – victormerani@gmail.com

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha ocurrido en Argentina un constante y significativo aumento del peso de los vehículos agrícolas y forestales, esto si bien se vuelve necesario para adaptarse a las necesidades operativas de los sistemas productivos, genera preocupación por las consecuencias a largo plazo sobre la sustentabilidad de los suelos transitados (Mur y Balbuena, 2014). El abastecimiento de madera desde el lugar de corte hasta las industrias implica que una parte del movimiento vehicular deba realizarse dentro de la plantación. El tránsito de tractores y acoplados causa los cambios más severos en la estructura del monte y del suelo (Larocca et al., 2018; Aroca-Fernández et al., 2019). Según Håkansson (1994), entre los numerosos procesos que conducen al deterioro de la estructura del suelo, la compactación del subsuelo inducida por el tráfico de vehículos pesados pareciera ser el desafío más importante a largo plazo para una producción sostenible.

De acuerdo con los conocimientos actuales los procesos de compactación del suelo son sumamente complejos. Para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil es función de la carga aplicada, la presión ejercida por el rodado, el estado de humedad y la intensidad de tránsito recibida (Raper y Erbach, 1990). Smith y Dickson (1990), analizaron diversos trabajos de investigación y demostraron que la presión de contacto influye sobre la compactación superficial. Sin embargo, la compactación del subsuelo, por debajo de 40 cm de profundidad, está directamente influenciada por el peso de los vehículos, en forma independiente de la presión de contacto rueda suelo. Por otro lado, la compactación subsuperficial depende no solo del peso del vehículo sino también del número de pasajes que éste efectúe (Jorajuría y Draghi, 1997). A los efectos de evaluar el grado de compactación del suelo, los parámetros más utilizados son la resistencia del suelo a la penetración y la densidad aparente, esta última no es un parámetro muy sensible a los cambios, ya que la forma de medición posee desventajas como la posibilidad de alterar la estructura durante el proceso de muestreo (Gabriels y Lobo, 2011; Agostini et al., 2014). O'Sullivan et al. (1987) determinaron que índices de cono de 2,1 a 2,5 MPa impedirían el crecimiento radicular, mientras que Threadgill (1982) señaló como determinantes de reducciones en el crecimiento radicular valores de 1,5 MPa.

Numerosos autores trabajaron el efecto de las propiedades físicas del suelo en el crecimiento radical de diferentes especies arbóreas. Gaitán et al.

(2005) trabajaron en la distribución de raíces finas de *Eucalyptus* y su relación con la densidad aparente. Estos autores encontraron una correlación negativa entre la cantidad de raíces finas y la densidad aparente. A su vez, Fabiao et al. (1994) indican que el crecimiento de los árboles es directamente dependiente de las propiedades edáficas. En tal sentido Pritchett (1986), señala que el volumen de suelo disponible para las raíces es uno de los principales factores que influye en el crecimiento de los árboles. Casado et al. (2000) trabajaron en el crecimiento inicial de plantines de *Eucalyptus viminalis*, encontrando que el área foliar y la materia seca del tratamiento de 1,3 Mg m⁻³ resultaron mayores con respecto al de 0,95 Mg m⁻³ en forma independiente del riego.

Se ha demostrado que, en un periodo menor de 15 años, un rodal en rebrote produce el doble del volumen maderable comparado con uno establecido mediante regeneración sexual (Silva et al., 2011). La capacidad de brotación y supervivencia se ve afectada por muchos factores que afectan a los tocones con mayor o menor intensidad entre los que se mencionan la calidad de los suelos.

La revisión bibliográfica indica que la mayoría de las publicaciones trabajan la influencia de las propiedades físicas del suelo en el establecimiento y crecimiento inicial de los árboles. Sin embargo, no se encontraron trabajos sobre la influencia de las propiedades edáficas en el rebrote de eucaliptos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del tránsito durante el corte y la extracción de madera sobre diferentes indicadores de calidad física del suelo en una plantación de *Eucalytus* sp. En lotes del S.E. Bonaerense y su efecto en el corto plazo sobre el rebrote de los tocones.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño del ensayo

El ensayo se realizó en el establecimiento "El Triángulo" ubicado en la localidad de Energía (partido de San Cayetano) (38°32'40.9" S, 59°29'07.9" O). Se seleccionó un lote homogéneo y se realizaron evaluaciones y mediciones de propiedades físicas en dos fechas: septiembre de 2021 (Fecha 1) y en marzo de 2022 (Fecha 2). Los datos recopilados en primera fecha se utilizaron para realizar el diagnóstico de la situación edáfica dos semanas después de la cosecha mecanizada, mientras que los datos recopilados en la segunda fecha se utilizaron para evaluar el cambio de las propiedades a los 6 meses de la primera evaluación (una temporada de crecimiento). Todas las evaluaciones se realizaron sobre una vía de saca y

sus aledaños (Figura 1). El bosque al momento de la cosecha poseía una edad de 20 años, el marco de plantación fue de 3 m por 3 m y el rendimiento promedio fue de 520,6 m³ ha⁻¹.

En función de la logística de cosecha utilizada, se realizó una división en tres zonas de análisis:

- 1) Huella del camino (H): zona de pisada de las ruedas durante la cosecha y extracción.
- 2) Entre huellas del camino (EH): zona central entre las dos huellas de un camino.
- 3) Entre caminos (EC): zona entre caminos superficie no pisada por vehículos, pero donde se depositan los árboles cosechados.

