

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE CARGAS SOBRE UN SUELO ALFISOL CON DIFERENTES NIVELES DE HUMEDAD<sup>1</sup>

## Stress evaluation on a alfisol soil with different humidity content

Achim Ellies Sch.<sup>2</sup> y Ricardo Smith R.<sup>2</sup>

### ABSTRACT

The effect of stress distribution in soils with different moisture content applied during harvesting under forest was determined on a sandy loam Alfisol, in the Coastal Mountains, Yumbel, Chile. Transducers inserted in the soil were used to determine stress distribution. Concentration factor, pore size distribution, bearing capacity and internal cohesion was determined on wheels tracts and inalterate sites. The soil can either react more or less stable, according to moisture content. The greatest changes were on pore system under wet conditions. When dry, compaction is very low, but with a tendency to pore distribution changes. Bearing capacity and internal cohesion decrease slowly. The concentration factor is  $< 3$ , and the pressure bulb shown a horizontal orientation. The greatest settlement with 120 mm from a original soil column of 750 mm occur by wheeling in spring, more than 54% of coarse pore volume was lost. Internal cohesion and bearing capacity increased on 45% in the compacted soil under this condition. The penetration of pressure bulb was vertical with a concentration factor  $\cong 5$ . The results support the idea that each wheeling has to be limited to periods where the stress attenuation in the soil is capable to resist applied external forces.

**Key words:** Stress distribution, alteration of porosity, bearing capacity, concentration factor.

### INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha aumentado el peso y la potencia de los tractores agrícolas y maquinarias de cosecha forestal. Al mejorar la relación potencia:peso se induce a la utilización de estos equipos, cuando el suelo mantiene aún un alto contenido de humedad. El resultado fue la compactación de suelos que, originalmente eran muy sueltos y presentaban un elevado potencial de arraigamiento.

La compactación de un suelo equivale a la reducción de su profundidad, y a una disminución del volumen arraigable, lo cual impide desarrollar el potencial de crecimiento del vegetal (Kinney *et al.*, 1982).

El monto de deformación de un suelo estructurado depende de la presión efectiva, del tipo de carga aplicada y de su resistencia a la deformación. Cualquier deformación implica un cambio en la distribución y continuidad del sistema poroso, a nivel intra como extraagregados. La porosidad total disminuye y en términos cualitativos los poros finos aumentan en desmedro de los gruesos, disminuyendo la conductividad hidráulica, el potencial redox y la difusión de iones (Sommer, 1979; Ellies *et al.*, 1994).

<sup>1</sup>Recepción de originales: 01 de octubre de 1997.

Financiado por el proyecto FONDECYT 1970301.

<sup>2</sup>Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Casilla 567, Valdivia, Chile.

E-mail: aellies@valdivia.uca.uach.cl

El suelo tiene una capacidad de soporte variable que depende del contenido de humedad; debido a ello el efecto de una misma presión ejercida por una maquinaria es variable. La compactación involucra la destrucción de la estructura. Esta es anisotrópica en un suelo no intervenido, pero con un manejo degradante el medio se homogeneiza, tendiendo a la isotropía; la estructura se transforma en masiva o de grano simple. Con la compactación se genera también una estructura laminar con un sistema poroso de orientación horizontal (Ellies y Hartge, 1990).

El asentamiento producido por cargas se traduce en una menor aireación y capacidad de almacenamiento de agua. Durante el estío se acentúan las sequías, y en la estación lluviosa aumenta el escurrimiento superficial, debido a la baja conductividad hidráulica y velocidad de infiltración, lo cual potencia la erosión. Las pérdidas de calidad de sitio de un suelo afectan el rendimiento vegetal. En estudios con maíz, las reducciones en el rendimiento producidas por la compactación oscilan entre un 13 a 50% (Kinney *et al.*, 1982).

