

Efecto del tránsito por cosecha sobre el suelo y desarrollo de *Populus deltoides* Marsh

Effect of harvesting transit on the soil and development of *Populus deltoides* Marsh

RAÚL M. MARLATS^{1,2}, ROBERTO H. BALBUENA¹, JORGE A. CLAVERIE¹, ANTONINO TERMINIELLO¹, JUAN P. CASADO¹, JORGE L. MARQUINA¹

¹Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, CC N° 31, 1900, La Plata, Argentina.

²Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Avenida Antártida Argentina 526, 1900 La Plata, Argentina.

SUMMARY

Field tests were carried out with the aim of evaluating harvest traffic effects on soil penetration resistance and plant growth of *Populus deltoides* Marsh. "Stoneville 66", "Catfish 2", "Harvard" (I-63/51) and "Onda" (I-72/51) clones were selected, with an equivalent stand density of 1.111 trees per hectare, growing on a typical Argiudol soil. A conventional tractor (2WD) of 73.5 kW and a pull type two-axle trailer plant were used. Four treatments were established in relation to three traffic intensities of 1,5 and 10 passages and non-trafficked lines between trees. The average height of each clone before the cut, stub survival, bud height reached after three years of passage and the penetration resistance for each treatment immediately after the passages and after three years of the passages were evaluated. The higher traffic intensity tested affected the survival and growth of *Populus deltoides*. Topsoil and subsoil compaction were detected one year after traffic treatments, and remained three years later in the higher traffic intensity treatment.

Key words: *Populus deltoides* Marsh, harvest machinery, soil penetrability, bud survival, growth.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tránsito de la maquinaria utilizada para la cosecha de madera, en la regeneración por tallar de plantaciones clonales de *Populus deltoides* Marsh. Los clones fueron "Stoneville 66", "Catfish 2", "Harvard" (I-63/51) y "Onda" (I-72/51), densidad equivalente a 1.111 árboles por hectárea, en un Argiudol típico. Se utilizó un tractor convencional (2WD) de 73,5 kW, formando un conjunto de tracción libre con un acoplado de dos ejes. La prueba estuvo conformada por 4 tratamientos, con tres intensidades de tránsito (1,5 y 10 pasadas del conjunto) y un testigo sin tránsito. Fueron evaluadas: la altura media dominante de cada clon antes del corte; la supervivencia de cepas; las alturas del brote dominante alcanzadas por cepa a los 3 años de realizadas las pasadas; resistencia a la penetración para cada tratamiento inmediatamente de realizadas las pasadas y a los 3 años de las mismas. El aumento del número de pasajes disturbó el suelo transitado, afectando consecuentemente la sobrevivencia y el crecimiento de los árboles. El factor identificado como disturbante fue la compactación superficial y subsuperficial que en las sendas con mayor intensidad de tránsito persistió a los tres años de realizada la experiencia.

Palabras claves: *Populus deltoides* Marsh, efecto cosecha, compactación del suelo, supervivencia de cepas y crecimiento.

INTRODUCCION

Entre los factores asociados a la pérdida de la sustentabilidad de cultivos forestales, se encuentran los sistemas empleados para la cosecha de madera. La aplicación del método equivocado suele oponerse a la tendencia internacional a la conservación de los ecosistemas forestales. En la mayoría de los casos, el transporte de la madera dentro del bosque se realiza sin tener en cuenta las cargas transmitidas al suelo y sus consecuencias en el medio, existiendo escasos estudios en el ámbito nacional del efecto del tránsito forestal sobre el sistema suelo-planta.

El tránsito con maquinaria en el terreno ha sido reconocido como la principal causa de la compactación del suelo (Taylor *et al.*, 1982). Chi *et al.* (1992) evaluaron el efecto causado por el uso de diferentes medidas de neumáticos en un conjunto tractor-acoplado, comprobando que el menor peso del eje causó la menor compactación, independientemente de que no existiesen variaciones en la presión de contacto rueda-suelo.

En general, la mayoría de los autores afirma que con el aumento del número de pasadas se incrementa la compactación. Muchos de ellos estudiaron la relación existente entre el número de pasadas, el aumento de la carga, el ancho de los neumáticos y sus efectos en la compactación (Gameda *et al.*; 1987, Håkansson y Reeder, 1994; Jorajuría *et al.*, 1997).