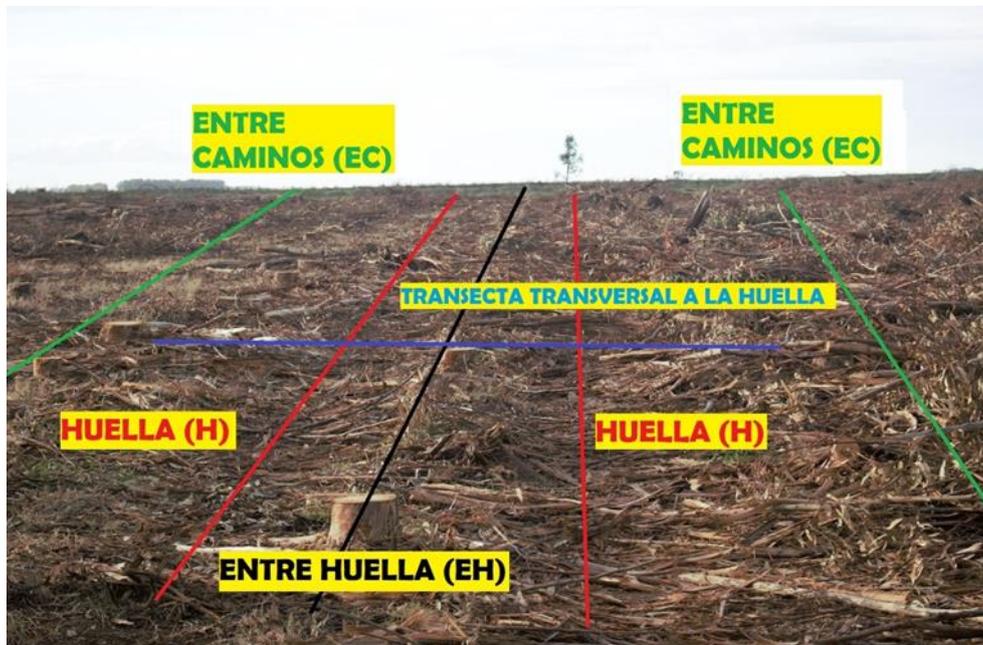


Figura 1. Esquema ilustrativo del ensayo. Autor de la foto: Merani, V.H.

Figura 1. Esquema ilustrativo do Experimento. Autor da foto: Merani, V.H.

2.1.1 Determinaciones

Confirmación de la serie: se realizó un pozo de prospección de 0,6 m de profundidad donde se contrastaron las características morfológicas descritas en las cartas del INTA (INTA Digital-Geo, 2024) con lo encontrado. Adicionalmente, se observó la presencia o no de raíces y de actividad microbiótica.

Resistencia mecánica a la penetración (RMP): se utilizó un penetrómetro de cono electrónico (FielScout SC900) para registrar los valores de RMP, acompañado de un perfil de humedad. En sentido longitudinal al avance de las máquinas se realizaron 40 mediciones cada 2 m en las posiciones H, EH y EC en la fecha 1 y 20 mediciones en la fecha 2. Complementariamente se construyó un gráfico de curvas de isoresistencia a la penetración del suelo (kPa) en función de la profundidad, el mismo se construyó por medio de tres transectas de 5 m de longitud, sobre las cuales se hicieron mediciones cada 0,15 m y hasta los 0,40 m de profundidad, las mismas se realizaron en sentido transversal del camino (Figura 1).

Tasa de Infiltración (I): La infiltración se midió en el sitio utilizando un infiltrómetro de tensión de 6,25 cm de radio (Perroux y White, 1988). Para cada tratamiento se realizaron cuatro repeticiones en sitios al azar dentro de cada parcela para cada tratamiento (H, EH y EC). Para asegurar un buen contacto hidráulico entre el dispositivo y el suelo, se extendió una capa de arena seca sobre la superficie del suelo la cual se uniformizó con una espátula. Las mediciones de infiltración se realizaron con tres tensiones de agua en el suelo, h (-6, -3 y 0 cm, aplicados en este orden y en el mismo lugar). Se realizaron observaciones del flujo continuo cada 5 min durante los primeros 30 min, y cada 10 min hasta que se alcanzó un flujo estacionario, lo que ocurrió a la hora de iniciada la tirada aproximadamente. A partir de los valores de infiltración, se calcularon los datos de estado estacionario de la curva de infiltración de agua en el suelo, K₀ y la conductividad hidráulica de campo en h=3 (K₃) y en h=6 (K₆) se calcularon siguiendo a Ankeny et al., (1991). Además, la macroporosidad conductora de agua (ϵ_{ma} , $r > 0,5$ mm) y la mesoporosidad conductora de agua (ϵ_{me} , $r = [0,25-$

0,5 mm]) se calcularon de acuerdo con Watson y Luxmoore (1986).

Densidad aparente (DA): mediante cilindros de volumen conocido, se determinó la densidad aparente del suelo a 3 profundidades: 0-0,1 m; 0,1-0,2 m y 0,2-0,3 m (Tabla 2).

Densidad máxima Próctor (DMP): se determinó la densidad máxima obtenida metodología Proctor (IRAM 10511, 1972). La prueba de Proctor proporciona un procedimiento ampliamente aceptado para estudiar la compactabilidad de suelos perturbados en un rango de contenidos de agua del suelo bajo una carga dinámica estandarizada, utilizada para caracterizar la resistencia de los suelos agrícolas a la compactación (Aragón et al., 2000). Como complemento de esta metodología se realizó la medición de RMP sobre las probetas de suelo compactadas, con penetrómetro de cono electrónico (FielScout SC900). Esta medición permite obtener el dato de RMP para la máxima compactabilidad del suelo con un valor de humedad determinado.

Compactación Relativa (CR): se calculó el índice de compactación relativa mediante el cociente entre DA y la DMP expresado como porcentaje. Este parámetro expresa el grado de compactación de los suelos.

Seis meses después de realizado el ensayo de realizaron nuevas mediciones de RMP y mediciones sobre el crecimiento de las cepas, Sobre estas estos se midieron número de brotes, diámetro de los mismos y altura total, también se evaluaron número de plantas muertas en una distancia determinada.

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado de un solo factor (transito), donde los tratamientos evaluados fueron Huella, Entre Huella y Entre caminos (todos con diferente nivel de transito). Se evaluaron 3 parcelas y en función de las variables de análisis el número de repeticiones dentro de cada parcela fue diferente, se tomaron 40 repeticiones para los valores de RMP de la fecha 1 y 20 valores para la fecha 2 (las diferencias son debidas a inconvenientes con el equipo), 4 repeticiones para el parámetro infiltración básica y 5 repeticiones para la densidad aparente. Para las variables biológicas se tomaron 10 plantas por parcela para su evaluación y 100 m lineales por parcela para evaluación de tocones muertos. Se realizó un análisis estadístico de ANOVA ($p < 0,05$) de todos los datos recolectados con test de significancia por Tukey utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2008).