En explotaciones forestales con cortas a tala rasa, las huellas alcanzan de 600 a 900 m/ha, ocupando de un 20 a 40% de la superficie cosechada (Gayoso *et al.*, 1991), pero el área total influenciada por el tráfico de la maquinaria puede llegar hasta un 80% (Wästerlund, 1992). En las huellas, la densidad aparente incrementa en 1,85 veces, por esta razón la velocidad de crecimiento expresada como la altura de los árboles en estos sitios en la rotación siguiente llega sólo hasta un 50%, en comparación a sitios no intervenidos. Debido al rápido ciclo de las rotaciones de pino o eucalipto se genera un problema acumulativo (Wästerlund, 1992). Es común subsolar estos suelos, pero la restitución de los poros gruesos no llega a más del 50% (Möhring, 1970) y sólo abarcan la línea de la plantación. El resto de la superficie se compacta aún más por los pesados tractores que arrastran al subsolador. Las subsoluciones tiene un efecto efímero debido a que en posteriores prácticas silvícolas se tras-

ladan las estratas compactadas a profundidades mayores donde es más difícil soltarlas. La pérdida en la productividad producida por compactación se ha tratado de compensar con la aplicación de mayores dosis de fertilizantes, sin solucionar el problema real que es de origen físico.

En la presente investigación se analiza la transmisión de presiones en el suelo, producidas por la maquinaria de cosecha forestal, con distintos contenidos de humedad, y los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo Alfisol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se efectuaron en un suelo de la serie San Esteban (Alfisol), ubicado en la Cordillera de la Costa, cerca de Yumbel, provincia de Bio Bio (Long. Oeste 73°18' Lat. Sur 37°07'), en una plantación de pino (*Pinus radiata*). Las determinaciones se realizaron durante el estío en cuatro sitios: uno con un perfil totalmente seco (condición de verano); un sitio sometido a un riego por aspersión durante cinco días quedando el suelo superficial mojado (60-75% de saturación) y el subsuelo húmedo (condición de otoño); un tercer sitio saturado (> 90% de saturación) después de 20 días de riego (condición de invierno); y un cuarto sitio húmedo en la superficie (40- 60% de saturación) y saturado en profundidad al realizar las mediciones cinco días después de un riego prolongado por 15 días (condición de primavera).

La cuantificación de la distribución de las presiones verticales ejercidas por la maquinaria sobre el suelo se efectuó mediante 16 celdas transductoras de registro de presión unidimensional. Las celdas se instalaron horizontalmente desde la pared de una calicata por estratas de 10 cm, hasta una profundidad de 70 cm, y separadas entre sí por 20 cm en cada estrata. Las celdas estaban conectadas a un módulo colector de datos múltiple (PERO MEC-32) y éste a su vez a un ordenador. Este sistema permite registrar 20

observaciones por segundo en cada celda (Ellies *et al.*, 1996). En las superficies sobre las celdas instaladas transitó una maquinaria cargada, de cuatro ejes y de 30 t de peso.

Encada sitio o condición de humedad se procedió a determinar el área efectiva de sustentación de la carga, con el objeto de determinar la presión efectiva. Antes y después del tránsito de la maquinaria se efectuó una caracterización físico-mecánica por estrata del suelo. Se determinó la capacidad de soporte, resistencia al corte y la distribución por tamaño del espacio poroso, tanto en las huellas como fuera de ellas, para cada condición de humedad. Las determinaciones físico-mecánicas se efectuaron con cinco repeticiones por estrata de suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La textura del suelo analizado oscila entre franco arenosa a franco limo-arenosa. Suelos con esta

textura son débilmente agregados y presentan una alta susceptibilidad a la compactación (Horn, 1997). La Figura 1 detalla los cambios volumétricos que experimentan los primeros 750 mm del suelo, por efecto del tránsito de maquinaria de cosecha forestal, para distintas condiciones de humedad. En esta figura la participación de las distintas fracciones de poros se representa como una longitud. Cuando el suelo se encuentra seco en toda su profundidad, el tráfico prácticamente no cambia el espacio poroso, es decir, el asentamiento es bajo (< 5 mm). Sin embargo, se insinúa una redistribución en el tamaño de los poros, se reducen los poros gruesos o secundarios (> 10  $\mu\text{m}$   $\varnothing$ ) que disminuyen cerca de 18 mm sobre la columna de suelo en referencia e incrementan los poros medios (10 - 0,2  $\mu\text{m}$   $\varnothing$ ) y los poros finos (< 0,2  $\mu\text{m}$   $\varnothing$ ) en 13 mm.