Smith y Dickson (1990) demostraron que la presión de contacto influye sobre la compactación superficial y que la compactación del subsuelo, por debajo de 400 mm de profundidad, está directamente influida por el peso de los vehículos, en forma independiente de la presión de contacto rueda-suelo. Håkansson *et al.* (1988) concluyeron que el riesgo de la compactación del subsuelo es principalmente definido por el peso de la rueda, aun cuando la presión de contacto fuese baja. Citaron, además, ejemplos de compactaciones por debajo de los 400 mm, producidas por cargas sobre el eje mayores a 6 Mg; determinaron también que casos de compactación a más de 500 mm de profundidad, producto de cargas mayores a 10 Mg/eje, podían perdurar sobre 7. Estos datos corresponden con la recomendación de Håkansson y Danfors (1981), de limitar el peso de un eje simple a no más de 6 Mg. para prevenir la compactación subsuperficial. En contraste con estos resultados, Aura (1983) determinó que, aún con cargas sobre el eje de 3 Mg,

se podía compactar un suelo arcilloso por debajo de los 0,20 m de capa arable, si las condiciones lo favorecían. Taylor *et al.* (1982), a partir de ensayos sobre pasadas múltiples, informaron que el mayor efecto de compactación para suelos sueltos, recién labrados, ocurrió durante el primer pasaje del conjunto.

Se podría inferir a partir de todos estos trabajos que el número de pasadas es uno de los factores principales, junto con la carga, el tipo de neumático y la presión de inflado, pero cuando el suelo se encuentra consolidado el grado de compactación puede ser similar para las distintas pasadas (Sánchez Girón Renedo, 1996).

A partir de lo precedentemente expresado, se destaca la importancia de definir con más detalle los factores responsables de la compactación, los procesos que llevan a ella y las consecuencias para el medio ambiente. Jorajuría y Draghi (2000) aplicaron diferentes intensidades de tránsito sobre un suelo con un contenido de humedad del 36% en el estrato superficial, cubierto con pastizales naturales, concluyendo que la profundidad, a la cual la variable peso manifiesta la mayor compactación, guarda una relación inversa con el número de pasadas del tractor. Además, la misma compactación en las capas más profundas pudo alcanzarse con muchas pasadas de un tractor liviano o con pocas pasadas de uno pesado.

El sitio y sus factores asociados fueron estudiados entre otros por Farnun *et al.* (1983) y Kozłowski *et al.* (1991). La comparación de los niveles de limitaciones de los sitios para la producción de los árboles pudo establecerse a través de variables demostradamente relacionadas con su clase de aptitud, resaltando particularmente en ese sentido a la variable altura alcanzada a cierta edad por los árboles dominantes de las especies de interés (Thrower y Goudie, 1992). Luego de establecida la variable predictora, los factores que fijan los niveles de su limitación deben ser identificados para decidir, mejorar o extender las áreas de cultivo (Schlatter y Gerding, 1995). Estos principios fueron comprobados en la validación de modelos predictivos de producción en plantaciones y rebrotes de álamos por Bratovich *et al.* (1996a y 1996b).

La hipótesis de trabajo expresa que el tránsito de maquinaria en la cosecha de madera perturba al sistema suelo-planta, comprometiendo el crecimiento de la masa forestal, y que el aumento del número de pasadas ocasiona trastornos cada vez mayores en el suelo transitado, afectando consecuentemente el crecimiento de los árboles.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tránsito de la maquinaria empleada en la cosecha de madera, sobre la penetrabilidad del suelo y la regeneración por tallares de plantaciones clonales de *Populus deltoides* Marsh.

MATERIALES Y METODOS

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Julio Hirschhorn, de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, localidad de Los Hornos, provincia de Buenos Aires (34°55' LS, 57°57' W, 15 m s n m).

1 CARACTERIZACION DE LA PLANTACION Y EL SITIO. El sistema arbóreo estuvo compuesto por plantaciones multiclonales de *Populus deltoides* Marsh, constituidas por el siguiente material (participando por partes iguales): "USA-Stoneville 66", "USA-Catfish 2", "Harvard" (I-63/51) y "Onda" (I-72/51), con una población inicial equivalente a 1.111 árboles por hectárea, a un distanciamiento de 3x3 metros.

El suelo fue clasificado como Argiudol típico, fina, illítica, térmica (Soil Taxonomy, 1992), relieve normal.

La temperatura máxima media del lugar es de 22,6°C, la mínima media 10,2°C, la máxima absoluta 42,7°C (diciembre) y la mínima absoluta -5,7°C (junio).

2 CARACTERIZACION DE LA MAQUINARIA UTILIZADA. Se utilizó un tractor de diseño convencional (2WD), de 73,5 kW de potencia, con una trocha de 2,1 m, a una velocidad de 1,5 ms⁻¹ formando un conjunto de tracción libre con un acoplado de dos ejes, cuyas características figuran en el cuadro 1. El área de contacto rueda-suelo fue determinado en el predio experimental, sobre el suelo a ser transitado, previo al inicio de los tratamientos de tránsito, según la metodología propuesta por Botta (1997).