Sistema y logística de cosecha: se utilizó el sistema de aprovechamiento de troncos cortos (cut-to-length). La maquinaria utilizada consistió en un harvester constituido por un maquina base Hyundai 220 LC-9S de 115,6 kW (155 HP) y 22250 kg de peso con orugas metálicas de 700 mm, equipado con un cabezal Waratah HTH 616C de 1970 kg, el mismo realiza in situ apeo desramado corte a medida y clasificación. La extracción se realizó con un tractor Valtra BT190 de 149 kW (200 HP) y 10450 kg, con carro autocargador de 12 t de capacidad y 4 ruedas.

Al momento de la cosecha el harvester se coloca a caballo sobre una fila de árboles sobre la que avanza extrayendo arboles de a 2 filas por lado y depositando los fustes trozados en la zona entre caminos. Para la extracción el tractor con el carro cargador circula sobre las huellas dejadas por la cosechadora, cargando la madera depositada, con un promedio de 7-8 entradas y salidas para terminar de extraer completamente la madera depositada entre las calles.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Suelo

Según el mapa de suelos del INTA el lote del ensayo se corresponde con la Unidad cartográfica Ne12 la cual comprende una Asociación con las series Necochea, engrosada (70%), La Otomana (20%), La Pandorga (10%). Dicha unidad posee una capacidad de Uso IIw e Índice de productividad 69,0_D. El suelo en la posición del ensayo se corresponde con la serie Necochea de esta Asociación ya que no presentaron horizontes E y se visualiza claramente un horizonte de transición AB entre los 30 y los 40 cm tal como se describe en las cartas de suelo del INTA (INTA Digital-Geo, 2024). El suelo presento abundantes raíces de diferentes tamaños en toda la zona de estudio, esto es esperable ya que al momento del ensayo la cosecha se había realizado dos semanas antes y las plantas se encontraban hasta ese momento en activo crecimiento. El suelo presentaba abundante nivel de cobertura muerta (100 %) tal como se puede observar en la Figura 1 y se visualizaban sobre estos la presencia de huellas producto del tránsito con la maquinaria.

Todas las variables evaluadas presentaron diferencias estadísticas (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de ANOVA con significancia para todas las variables analizadas.

Tabela 1. Valores de ANOVA com significância para todas as variáveis analisadas.

	F	p-valor
Altura brotes	4,7	0,0391
Calibre brotes	5,37	0,0223
Nº Brotes	4,69	0,04
RMP	37,95	<0,0001
Infiltración	7,76	0,0037
DA 0-10	25,66	0,0002
DA 10-20	26,91	0,0002
DA 20-30	28,98	0,0001
RMP x Fecha	H	400,69
	EC	287,12

3.2 RMP

En la Figura 2 podemos observar la distribución en corte de los valores RMP promedios de las tres transectas en la primera fecha de muestreo. La misma posee 5,7 m de ancho por 0,4 m de profundidad, este perfil de penetrometría fue realizado tomando muestras cada 0,1 m con 5 repeticiones por punto posteriormente se procesó por método de Kriging.

Se visualiza una zona central (2,25 m a 3,25 m aproximadamente) con valores de RPM en el rango de 3500-4000 kPa coincidente con el tratamiento EH. Estos valores podrían no ser consecuencia únicamente de la densificación del suelo ya que esta zona coincide con la línea de plantación y la misma se halla dominada por las raíces de los árboles, generando valores de RPM más elevados debido al

entrelazado de las mismas, pese a esto las posiciones a 0,1 m y 0,45 m también coinciden con filas de árboles y no presentan valores de RMP tan elevados, esto probablemente se deba a que no suman al entrelazado de raíces la presión compactante generada por el tránsito de las máquinas. A su vez, se pueden observar en posiciones aledañas a este centro, dos zonas definidas de 1,5-2 hasta 0,3 m de profundidad y 3,5-4,25 hasta 0,3 m de profundidad. Estas zonas presentan valores que van desde los 2000 kPa a los 4000 kPa y que coinciden con el tratamiento H. Por lo tanto, estos valores elevados de RMP pueden ser atribuidos al peso de la maquinaria utilizada y al excesivo tránsito durante la saca de la madera. (Mac Donagh et al., 2000; Kaczrowska-Dolowy, 2022; Picchio et al., 2020; Labelle et al., 2022).

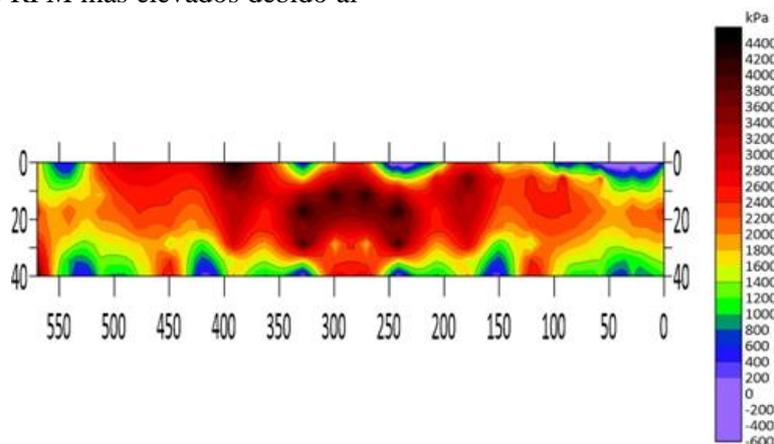


Figura 2. Representación gráfica de los valores de resistencia a la penetración en corte transversal al avance de las máquinas en la fecha 1. Escala de colores en kPa. Transecta de 5,7 m de ancho transversal al avance por 0,4 m de profundidad.

Figura 2. Representação gráfica dos valores de resistência à penetração em corte transversal ao avanço das máquinas na data 1. Escala de cores em kPa. Transeção de 5,7 m de largura transversal ao avanço por 0,4 m de profundidade.

En la Figura 3 se muestran los valores promedios de RMP en sentido longitudinal a la dirección de avance. Podemos observar que todos los tratamientos evaluados presentaron valores mayores a 2000 kPa de RMP desde los 0,05 m hasta los 0,4 m, presentando los tratamientos H y EH valores mayores respecto de EC. Estos valores fueron obtenidos dos semanas después de realizada la labor de cosecha y extracción. Cabe mencionarse que, si bien las zonas más afectadas por tránsito de maquinaria son los tratamientos H y EH, en el

tratamiento EC se acumularon los troncos durante la cosecha hasta la extracción, generando una presión sobre el suelo que podría ser causa de los valores de RMP. Cavichiolo et al. (2003) encontraron resultados similares. Sin embargo, los valores de RMP y profundidades fueron menores. Ello puede ser consecuencia de las diferencias en el peso de la maquinaria utilizada (Botta et al., 1998), número de pasadas (Jorajuría y Draghi, 1997) y estado de humedad del suelo (Raper y Erbach, 1990).