El tráfico sobre un suelo húmedo en la superficie y seco en profundidad, situación que se presenta a inicio de otoño, produce un notable asentamien-

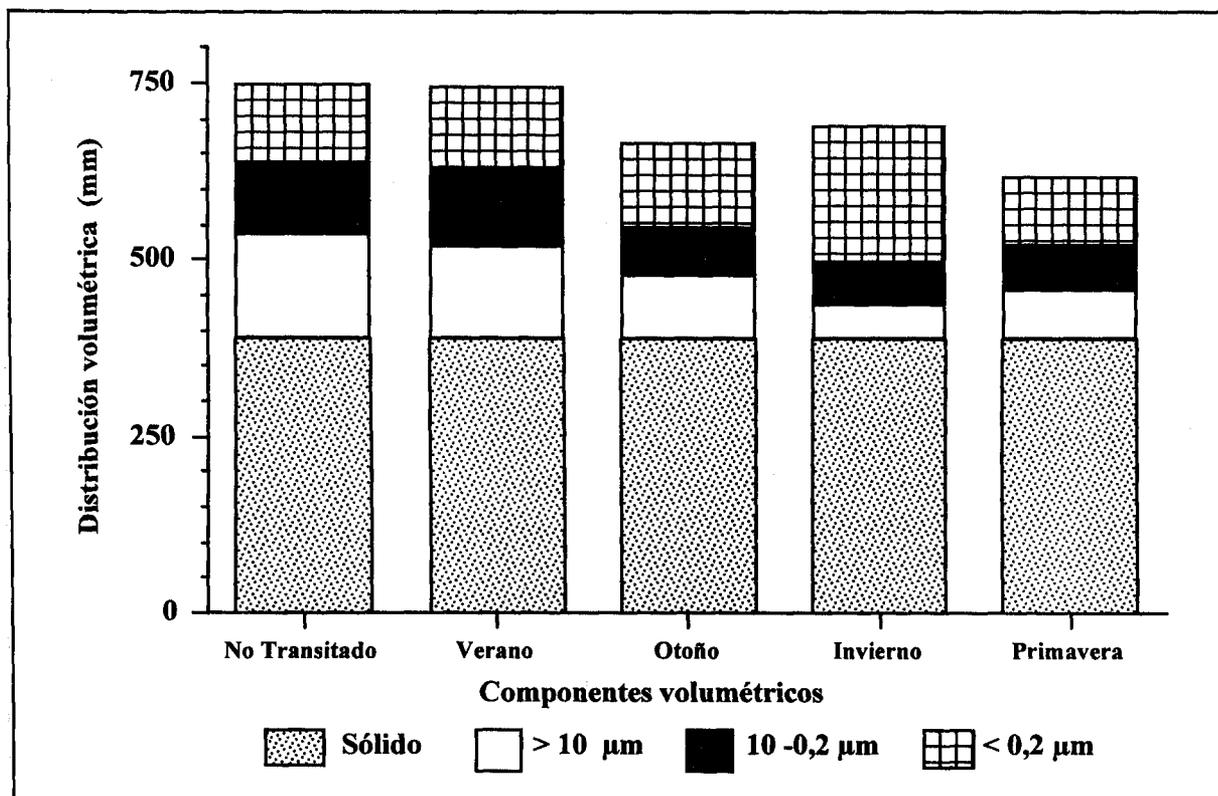


Figura 1. Asentamiento y distribución por tamaño de poros de un suelo con una profundidad inicial de 750 mm.  
Figure 1. Settlement and pore size distribution in a soil with an initial depth of 750 mm.

to o compactación del suelo en las huellas (81 mm). La reducción de volumen sólo puede ocurrir a expensas del volumen poroso. La pérdida de volumen en los poros, tiene una componente cualitativa, ésta ocurre principalmente a expensas de los poros gruesos, los cuales disminuyen en más de 38% en comparación al sitio no transitado.