3 EVALUACION Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. *Mediciones y adecuaciones previas.* Evaluación de la altura media dominante de cada clon antes del corte. El indicador utilizado fue el valor medio del cuartil superior de alturas totales. Apeo de la plantación con motosierra y extracción manual.

3.2. *Diseño experimental.* Aplicación para cada clon de un diseño experimental conformado por 4 tratamientos con tres intensidades de tránsito y un testigo sin tránsito (cuadro 2). Cada tratamiento tuvo 5 repeticiones con parcelas de 28 plantas. Las diferentes intensidades de tránsito fueron representadas por el número de pasadas del conjunto tractor-acoplado, que correspondieron a diferentes sistemas de extracción de madera. La caracterización de los tratamientos se expresa en el cuadro 2.

CUADRO 1

Características de los vehículos empleados durante la prueba.

Vehicle characteristics employed during the traffic trial.

	Tractor		Acoplado	
	Tren trasero	Tren delantero	Eje trasero	Eje delantero
Peso (Mg)	2,8	1,4	1,375	1,375
Volumen de carga total (m ³)			4,11	
Rodado (")	18.4*34	7.50*16	7,50*16	7,50*16
Presión de inflado (kPa)	128	210	280	280
Area de contacto rueda/suelo (m ²)	0.182	0.0646	0.0646	0.0646
Presión de contacto (kPa)	73	107	104.3	104.3
Ancho total (m)	2,10	2,10	2,10	2,10

CUADRO 2

Intensidades de tránsito consideradas en el diseño experimental.
Traffic intensities considered in the experimental design.

Tratamiento	Número de pasadas:	Intensidad de tránsito *Mg km ha ⁻¹
0P	Testigo sin tránsito	0,0
1P	Una pasada	23,2
5P	5 pasadas en la misma senda	116,0
10P	10 pasadas en la misma senda	232,0

3.3. *Variables indicadoras.* Supervivencia de cepas por conteo de plantas rebrotadas, al final de la primera estación de crecimiento posterior al corte y aplicación de los tratamientos. Para su comparación, los porcentajes de sobrevivencia fueron transformados a valores de la raíz cuadrada del porcentaje por el arco seno (Steel y Torrie, 1988). Se realizaron análisis de la varianza y el test de comparación de medias de Tukey.

- Crecimiento en altura de los brotes dominantes por cepa a los 1, 2 y 3 años de realizadas las pasadas.
- Contraste de las posiciones relativas por clon (según altura media dominante) al momento del corte de la plantación original (9 años) y al tercer año del rebrote.
- Medición de la resistencia a la penetración: se realizó con penetrómetro de cono (ASAE S.313.2) entre las líneas de árboles para 0, 1, 5 y 10 pasadas del conjunto tractor-acoplado, inmediatamente de realizado el pasaje y a los 3 años del mismo.
- Determinación de la humedad por el método gravimétrico para cada estrato de medición de la resistencia a la penetración

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Alturas medias dominantes alcanzadas por los clones en el momento del primer corte. Las alturas medias dominantes alcanzadas por cada clon antes del corte se expresan en el cuadro 3.

Como se observa en el cuadro 3, los clones Catfish 2 y Stoneville 66, en el momento del primer corte, a los 9 años de edad, se agruparon en el primer rango, mientras que Onda y Harvard apare-

cen en el último. Si se toma en cuenta lo señalado por Thrower y Goudie (1992), acerca de la vinculación de la altura alcanzada por los árboles de un rodal a cierta edad y la potencialidad productiva del sitio, posteriormente comprobada por Bratovich *et al.* (1996a) en plantaciones de álamo en ese mismo individuo suelo, la diferencia significativa en altura total media señaló la superioridad de adaptación de Stoneville 66 y de Catfish 2 para ese ambiente.

2. Supervivencia de cepas luego del corte según el número de pasadas. Al final de la primera estación de crecimiento, luego de realizadas las pasadas del conjunto tractor-acoplado se evaluó la supervivencia de las cepas por tratamiento (cuadro 4).

Tomando la totalidad de los clones, el número de pasadas aparece afectando la supervivencia de las cepas (cuadro 4). Esta respuesta supone una alteración de las condiciones del sitio que ha influido sobre los procesos de rebrote, relacionada al número de pasadas.

3. Supervivencia de cepas por clon luego de la primera estación de crecimiento. Las respuestas clonales de supervivencia de cepas sin discriminación del número de pasadas se observan en cuadro 5.