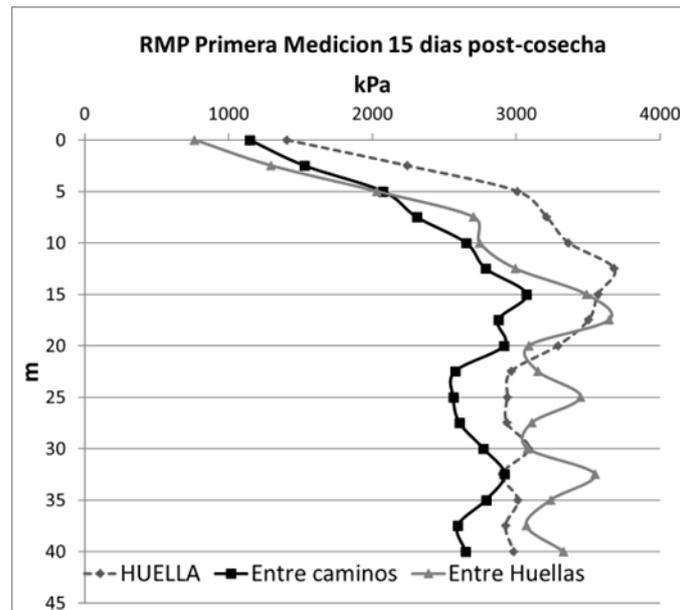


Figura 3. Valores de RMP para los tres tratamientos evaluados (Huella, Entre Huella y Entre Caminos) 2 semanas posteriores a la cosecha expresado en kPa hasta 0,4 m de profundidad.

Figura 3. Valores de RMP para os três tratamentos avaliados (Pista, Entre Pistas e Entre Caminhos) 2 semanas após as operações de colheita expressos em kPa até 0,4 m de profundidade.

En función de los datos obtenidos en la Figura 1 se decide no realizar mediciones de RMP en el tratamiento EH para las segundas mediciones, ya que las mismas se hallan muy afectadas por el entrelazado de raíces.

En la Figura 4 se muestran los resultados de RMP para los tratamientos H y EC en la fecha 1 y 2. Se puede observar que los valores obtenidos en las mediciones de la fecha 2 son muy inferiores a los obtenidos en la fecha 1, tanto para el tratamiento H como EC. Estos valores podrían explicarse por el crecimiento activo de las raíces. Si bien Ríos y Estigarribia (2018), mencionan que las descompactaciones biológicas solo podrían funcionar con RMP menores a 2.0 MPa, el crecimiento radical en el presente ensayo es

diferente al de los cultivos anuales con los que suele trabajarse. Por lo tanto, y debido a que las raíces ya se encuentran en el suelo compactado, son de mayor tamaño y pueden esperar el momento oportuno de humedad del suelo para continuar su crecimiento ayudando en el aflojamiento de los suelos. En ese sentido, Gaitán et al. (2005) indican que el hábito de arraigamiento en cuanto a forma, dirección y distribución de las raíces gruesas, tiende a estar bajo control genético, mientras que la intensidad del sistema radical, que está asociada con la distribución de raíces finas, es más sensible a las condiciones del suelo. A su vez, debe considerarse que se trata de raíces activas que tuvieron un periodo de tiempo de 6 meses sin ningún tipo de tránsito, condiciones que son difíciles de observar en producciones agrícolas.

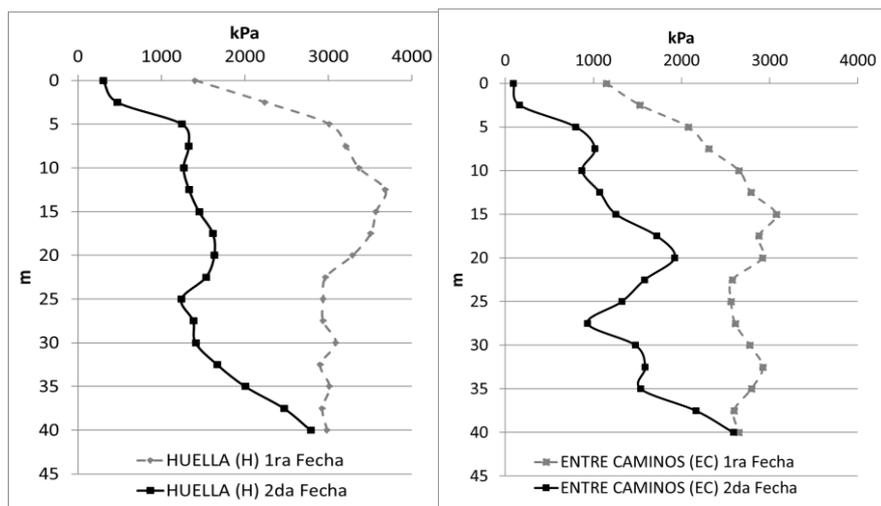


Figura 4. Valores de RMP en los tratamientos H y EC para los dos momentos de medición realizados (Fecha 1 y Fecha 2).

Figura 4. Valores de RMP nos tratamentos H e EC para os dois períodos de medição (Data 1 e Data 2).

Ninguno de los tratamientos (H y EC) mantuvo valores de RMP mayores a los 2000 kPa hasta los 0,35 m de profundidad en la segunda medición, realizada 6 meses posteriores a la cosecha. Los valores menores a 1500 kPa no serían restrictivos para el normal crecimiento de los vegetales. En función de esto se puede asumir que, una vez alcanzado los 6 meses desde la cosecha, los árboles recepados ya no verían restringido su crecimiento radicular por efecto de la compactación y los efectos de menor crecimiento se podrían atribuir al periodo de 6 meses entre la cosecha y la segunda evaluación realizada.

3.3 Densidad aparente y Compactación relativa (CR):

Proctor

La densidad aparente hallada posteriormente de la cosecha presenta valores elevados en las zonas de influencia del tránsito acercándose en el tratamiento H a los valores máximos medidos por la metodología de Proctor.