El tráfico sobre un suelo seco en la superficie y mojado en profundidad (condición a fines de la primavera) produce el mayor asentamiento (120 mm). Este es cercano a un 16% del volumen total del suelo, considerado sobre una profundidad de referencia de 750 mm. En estas condiciones se produce el mayor cambio cualitativo del sistema poroso. Los poros gruesos dependiendo de la estructura se reducen en más de un 54%. Esto indica que la dispersión de la carga es más efectiva cuando el subsuelo se encuentra más seco como ocurre a inicio del otoño.

El tránsito sobre un suelo saturado (invierno) no consolida en la misma magnitud al suelo, que cuando éste se encuentra parcialmente húmedo.

El asentamiento llega sólo a 60 mm. El suelo no se puede comprimir más porque el espacio poroso se encuentra lleno con agua. El tránsito sobre un suelo saturado implica más huellas profundas y un levantamiento del suelo a orillas de éstas, es decir, un amasado o batido de este. Esto homogeneiza al suelo, los poros secundarios se destruyen en un 65%, paralelamente incrementa en un 30% la porosidad primaria o fina ( $< 0,2 \mu\text{m } \emptyset$ ).

En la Figura 2 se señala la modificación de la resistencia mecánica del suelo al ser sometido con una carga bajo distintos regímenes de humedad. Las propiedades mecánicas del sitio no traficado sirven como base de referencia para indicar la dirección y el monto de estas modificaciones. Después de una compactación aumenta la capacidad de soporte y la cohesión interna del suelo; es decir, el suelo adquiere una mayor estabilidad mecánica, a expensas del espacio poroso grueso o arraigable. La capacidad de soporte decrece en 37 kPa y la cohesión interna en 22 kPa, cuando el suelo se trafica en condiciones secas (verano). Esto se debe a que el material