Al tomar particularmente la capacidad de supervivencia general por clon, sin discriminación de los tratamientos, el cultivar Stoneville 66 apareció como el de mayor resistencia (inicial por lo menos) a los disturbios ocasionados por el tránsito de maquinaria, en tanto Harvard presentó una significativa susceptibilidad. Farnum *et al.* (1983) señalaron como limitantes de los rebrotes a las condiciones ambientales desfavorables, en las que destacó la tensión de oxígeno, y la disponibilidad de agua, especialmente en los estratos superficial y subsuperficial del suelo, donde se encuentra la

CUADRO 3

Test de rango de Tukey (alpha £ 0,05)* para clones según alturas medias dominantes (AMD) a los 9 años.
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** for clones according to an average of dominant heights at nine years.

Clones	Catfish 2	Stoneville 66	Onda (I- 72/51)	Harvard (I- 63/51)
AMD (m)	17,50 a	17,40 a	16,00 be	15,70 c

* Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 ** Common letters grouped treatments with no significant differences.

CUADRO 4

Test de Tukey (alpha £ 0,05)* para supervivencia de cepas para la totalidad de los clones según el número de pasadas.
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** for stump survival of all clones related to traffic intensities (or number of passes).

N° de pasadas	0	1	5	10
% de supervivencia	68,87 a	61,07 ab	61,07 ab	50,77 b

* Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 ** Common letters grouped treatments with no significant differences.

CUADRO 5

Test de Tukey (alpha £ 0,05)* para supervivencia de cepas por clon.
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** for stump survival by clones.

Clones	Stoneville 66	Onda	Catfish 2	Harvard
% de supervivencia	86,11 a	61,36 b	53,73 b	46,04 c

* Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 ** Common letters grouped treatments with no significant differences.

mayor cantidad de raíces fisiológicamente activas. Kozlowski *et al.* (1991) coincidieron y agregaron factores internos asociados a esos disturbios como los balances de hormonas y carbohidratos disponibles para desencadenar los procesos de rebrotes. San Miguel *et al.* (1992) trabajando sobre una importante cantidad de clones, determinaron que dentro de las especies de *Populus*, la supervivencia de cepas era una aptitud clonal. Estos antecedentes indican que son varios los factores que pueden haber condicionado los resultados obtenidos en el presente trabajo.

4. Supervivencia clonal según el número de pasadas. Los resultados de la respuesta clonal de supervivencia por clon al número de pasadas se expresan en el cuadro 6.

La reacción clonal al número de pasadas aparece en todos los casos, incidiendo en los resultados de supervivencia. La perturbación sucede fuertemente en los cultivares Catfish 2 y Harvard, en tanto, en Stoneville 66 y Onda, además de producirse diferencias con los testigos, estas ocurren también aumentando con el número de pasadas. En el caso del Harvard, se generó un resultado no

esperado, las 5 pasadas tuvieron menor supervivencia que las 10 pasadas. No se encuentran argumentos fuertes para explicar estos resultados; habría que repetir el experimento con un mayor control espacial.

En todo caso, además de la capacidad individual también hallada por San Miguel *et al.* (1992), se registró una disminución de la capacidad de rebrotar, que puede relacionarse a cierta situación ambiental creada por la intensidad de tránsito, coincidiendo con lo encontrado por Farnum *et al.* (1983) y Kozlowski *et al.* (1991), respecto de factores externos y su repercusión interna en los procesos de rebrote.

5. Crecimiento registrado luego de la tercera estación de crecimiento. Los resultados de las al-

turas y diámetros alcanzados por los rebrotes al finalizar la tercera estación de crecimiento se expresan en el cuadro 7.

En el cuadro 7, se observa un posicionamiento diferente a los resultados de la adaptación referidos en el Cuadro 3 para alturas medias dominantes (AMD). En el tratamiento testigo, el Stoneville 66 y el Harvard se comportan como lo hicieron a los 9 años. El Catfish y el Onda se encuentran en posiciones diferentes a lo expuesto en el cuadro 3. Pero es prematuro inferir si se repetirán las ubicaciones encontradas al noveno año, en el momento del primer corte, pues, según Bratovich *et al.* (1996 b), para un sitio similar y los mismos clones, el tiempo proporcional para alcanzar el ordenamiento final en los comportamientos de los

CUADRO 6

Test de Tukey (alpha £ 0,05)* para supervivencia de cepas por clon según el número de pasadas.
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** for stump survival for each clone according to the number of passes.

Número de Pasadas/Clones	Stoneville 66 (unidades)	Onda	Catfish 2	Harvard
0p	90,00 a	69,67 a	74,44 a	65,88 a
1p	90,00 a	62,44 b	51,18 b	55,24 b
5p	90,00 a	60,00 b	45,69 bc	25,70 d
10p	74,44 b	53,25 c	43,62 c	37,35 c

* Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 ** Common letters grouped treatments with no significative differences.