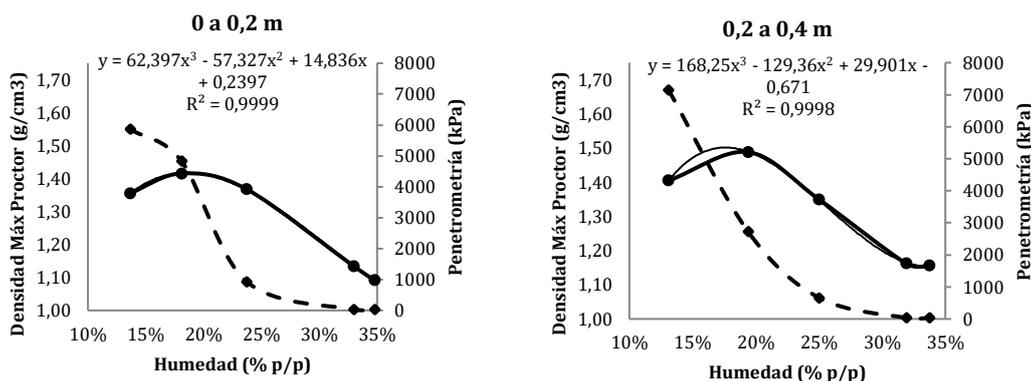


Figura 5. Evaluación de máxima compactabilidad en función de la humedad por metodología de Proctor (líneas enteras). Valores de resistencia mecánica a la penetración (RMP) en la probeta de Proctor para las diferentes humedades (líneas punteadas).

Figura 5. Avaliação da máxima compactabilidade em função da umidade pela metodologia de Proctor (linhas contínuas). Valores de resistência mecânica à penetração (RMP) na proveta de Proctor para diferentes umidades (linhas tracejadas).

Tabla 2. Densidad aparente del suelo en g cm^{-3} en 3 profundidades todas las áreas de evaluación. (Valores promedios de 5 mediciones). CR: porcentaje de compactación relativa en función de la máxima compactación proctor. Misma letra no representa diferencias significativas para $P = 0,05$.

Tabela 2. Densidade aparente do solo em g cm^{-3} em três profundidades em toda as áreas de avaliação. (Valores médios de cinco medições). RC: Percentual de compactação relativa em relação à compactação Proctor máxima. Mesma letra não são significativamente diferente em $P = 0,05$.

Posición	Profundidad (m)								
	0-0,1		0,1-0,2		0,2-0,3				
	DA	CR	DA	CR	DA	CR			
Huella	1,41	b	99%	1,38	b	97%	1,45	b	97%
Entre Huella	1,33	b	94%	1,35	b	95%	1,38	b	93%
Entre Camino	1,18	a	83%	1,20	a	84%	1,25	a	84%

La CR presento valores elevados en casi todas las posiciones. Zhao et al. (2010) analizaron el crecimiento en altura de plántulas de coníferas en sitios forestales perturbados y rehabilitados en Columbia Británica, Canadá, con respecto a la CR. Los resultados mostraron una reducción del crecimiento en altura del abeto de Douglas [*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Bessin) Franco], pino torcido (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud, var. *latifolia* Engelm.) y abeto blanco híbrido [*Picea glauca* (Moench) Voss \times *Picea engelmannii* Parry ex Engelm.] durante el período de uno a ocho temporadas de crecimiento cuando la CR de los sitios de prueba superó el rango de 0,72 a 0,87. Esto significa que en nuestro ensayo

los valores de CR se hallan muy cerca de la máxima compactación admisible, con una severa disminución de los poros de mayor tamaño, afectando al crecimiento de los cultivos (Von Wallis, 2013). En función de esto los valores obtenidos presentarían un alto grado de compactación de los suelos en H y EH incluso superiores a los obtenidos por Zhao et al. (2010)

EC es el único tratamiento con valores que podrían no generar efectos negativos en el crecimiento, pero los valores se hallan muy cercano a los límites, por lo que una evaluación en el largo plazo permitiría definir el límite de CR para estos suelos y este sistema de trabajo.

3.4 Infiltración

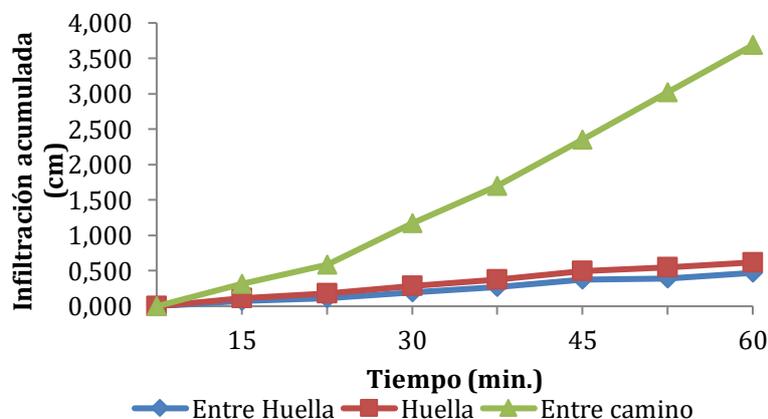


Figura 6. Valores de infiltración acumulada para las tres zonas de muestreo.

Figura 6. Valores de infiltração acumulada para as três zonas de amostragem.

Casi el 73 % del flujo saturado ocurre a través de grandes poros asociados con un intervalo de tensión $> 0,1$ cm. Clothier y White (1981) encontraron que casi el 48 % del flujo saturado a través de una arena fina ocurría a través de poros asociados con el rango de tensión de 0 a 4 cm. La contribución relativamente grande de los macroporos al flujo de agua en suelos de bosque probablemente se deba a una combinación de canales de raíces, canales de solución de esquisto erosionado, madrigueras de invertebrados y el desarrollo estructural de los materiales de la matriz del suelo. (Watson y Luxmoore, 1986), la pérdida de estos poros producto de la compactación por tránsito conlleva pérdidas en la infiltración del agua en el suelo y aumentos importantes de la escorrentía. Tal como se puede observar en la Figura 6.