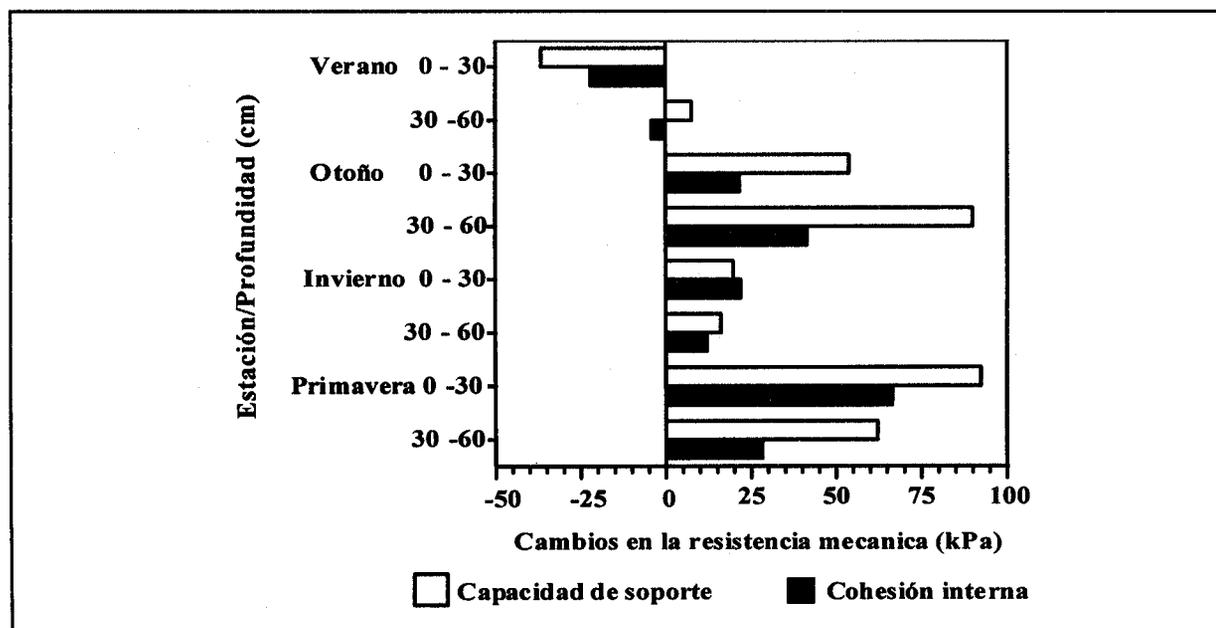


Figura 2. Modificaciones estacionales en la capacidad de soporte y de la cohesión inducida por el tráfico (parcela no transitada como base de referencia).

Figure 2. Season variations of bearing capacity and soil cohesion by wheeling (site without wheeling was the reference).

edáfico cohesionado es resquebrajado, lo que conlleva la disminución de la cohesión en la matriz.

La capacidad de soporte del suelo superficial incrementa después de la compactación en las estratas parcialmente saturadas con agua. En la condición de otoño la capacidad de soporte de la estrata superficial aumenta en 54 kPa y en profundidad en 90 kPa. Al aumentar el asentamiento debido a una mayor humedad incrementa la resistencia mecánica. En una condición de humedad extrema (invierno) el aumento en la capacidad de soporte es moderado, sólo 20 kPa en la estrata superficial y 16 kPa en la más profunda. El exceso de agua no permite la compactación o acercamiento entre las partículas, para lograr una mayor cohesión del suelo.

Un incremento en la resistencia mecánica del suelo debe analizarse también desde el punto de vista del potencial de arraigabilidad. Con una mayor resistencia mecánica aumenta la resistencia al arraigamiento e incrementan exponencialmente las necesidades de oxígeno (Barley, 1963),

la limitación en el crecimiento radical y con ello la productividad del sitio, sin embargo, se debe más a la mayor necesidad de oxígeno que a la resistencia propiamente tal (Horn *et al.*, 1995).

El tráfico induce a una pérdida del espacio poroso grueso, pero probablemente existe un cambio en la orientación de los poros; éstos pasan de un sentido vertical a otro horizontal, ya que el tráfico favorece la estructura laminar. Esto va en desmedro de la capacidad y renovación del aire en el suelo.

Los cambios que experimenta el factor de concentración en un mismo suelo con distintos contenidos de humedad se presentan en la Figura 3. El factor de concentración describe la forma cómo se distribuyen y disipan las líneas de tensión que penetran en el suelo por efecto de una carga. Éste es <3 cuando la orientación de estas líneas de fuerza es preferentemente horizontal y se disipan cerca de la superficie del suelo, es decir, el suelo es resistente y duro. Un factor alto indica que la orientación de las líneas de fuerza es alrededor de un eje vertical sin ex-