CUADRO 7

Test de Tukey (alpha £ 0,05)* para alturas dominantes (AMD) y diámetros a la altura del pecho (DAP) de los rebrotes a los 3 años de las pasadas.
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** 3 years after passes for dominant height (AMD) and diameter at breast high (DAP).

Clones Tratamientos	Stoneville 66		Catfish 2		Onda (I- 72/51)		Harvard (I- 63/51)	
	AMD	DAP	AMD	DAP	AMD	DAP	AM D	DAP
0p	8,58 a	7,71 b	7,07 a	6,26 a	8,41 a	9,50 a	6,70 a	7,39 a
1p	8,16 b	9,83 a	7,15 a	6,74 a	7,22 b	7,11 b	6,26 a	5,48 b
5p	8,25 b	8,95 b	7,13 a	6,72 a	7,68 b	7,94 b	6,10 a	8,27 a
10p	8,39 b	8,60 b	7,20 a	6,98 a	7,00 b	7,92 b	5,62 b	4,96 b

* Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 ** Common letters grouped treatments with no significative differences.

estimadores analizados osciló entre el 50 y el 60% de los turnos de corta en la Argentina (10 a 12 años), según ello, recién a partir del 5° al 6° años los posicionamientos serían los definitivos. Esto es válido para el resto de los tratamientos, aunque en una primera instancia, el clon Harvard para las 10 pasadas manifestó un comportamiento significativamente más bajo que en el resto de las alternativas probadas.

Con respecto a los diámetros alcanzados por los brotes dominantes, el estadio de coexistencia con los otros rebrotes de la misma cepa hace aconsejable una desestimación momentánea de este indicador, pues está influido por el actual nivel de competencia. Esta situación fue comprobada por Bratovich *et al.* (1997) al comparar la evolución de la competencia de las áreas basales individuales de los rebrotes por cepa, entre el primero y el segundo corte en *Populus x deltoides* Marsh cv "Harvard" (I-63/51), sus registros demostraron claramente las consecuencias que el número de rebrotes producía sobre el DAP promedio por guía y los brotes dominantes.

Tomando supervivencia de cepas y alturas de los brotes dominantes, el tránsito de maquinaria ha producido efectos, aunque en distintos grados y sus causas deben ser precisadas, y de acuerdo con Schlatter y Gerding (1995) se deberían fijar los niveles de limitación al cultivo y resolverlos para mejorar la producción de las áreas involucradas.

6. Caracterización mecánica del suelo inmediatamente de efectuados los tratamientos y tres años después. Dentro de las posibles causas, fue evaluada la resistencia a la penetración en el suelo de cada tratamiento (cuadro 8).

Hubo significancia de la interacción entre tratamientos y profundidades (estratos de medición) por lo que se procedió a realizar el análisis para cada uno de los estratos evaluados. No se detectaron diferencias en el porcentaje de humedad para cada estrato de medición entre los distintos tratamientos de tránsito, por lo que fue posible comparar los resultados de resistencia a la penetración de los mismos en cada estrato considerado. Los valores de la resistencia a la penetración, inmediatamente después de aplicados los tratamientos con relación al testigo, se observan en el cuadro 8. En el rango de profundidades evaluadas en esta instancia de medición, los incrementos en resistencia a la penetración fueron más importantes a nivel superficial. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Smith y Dickson (1990) y Håkansson y Danfors (1981). Coincidentes con las cargas por eje del tractor y del acoplado utilizados, inferiores al valor de 6 Mg indicado por Håkansson *et al.* (1988) que produciría compactación por debajo de los 400 mm de profundidad. Los mayores efectos estuvieron por encima de esta profundidad y es posible relacionarlos con las presiones de contacto rueda-suelo, superiores a 100 kPa en 3 de los 4 ejes del conjunto tractor-acoplado.

Con respecto al número de pasadas sobre el terreno, a mayor número, se incrementó la profundidad a la cual es posible encontrar diferencias con el testigo. Esto resulta coincidente con los resultados de Chi *et al.* (1992) y Jorajuría *et al.* (1997), en relación con el incremento de la compactación subsuperficial con el número de pasadas, en forma independiente de la presión superficial; la similitud de resultado aparece para el tratamien-

CUADRO 8

Test de Tukey (alpha £ 0,05)* Valores de resistencia a la penetración (kPa) según el número de pasadas y la profundidad
 Tukey range test (alpha £ 0.05)** Penetration resistance values (kPa) in relation to number of passes and depth.