3.5 Porosidad conductora de agua

En la Figura 7 podemos observar que la proporción de la porosidad conductora de agua fue afectada fuertemente por el tránsito, principalmente los poros de mayor tamaño. Es así que los poros de más de 1 mm dominan en las posiciones de EC y EH con más del 50 % del total, mientras que la posición H este valor es de menos de 25 % y la dominancia está dada por los poros de menos de 0,5 mm con 55 %, si tenemos en cuenta que en la situación EC (la más parecida a la previa a la cosecha) se hallaban en un porcentaje de 4 % esto significa un aumento de casi 13 veces con una reducción de los macro poros de 3 veces. Según Ferreras et al., (2007) Si los valores de CR son muy elevados (cerca del 90 %), como es el caso de este ensayo, significa que el suelo está muy cerca de la máxima compactación que puede admitir, con una severa disminución de los poros de mayor tamaño, afectando al crecimiento de los cultivos.

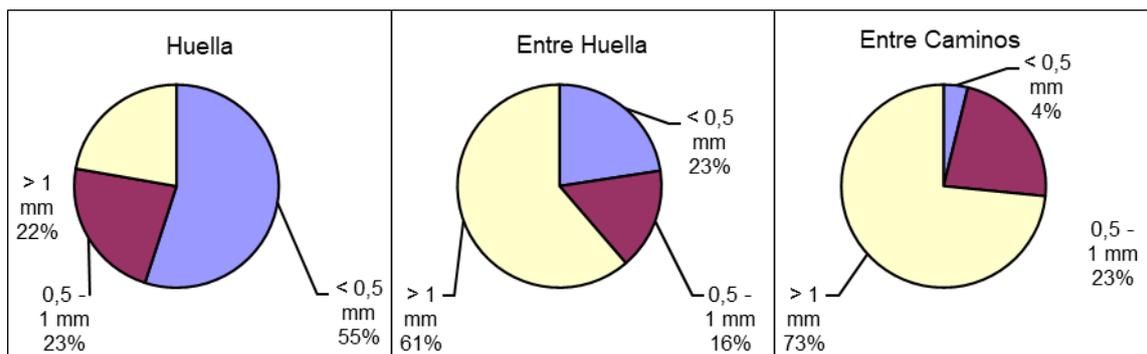


Figura 7. Tamaños de poro (%), estimados por metodología de infiltrometría con carga diferencial. Watson y Luxmoore (1986).

Figura 7. Tamanhos de poros (%), estimados pela metodologia de infiltrometria com pressão diferencial. Watson e Luxmoore (1986).

La reducción de macroporos dificultará el movimiento de agua en el suelo aumentando la escorrentía superficial desplazando milímetros de precipitación de las zonas altas a las más bajas del lote dificultando la acumulación de agua en los perfiles de la loma y media loma y saturando los bajos.

3.6 Crecimiento post-cosecha

El crecimiento post-cosecha se presenta en las Figuras 8 A, B, C y D. Se puede observar que todas las variables fueron afectadas por el tratamiento. La altura, número y calibre de los brotes fue significativamente menor en EH. A su vez, en dicho tratamiento se observa mayor número de tocones muertos. Correia et al. (1996) mencionan que las variables físicas de los suelos poseen un

efecto más marcado en el rendimiento final del eucalipto que las variables químicas. En este caso los aumentos en la RMP y la densidad aparente generan un efecto negativo en el movimiento de agua y la porosidad del suelo que reduciría el normal abastecimiento de agua del perfil afectando al cultivo. Las especies pioneras, como los eucaliptos, son consideradas poco resistentes al déficit hídrico. En *E. globulus* un déficit hídrico puede conducir a un potencial hídrico de $-3,0$ MPa disminuyó la tasa de producción de hojas y su biomasa, hasta un nuevo aporte de agua (Metcalf et al, 1990). Osorio et al (1998) demostraron que especies del género, *E. globulus* no muestra una estrategia de optimizar el crecimiento de la raíz asignando más biomasa a las raíces bajo condiciones de sequía, lo que evidencia escasa plasticidad fenotípica que afectarían en forma

negativa el normal rebrote de los árboles, por otro lado, menciona que encontraron que el estrés hídrico conducía a una reducción de la formación de ramas laterales y superficie foliar, atribuibles a un ajuste osmótico.

Independientemente del efecto directo sobre el cultivo por la reducción en la recarga hídrica del perfil, producto de la reducción de macro poros en el mismo, este fenómeno genera como consecuencia un aumento en la escorrentía, lo cual aumenta la erosión hídrica de los suelos y genera incrementos de agua en zonas no preparadas para su manejo.

Por otro lado, Laclau et al. (2001) mencionan que a partir de los primeros 20 cm de suelo se reduce la densidad de raíces en *Eucalyptus* spp., sin embargo, las capas mayores a 1 m de profundidad podrían contener una porción grande del total de

biomasa radicular en suelos arenosos (Bouillet et al., 2002; Pinheiro et al., 2016; Marmol et al., 2022). Las raíces finas (≤ 2 mm de diámetro), con función de absorción y transporte (Butler et al., 2010), en su gran mayoría se encuentran por debajo de los 50 cm de suelo. Pese a ello para los suelos más pesados, como los del ensayo, la distribución de raíces finas se ve afectada fuertemente por la capacidad de crecimiento en los periodos de humificación del suelo, dificultando el normal desarrollo de las mismas en suelos con limitantes en el contenido poroso y RMP elevada, producto de las compactaciones antrópicas. Por otro lado, los suelos de este ensayo presentan su mayor fertilidad en los primeros centímetros, por lo que la presencia de raíces finas con capacidad absorbente en ese estrato se vuelve fundamental.