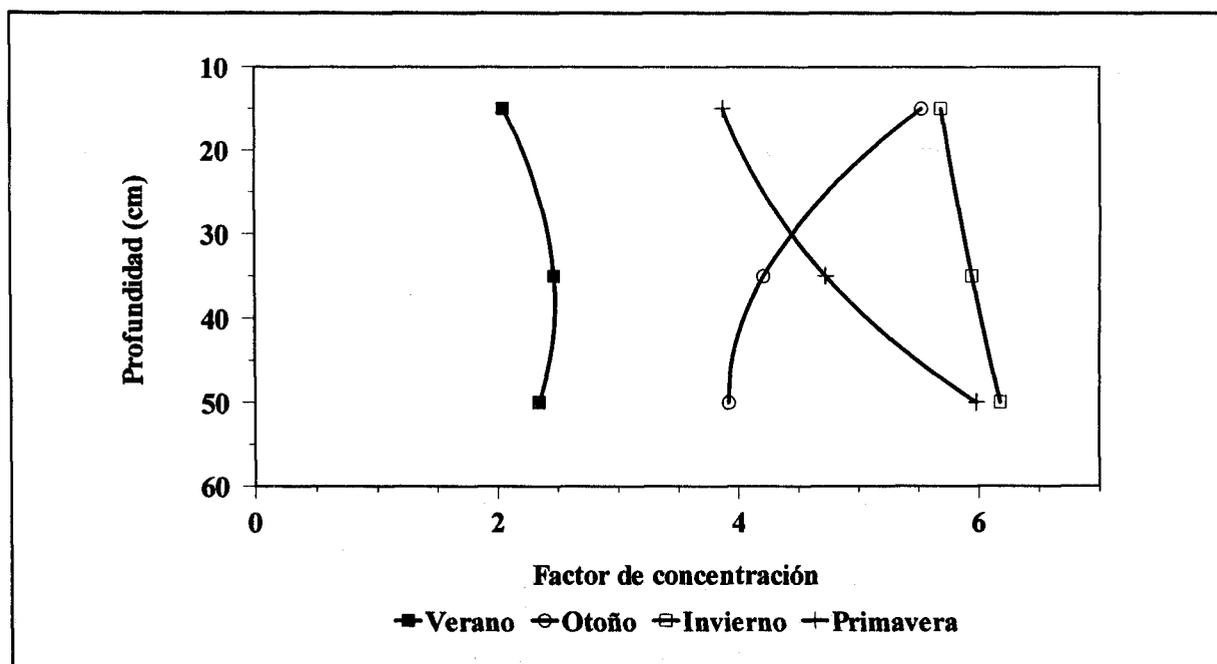


Figura 3. Factor de concentración en el perfil de un suelo según estación del año.  
 Figure 3. Concentration factor in a soil profile in function of the season.

pansión lateral, es decir, el suelo es muy blando. Con el valor 3 la distribución y disipación de las líneas de fuerza es semejante para ambos sentidos (Hartge y Horn, 1991). Se aprecia en la figura que el factor de concentración aumenta con un incremento del contenido de humedad del suelo. Es decir, las líneas de presión producidas por una carga se concentran alrededor del eje vertical, donde profundizan en el suelo. En estas circunstancias, las modificaciones del sistema poroso comprometen hasta las estratas más profundas del suelo. En el suelo seco los factores de concentración son pequeños ( $< 2,4$ ) y se conservan constantes en profundidad, lo que implica que el suelo es muy rígido y la disipación de las fuerzas se produce alrededor de un eje horizontal. Cuando el suelo es húmedo en la superficie y seco en profundidad (otoño) el factor es alto en la superficie ( $\cong 5,5$ ) y pequeños en profundidad ( $\cong 4,0$ ), es decir, las líneas de fuerza recién se disipan horizontalmente en profundidad.

La Figura 4 representa los bulbos de presión en el suelo con distinto contenido de humedad. La forma y penetración de este bulbo depende de la capacidad de soporte. La penetración aumenta en profundidad cuando el suelo se encuentra más húmedo. Cuando la magnitud de la tensión ejercida por una carga sobre el suelo supera a la capacidad de soporte, las partículas entran en movimiento y se reorientan. En un suelo seco el bulbo de penetración de las fuerzas de presión es plano y las tensiones son grandes cerca a la superficie; esto compromete a un escaso volumen de suelo. Al incrementar la humedad, los bulbos de presión penetran a mayores profundi-

dades, y un mayor volumen de suelo participa en sostener la carga, aun cuando los valores absolutos de la tensión en la superficie pueden ser más bajos.

El bulbo de presión del suelo para la condición de verano es aplanado y en la condición de otoño y primavera se desarrolla en profundidad. En el suelo saturado no incrementa mucho en su tamaño, porque la distribución de las cargas tiende a ser más uniforme hacia todas las direcciones, es decir, uniformes asemejando una distribución hidráulica.

### CONCLUSIONES

El tráfico de equipos pesados sobre el suelo, especialmente cuando está húmedo, produce su asentamiento.

En la condición primaveral se producen las mayores pérdidas de espacio poroso, cuando el subsuelo permanece húmedo.