Tratamientos	0 mm	76,2 mm	152,4 mm	228,6 mm	304,8 mm	381,0mm
0p	323,8 a	673,4 a	941,9 a	1.143,2 a	1.041,8 a	972,3 a
1p	403,4 b	725,4 a	979,3 a	1.224,3 a	962,4 a	929,2 a
5p	486,8 c	922,3 b	1.219,7 b	1.289,6 a	1.010,8 a	919,2 a
10p	569,5 d	1.040,1 c	1.341,2 b	1.504,8 b	1.321,3 b	1.129,5 b

Letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.
 Common letters grouped treatments with no significative differences.

to de 10 pasadas del conjunto, puesto que los valores de resistencia a la penetración a 300 mm de profundidad y a 400 mm de profundidad para 1 y 5 pasajes mostraron un pequeño decrecimiento con respecto al testigo. Esto podría deberse en parte al contenido de humedad del primer rango de profundidad estudiado, el cual resultó muy cercano a la humedad del suelo en la que se alcanza el mayor grado de compactación. Por otra parte, dada la capacidad portante del suelo al momento de realizarse los ensayos y a las características texturales del mismo, el mayor efecto de compactación no ocurrió durante el primer pasaje del conjunto como determinaron Taylor *et al.* (1982) para suelos sueltos recién labrados, salvo para la resistencia a la penetración a nivel de superficie. Entre 76 mm y 152 mm, el grado de compactación resultó aproximadamente similar en promedio para cada pasaje, tal como fue sugerido por Sánchez Girón Renedo (1996). Por lo expuesto, si bien es aceptado que la mayor parte de los cambios en el estado de compactación del suelo ocurren en los primeros pasajes, los daños inducidos por el pasaje múltiple de los vehículos en profundidad se producen fundamentalmente cuando se alcanza el número de diez pasadas sobre la misma senda.

A los 3 años de realizadas las pasadas, se evaluó en cada tratamiento la persistencia del grado de compactación (cuadro 9).

El análisis entre los tratamientos de tránsito, para las distintas profundidades sobre el sector transitado por las ruedas del conjunto tractor-acoplado (cuadro 8), revela diferencias significativas entre el tratamiento con 1 pasada sobre el suelo y el de

10 pasadas para la totalidad de las profundidades hasta los 500 mm.

Por lo expuesto, tal como lo indicaron Håkansson & Reeder (1994), el tránsito repetido en la misma senda fue determinante de los daños en la estructura del suelo en profundidad en los aspectos físico-mecánicos (pérdida de poros gruesos y secundarios). La persistencia de estos daños a nivel subsuperficial, tal como se desprende de los resultados alcanzados a 3 años de haberse realizado los trabajos experimentales, implica riesgos en el desarrollo posterior de plantaciones forestales, al limitar la capacidad de exploración radicular, si es que no se efectúan trabajos de descompactación profunda del suelo.

De acuerdo a los resultados de los cuadros 7 y 8, merece destacarse que el número de pasadas sobre el terreno, correspondientes a la mayor intensidad de tránsito, tal como fuera afirmado por Jorajuría *et al.* (1997), produjo modificaciones en el estado físico mecánico del suelo a nivel subsuperficial, independientemente de que la masa sobre cada eje tanto del tractor como del acoplado fuesen inferiores a 6 Mg, valor indicado por Smith & Dickson (1990), Håkansson *et al.* (1988) y Håkansson & Danfors (1981) como requerido para producir compactación por debajo de los 400 mm de profundidad. Esto ratifica lo puntualizado por Aura (1983), en cuanto a las posibilidades de compactar el suelo por debajo de 200 mm de profundidad, aun con masas de 3 Mg. Sin embargo, dichos resultados se limitan a modificaciones en los primeros 300 mm de profundidad, sobre suelos con labores de roturación frecuentes y por lo tanto

CUADRO 9

Test de Tukey ($\alpha \leq 0,05$)* para valores índice de cono (kPa) cada 100 mm de los tratamientos luego de los 3 años de las pasadas.

Tukey range test ($\alpha \leq 0,05$)** for cone index values (kPa) every 100 mm of treatments after three years.

Trat	0-100 mm	101-200 mm	201-300 mm	301-400 mm	401-500 mm	501-600 mm
0p	723,60 a	678,90 a	783,40 a	899,90 a	1.042,80 a	1.656,71 a
1p	726,12 a	824,79 a	774,79 a	836,90 a	1.136,10 a	1.832,14 b
5p	764,47 ab	850,87 a	956,60 b	925,66 ab	1.318,62 ab	1.532,93 a
10p	887,29 b	1.087,56 b	1.059,00 b	978,35 b	1.357,79 b	1.822,89 b

* Letras iguales en cada columna agrupan tratamientos sin diferencias significativas.