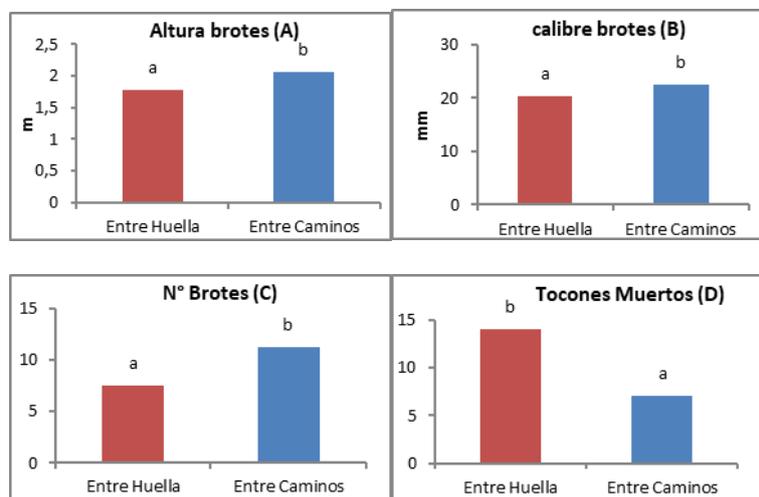


Figura 8. Efectos sobre el crecimiento del recepado para los tres tratamientos (H, EH, EC) seis meses después de la cosecha (Fecha 2)

Figura 8. Efeitos sobre o crescimento do toco para os três tratamentos (H, EH, EC), seis meses após a colheita (Data 2).

Está muy documentado que los primeros años post-implantación son determinantes en el rendimiento final de los montes en implantaciones convencionales (Toledo et al., 2003; Larocca et al., 2004; Garau et al., 2009). Pese a esto el manejo por renovales no posee este tipo de información, pero la presencia de más rebrotes y de mayor tamaño sería un factor de importante en la búsqueda de un mayor rendimiento del monte en m^3 , reduciendo lo más posible los periodos entre cortes.

En función de lo expuesto se vuelve de interés evaluar que parámetro del manejo (masa de los vehículos y carros, número de pasadas, estado del suelo etc.) posee más efecto sobre los daños negativos generados en los tocones y trabajar en la reducción de los mismos.

La expansión de los daños depende generalmente del método de operación forestal y de las máquinas utilizadas, principalmente de su peso, carga y número de pasadas (Picchio et al., 2020). Otro parámetro importante a tener en cuenta es la capacidad portante de los suelos producto de la plasticidad de los mismos y el contenido de humedad, es por ello que los suelos poseen su máxima susceptibilidad a la compactación en valores de humedad cercanos a 20 % (figura 4), valor coincidente o cercano a la capacidad de campo, por encima de estos valores se vuelven amasables y deformables generando huellados importantes y por debajo de estos valores son más resistentes a la deformación y compactación.

En por ello que es recomendable transitar con contenidos de humedad bajos y esperar para realizar

las labores de cosecha y saca el secado de los suelos post lluvias, de no ser posible es recomendable aumentar la cobertura de los suelos con material vegetal y reducir el número de pasadas por una misma vía ya que si bien la compactación se genera desde la primera pasada, las pasadas sucesivas sobre las vías de saca aumentan sustancialmente los niveles de compactación (Balbuena et al., 2000).

4 CONCLUSIONES

El tránsito de maquinaria en la cosecha forestal genera perturbaciones importantes en las condiciones físicas del suelo.

Los valores de RMP pueden ser revertidos por los procesos de crecimiento radicular de los Eucaliptus recepados en el corto-mediano plazo.

La modificación de las propiedades físicas del suelo producto de la cosecha mecanizada de los arboles afectan negativamente el rebrote en eucaliptus en suelos francos arcillo arenosos del SE bonaerense, pese a esto los efectos, pueden verse atenuados por el crecimiento desde las raíces de los tocones en sistemas de manejo de rebrote de cepa.

5 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa Nuevos Montes por permitirnos realizar el ensayo en sus lotes y por la cordialidad a lo largo del ensayo.

BIBLIOGRAFIA

AGOSTINI, M.D.L.Á.; MONTERUBBIANESI, M.G.; STUDDERT, G.A.; MAURETTE, S. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. **Ciencia del suelo**, v. 32, n. 2, p. 171-176, 2014.

ANKENY, M.D.; AHMED, M.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Simple Field Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 2, p. 467, 1991.

AROCA-FERNÁNDEZ, M.J.; BRAVO-FERNÁNDEZ, J.A.; GARCÍA-VIÑAS, J.I.; FERNÁNDEZ-YUSTE, J.A.; SERRADA, R. Forest soils compaction: better hoofs or rubber-tired. **Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales**, v. 45, n. 3, p. 37-58, 2019.

BALBUENA, R.H. ; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P.; MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p.453-459, 2000.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BOTTA, G.; JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. La compactación en suelos de baja capacidad portante. En: BALBUENA, R.H.; BENEZ, S.H.; JORAJURIA, D. (Ed) **Avances en el manejo de suelos y agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana**. La Plata, Argentina: UNLP, 1998. p. 2-9.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; M'BOU, T.; SAINT'ANDRÉ, L.; JOURDAN, C. Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus* clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. **Forest Ecology and Management**, v. 171, p. 16-57, 2002.

BUTLER, A.J.; BARBIER, N.; CERMAK, J.; KOLLER, J.; THOTNILY, C.; MCEVOY, C.; NICOLL, B.; PERKS, M.P.; GRACE, J.; MEIR, P. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. **Tree Physiology**, v. 30, p. 705-14, 2010.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425-433, 1990.

CASADO, J.P.; BALBUENA, R.H.; MANGHI, E.; MAC DONAGH, P.M Compactación del suelo y crecimiento inicial de *Eucalyptus viminalis* L. **Revista Yvyrareta**, v. 10, p. 48-53, 2000.

CAVICHIOLO, S.R.; DEDECEK, R.A.; GAVA, J.L. Avaliação do efeito do sistema de preparo em solos de diferentes texturas, na sua resistência mecânica e na produtividade da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 47, p. 83-98, 2003.