Grandes presiones ejercidas sobre el suelo destruyen principalmente a la porosidad gruesa. La pérdida de la porosidad gruesa aumentan mientras más alto es el contenido de humedad. Después de una compactación incrementa la capacidad de soporte y la cohesión interna del suelo.

Los factores de concentración aumentan en las estratas más húmedas del suelo, lo cual se refleja en una mayor profundidad de penetración de las isolíneas de tensión.

### RESUMEN

Se evaluó el efecto de las tensiones ejercidas por el peso de la maquinaria de cosecha forestal en distintas condiciones de humedad en un suelo Alfisol de la Cordillera de la Costa, cerca de Yumbel, Chile. La distribución de las tensiones se determinó con transductores insertados en el

suelo. Sobre las huellas y áreas no alteradas se determinó el factor de concentración, distribución del espacio poroso por tamaño, capacidad de soporte y cohesión interna. El suelo reacciona con la carga con más o menos estabilidad según su contenido de humedad. Los mayores cambios

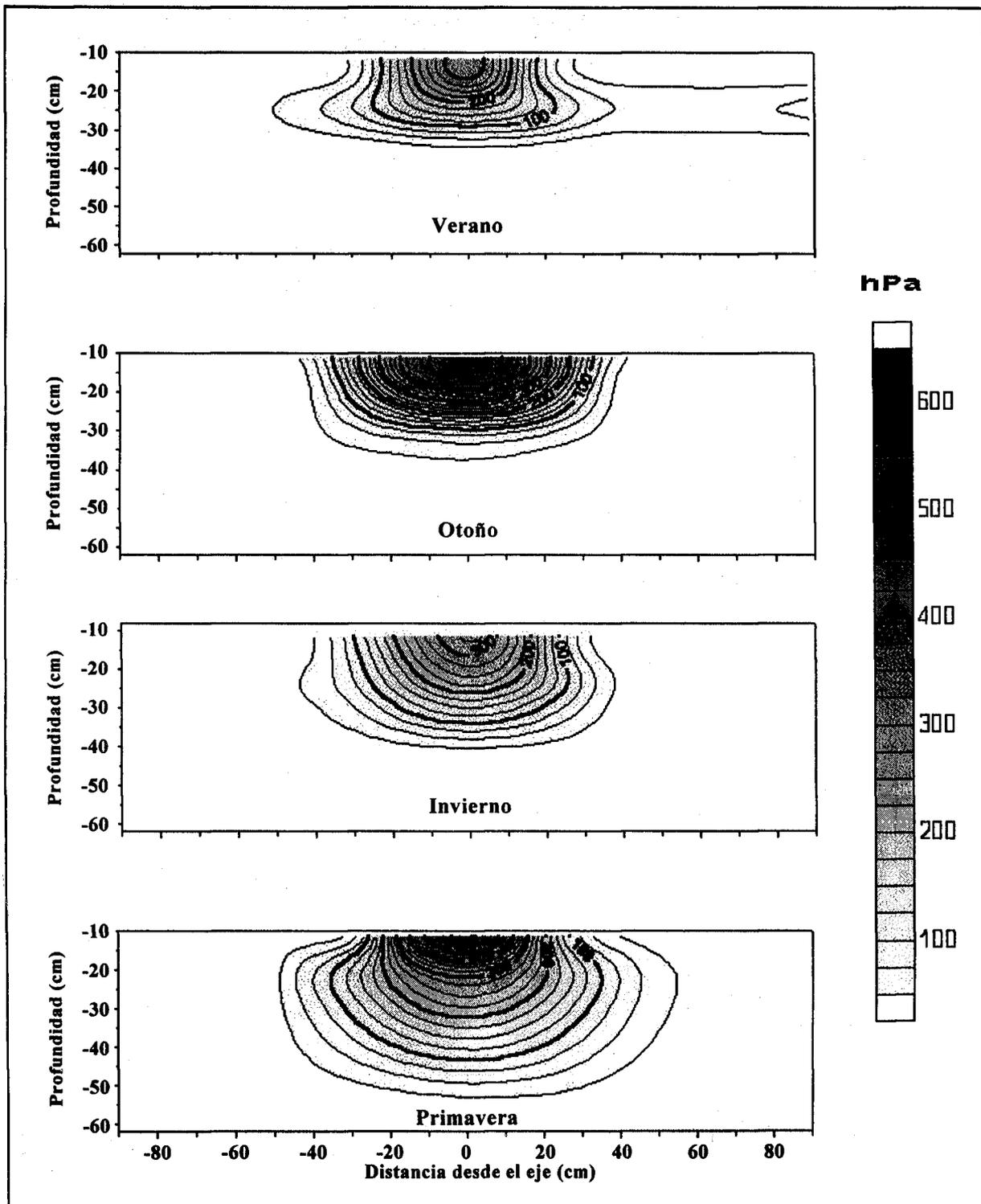


Figura 4. Bulbos de presión (hPa) producidos por una carga en un suelo con distintos contenidos de humedad.  
 Figure 4. Pressure bulbs (hPa) produced under stress in a soil with different water contents.

en el sistema poroso se producen cuando el suelo se encuentra más húmedo. Cuando está seco la compactación es menor y se insinúan leves cambios en la distribución por tamaño de los poros. La capacidad de soporte y la cohesión interna disminuye levemente. Cuando el factor de concentración es  $< 3$ , el bulbo de penetración de las fuerzas tiene una orientación horizontal. El mayor asentamiento con 120 mm se produce de una columna de 750 mm, al traficar en la primavera, perdiendo hasta 54% de la porosidad gruesa del suelo. La cohesión interna y la capacidad de