** Common letters in every one column grouped treatments with no significant differences.

de baja estructuración. Por otra parte, en la primera instancia de medición no fue posible detectar lo que concluyeran Jorajuría *et al.* (1997), que el mayor aumento relativo de resistencia a la penetración tuviese una relación inversa con el número de pasadas. En cambio, los resultados concuerdan con lo expresado por Gameda *et al.* (1987) en lo referente al incremento del grado de compactación y la mayor profundidad de la capa compactada, en la medida que se incrementó el número de pasadas por la misma senda. Esto adquiere relevancia, si se toma en cuenta, que la masa/eje del tractor y el acoplado resultó inferior a los 3 Mg. Por otra parte, surge claramente que los mayores aumentos relativos de la resistencia a la penetración ocurrieron a nivel superficial.

En cuanto a los estratos superiores, hasta 200 mm de profundidad, más cercanos a la humedad de mayor compactabilidad del suelo al momento de realizarse los tratamientos de tránsito, aparecen como los menos afectados luego de pasados 3 años, contrariamente a lo encontrado en la primera instancia de medición, con diferencias solamente para el tratamiento de mayor intensidad de tránsito. Los tratamientos de 1 y 5 pasajes sobre el terreno no alcanzaron diferencias significativas con el testigo sin tránsito, lo cual podría atribuirse, en este caso, a los procesos de humectación y desecación, como así también a la mayor bioactividad del suelo a nivel superficial, en concordancia con lo expresado por Alakuku (1997).

En acuerdo con el análisis de los resultados efectuados, los riesgos de compactación subsuperficial del terreno existen aún con cargas/eje inferiores a las citadas habitualmente del orden de los 6 Mg. Los estratos afectados con cargas un 50% inferiores a las mismas fueron detectables aún 3 años después entre 400 y 500 mm de profundidad. Esto debe atribuirse entonces a las pasadas sucesivas sobre la misma senda, no alcanzando cuando se realizan 10 pasadas sobre el terreno la reducción de la masa/eje para producir compactación subsuperficial. Todo ello resulta coincidente con los resultados de Jorajuría y Draghi (2000), destacándose que la capacidad portante del suelo en los ensayos de estos investigadores era sensiblemente inferior a las del presente ensayo, siendo posible visualizar la presencia de capas compactadas a profundidades entre los 300 y los 460 mm de profundidad. A ello debe sumarse que las modifica-

ciones en el estado mecánico del suelo a nivel superficial persisten también para el tratamiento de mayor intensidad de tránsito, ocasionando riesgos para el normal crecimiento de las especies vegetales, sin que los agentes biológicos y los procesos edáficos puedan atemperarlas, tal como ocurre cuando el número de pasadas fue restringido a 1 ó 5. En este aspecto, también aparece el número de diez pasajes del conjunto como valor crítico para la persistencia de la compactación superficial y subsuperficial del suelo.

La principal consecuencia de la intensidad de tránsito fue la disminución de la supervivencia de las cepas; esta situación es comprometida cuando se utiliza el método de tallar para la regeneración del bosque, pues la decisión de emplear ese método o una nueva plantación depende en parte del número de cepas rebrotadas que permitan conseguir una producción aceptable.

Según lo comprobado, el tránsito repetido en una misma senda, producto del proceso de cosecha y extracción de la madera, causó efectos sobre las plantaciones forestales, los cuales podrían relacionarse tanto con la compactación superficial del suelo en el corto plazo como por su incidencia en la compactación subsuperficial, aun cuando las operaciones se realizaron con bajas cargas sobre el eje de los vehículos utilizados.

CONCLUSIONES

El tránsito de maquinaria durante la cosecha afectó la sobrevivencia de las cepas de *Populus deltoides*, disminuyendo su capacidad de rebrotar.

La capacidad de sobrevivir fue diferente según los clones de *Populus deltoides* indicando diferente aptitud clonal.

La altura de los brotes dominantes también acusó el efecto del tránsito de la maquinaria. La causa se puede encontrar en una acción sobre la estructura del suelo, en forma de una compactación que aumenta la resistencia a la penetración radicular.

El efecto de la compactación es mayor mientras más frecuentes son las pasadas y su efecto es más importante en el suelo a nivel superficial.

La compactación se proyectó en su efecto a profundidades mayores a 400 mm siendo mayor con cargas más altas en cuanto a la profundidad alcanzada y a consecuencias.