- CLOTHIER B.E.; WHITE I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 241-245, 1981.
- CORREIA, J.R.; COSTA, L.D.; NEVES, J.C.; CRUZ, C.D. Análise de trilha (“*Path analysis*”) no estudo do relacionamento entre características físicas e químicas do solo e a produtividade do eucalipto. **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 161-169, 1996.
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZÁLEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. **InfoStat versión 2013**. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>. 2013.
- FABIAO, A.; MADEIRA, M.; STEEN, E.; KÄTTERER, T.; RIBEIRO, C. Growth dynamic and spatial distribution of root mass in *Eucalyptus globulus* plantations in Portugal. In: PEREIRA, J.S.; PEREIRA, H. (ed). ***Eucalyptus for biomass production: the state of the art***. Brussels: CEC, 1994. p. 60-76.
- FERRERAS, L.; MAGRA, G.; BESSON, P.; KOVALEVSKI, E.; GRACIA, F. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. **Ciencia del Suelo**, v. 25, n. 2, p. 159-172, 2007.
- GABRIELS, D.; LOBO L.D. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. **Venesuelos**, v. 14, n. 1, p. 37-48, 2011.
- GAITÁN, J.J.; PENÓN, E.A.; COSTA, M.C. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. **Ciência Florestal**, v.15, p. 33-41, 2005.
- GARAU, A.M.; GHERSA, C.M.; LEMCOFF, J.H.; BARAÑAO, J.J. Weed in *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Muell) establishment: effects of competition on sapling growth and survivorship. **New Forests**, v. 37, p. 251-264, 2009.
- INTA DIGITAL-GEO. **Mapas de suelo escala 1:50000**. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Disponible en: <<https://geo.inta.gob.ar/es#3/-34.97/-55/>>. Acceso en: junio 2024.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. 1. ed. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, 2002. 498p.
- HÅKANSSON I.; REEDER R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil and Tillage Research**, v. 29, n. 2-3, p. 277-304, 1994.
- JORAJURÍIA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, n. 4, p. 261-265. 1997.
- KACZOROWSKA-DOLOWY, M.A. **Traffic and tillage effects on soil health and crop growth**. 2022. 222 f. Thesis of Doctor of Philosophy. Harper Adams University, Newport, Shropshire, TF10 8NB, UK.
- LABELLE, E.R.; HANSSON, L.; HOGBOM, L.; JOURGHOLAMI, M.; LASCHI, A. Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: a comprehensive review. **Current Forestry Reports**, v. 8, n. 1, p. 20-37, 2022.
- LACLAU J.P.; ARNAUD, J.P.; BOULLET, J.P.; RANGER, J. Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. **Tree Physiology**, v. 21, p. 129-36, 2001.
- LAROCCA, F.; DALLA TEA, F.; LUNA, A.; NEIFERT, M. Impacto de la compactación por tránsito de maquinaria en las vías de saca de cosecha forestal. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD CUBANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, 9., 2018, La Habana, Cuba. **Anais...** Disponible en: <<http://hdl.handle.net/20.500.12272/3136>>. Acceso en: junio 2024.
- LAROCCA, F.; DALLA TEA, F.; APARICIO, J.L. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestados en Entre Ríos y Corrientes. In: JORNADA FORESTAL DE ENTRE RÍOS, XIX, 2004. Concordia, Argentina. **Anais...** Concordia, Argentina: 2004. p. 1-16.
- LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2, p. 307-317, 1991.

- MAC DONAGH, P.; MAREK, M.; DA CUÑHA, M. Evaluación del impacto del tránsito en la cosecha de *Pinus* spp. en Misiones, Argentina. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE LA INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANIZATION – CISCO, 11., 2000, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, 2000.
- MÁRMOL, S.; BETANCOR, L.; FRANCIA, M.; HIRIGOYEN, A.; BIDEGAIN, M.P.; BLANCO, G.; PÉREZ, M. Verificación de exploración radicular profunda de *Eucalyptus grandis* hasta rocas sedimentarias pérmicas del noreste uruguayo. **Agrociencia Uruguay**, v. 26, e508, 2022. doi:10.31285/AGRO.26.508.
- METCALFE, J.C., DAVIES, W.J., PEREIRA, J.S. Leaf growth of *Eucalyptus globulus* seedlings under water deficits. **Tree Physiology**, v. 6, p. 221- 227, 1990.
- MUR, M.; BALBUENA, R.H. Compactación de un suelo Argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. **Ciencia del Suelo**, v. 32, n. 1, p. 1-12, 2014.
- O’SULLIVAN, M.F.; DICKSON, J.W.; CAMPBELL D.J. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 38, p. 137-148, 1987.
- OSORIO, J.; OSÓRIO, M.L.; CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S. Water deficits are more important in delaying growth than in changing patterns of carbon allocation in *Eucalyptus globulus*. **Tree Physiology**, v. 18, p. 363-373, 1998.
- PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for Disc Permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 5, p. 1205-1215, 1988.
- PICCHIO, R.; MEDERSKI, P.S.; TAVANKAR, F. How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? **Current Forestry Reports**, v. 6, p. 115-128, 2020.
- PINHEIRO, R.C.; DEUS JR, J.C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; ALÓ, L.L.; GUERRINI, I.A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.P. A fast exploration of very deep soil layers by *Eucalyptus* seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 366, p. 143-52, 2016.
- PRITCHETT, W.L. **Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento**. Noriega: Ed. Limusa, 1986. 643p.
- RAPER, R.L.; ERBACH, D.C. Prediction of soil stresses using the finite element method. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 3, p. 725-730, 1990.
- RÍOS, D.; ESTIGARRIBIA, A. Descompactación biológica, una alternativa de solución a la compactación del suelo. **Revista de Investigación Científica y Tecnológica**, v. 2, n. 2, p. 73-83, 2018.
- SILVA, C.E.; SALGADO, O.D.; GONZÁLEZ, B. Evaluación de la capacidad de rebrotes de dos especies arbóreas en el bosque tropical seco en Nandarola, Pacífico Sur. **La Calera**, v. 8, n. 11, p. 57-61, 2011.
- SMITH, D.L.O.; DICKSON, J.W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 46, p. 13-29, 1990
- THREADGILL, E.D. Residual tillage effects as determined by cone index. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 4, p. 859-863, 1982.
- TOLEDO, R.E.B.; VICTORIA, R.; BEZUTTE, A.J.; PITELLI, R.A.; AGUIAR, P.L.; VALLE, C.; ALVARENGA, S.F. Periodos de controle de *Brachiaria* sp. e seus reflexos na produtividade de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 63, p. 221-232, 2003.
- VON WALLIS, A. **Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandiuult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación del terreno forestal y bosque nativo**. 2013. 81 f. Tesis de Maestría (Magister em Ciencias de Suelo) – Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <<http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2013vonwallisalejandra>>.
- WATSON, K.W.; LUXMOORE, R.J. Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrimeter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 3, p. 578-582, 1986.
- ZHAO, Y.; KRZIC, M.; BULMER, C.E.; SCHMIDT, M.G.; SIMARD, M.G. Relative bulk density as a measure of compaction and its influence on tree height. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 9, p. 1724-17, 2010.