soporte incrementan en un 45% en un suelo compactado. La penetración del bulbo de fuerza es vertical con un factor de concentración  $\cong 5$ . Los resultados señalan que el tráfico debe limitarse a períodos cuando el suelo sea capaz de generar una mayor resistencia a la acción de fuerzas externas.

**Palabras claves:** Distribución de tensiones, alteración de la porosidad, capacidad de soporte, coeficiente de concentración.

### LITERATURA CITADA

- BARLEY, K.P. 1963. Influence of soil strength on growth of roots. *Soil. Sci.* 6: 175-180.
- ELLIES, A. UND HARTGE, K.H. 1990. Erfassung der Gefügeveränderung infolge Inkulturnahme von Sekundärurwald in Südchile durch Multivarianzanalysen. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung.* 31: 380-388.
- ELLIES, A., RAMÍREZ, C., MAC DONALD, R. Y FIGUEROA, H. 1994. Modificaciones estructurales por efecto del tiempo de uso en un Hapludand. *Agro Sur* 22(1): 23-32.
- GAYOSO, J., IROUMÉ, A. Y ELLIES, A. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. *In: Actas III Taller de Producción.* Fundación Chile. Grupo de Producción Forestal, Concepción, Chile. p. 101-122.
- HARTGE, K.H. UND HORN, R. 1991. Einführung in die Bodenphysik. Enke Stuttgart, Alemania. 303 p.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. AND VAN OUWERKERK, C. 1995. Compressibility of arable soils and its effects on ecological and environmental processes. *Soil Tillage Res.* 35: 23-36.
- HORN, R. 1997. Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by compaction and surface sealing. *In: Blume et al. Soil Sustainability and Effects on the Environment.* ECOMED, Landsberg, Alemania. p. 78-85.
- KINNEY, G.; ERBACH, D. AND BERN, J. 1982. Soil strain under three tractor configurations. *American Society of Agricultural Engineers.* 35 (2): 1-5.
- MÖHRING, D. 1970. Forest soil improvement through cultivation. *Journal of Forestry* 15: 328-331.
- SOMMER, C. 1979. Trafficability and workability. *Mitt, DtschBodenkde. Ges.* 29: 1090-2004.
- WÄSTERLUND, I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. *Scand. J. For. Res* 7: 135-142.