BIBLIOGRAFIA

- ALAKUKU, L. 1997. Long-term soil compaction due to high axle load traffic. Tesis doctoral. Agricultural Research Centre of Finly Institute of Crop and Soil Science. Vammlan Kirjapaino Oy, 461 p.
- ASAE. STANDARDS OF THE ASAE. 1992. S.313.2 Soil cone penetrometer. American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan.
- AURA, E. 1983. "Soil compaction by the tractor and its effects on soil porosity". *Journal of Scientific Agricultural Society of Finly* 55: 91-107.
- BOTTA, G. 1997. Armonización del peso y rodado del tractor para reducir la compactación del suelo. Ms. Sc. Tesis. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina, 61 pp. Inédito.
- BRATOVICH, R., G. DENEGRI, R.M. MARLATS. 1996a. "Evaluación de la estimación del volumen obtenido por la utilización de la altura Pressler y la eficiencia de su determinación mediante relascopio". *Revista Ciencia y Técnica Forestal*, AFOA, Buenos Aires. Vol L: 35-42.
- BRATOVICH, R., R.M. MARLATS, H. MIKELAITES. 1996b. "Relación juvenil-adulto de crecimientos en alturas, diámetros y volúmenes de clones provenientes de cruzamientos controlados inter e intraspecíficos de *Populus* sp. L". *Revista de la Facultad de Agronomía* 101(1): 7-13.
- BRATOVICH, R.A., J. ARCE, A. GENNARI, R.M. MARLATS. 1997. Comparación del área basal individual entre el primero y el segundo corte en *Populus x deltoides* Marsh cv "Harvard" (I-63/51) para dos fechas de aprovechamiento. Actas del 2^{do} Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Posadas, Misiones, Argentina. Nacional.
- CHI, L.S., S. TESSIER, C. LAGÈ. 1992. "Finite element modelling of soil compaction by liquid manure spreaders". *Transactions of the ASAE* 36 (3): 637-644.
- FARNUM P., R. TIMMIS, J. KULP. 1983. "Biotechnology of Forest Yield" *Sciences* 219: 694-702.
- GAMEDA, S., G.S.V. RAGHAVAN, E. MCKYES, R. THERIAULT. 1987. "Subsoil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects". *Soil & Tillage Research* 10:113-122, 1987.
- HÅKANSSON, I., B. DANFORS. 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: Proc. 7th Int. Conf. of ISTVS, Canada, Editor: Int. Soc. for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS), Hanover, NH, USA.
- HÅKANSSON, I., W.B. VOORHEES & H. RILEY. 1988. "Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes". *Soil & Tillage Research* 11: 239-282.
- HÅKANSSON, I., R.C. REEDER. 1994. "Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response". *Soil & Tillage Research* 29: 277-304.
- JORAJURIA, D., L. DRAGHI, A. ARAGON. 1997. "The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassly", *Soil & Tillage Research* 41: 1-12.
- JORAJURIA, D., L. DRAGHI (2000). "Sobrecompactación del suelo agrícola Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4 (3): 445-452.
- KOZŁOWSKI, T.T., P.J. KRAMER, S.G. PALLARDY. 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press, pp. 13-15.
- SANCHEZ GIRON RENEDO, V. 1996. Compactación del suelo agrícola. En *Dinámica y Mecánica de suelos*. Ediciones Agrotécnicas S.L., Madrid: 269-303.
- SAN MIGUEL, A., J. SAN MIGUEL, S. YAGÜE. 1992. Tallares de chopo a turno corto. Proceedings de la 19^a Sesión de la Comisión Internacional del álamo. Zaragoza, España. II: 152.
- SCHLATTER, J., B. GERDING. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. Actas Simposio IUFRO para Cono Sur Sudamericano. Manejo nutritivo de plantaciones forestales. Valdivia Chile: 1-16.
- SMITH, D.L.O., J.W. DICKSON. 1990. "The contribution of vehicle weight and ground pressure to soil compaction". *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: 13-29.
- SOIL TAXONOMY. 1992. Key to Soil taxonomy. Soil Survey Staff. AID. U.S. D.A.S.M.S.S. Technical Monograph N° 19. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- STEEL, R.G.D., J.H. TORRIE. 1988. *Principles and procedures of statistics. A biometer approach*. Edit MacGraw-Hill, Inc. USA :581-582
- TAYLOR, J., E. BURT, N. BAILEY. 1982. Multipass behavior of a pneumatic tyre in tilled soils. ASAE Paper N° 79:1549.
- THROWER, J., J. GOUDIE. 1992. Development of Height-age and Site index Functions for Even-aged Interior Douglas-Fir in British Columbia. Research Note N° 109. B.C. Ministry of Forests. Forest Science Research Branch. 22 pp.