



UN PENETRÓMETRO DINÁMICO PARA EVALUAR LA RESISTENCIA MECÁNICA EN SUELOS FORESTALES

A DYNAMIC PENETROMETER FOR MEASURING MECHANICAL RESISTANCE IN FOREST SOILS

Irma Vásquez García¹; Armando Gómez Guerrero¹; Alejandro Velázquez Martínez ^{1*};
 Arnulfo Aldrete ¹; Aurelio M. Fierros-González².

¹Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. km 36.5, Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. (^{*}Autor para correspondencia).

²Comisión Nacional Forestal. Periférico Poniente 5360. Zapopan, Jalisco. C. P. 45019. MÉXICO.

RESUMEN

Se diseñó un penetrómetro cónico de impacto para evaluar la resistencia mecánica de los suelos forestales. El equipo diseñado es ligero ya que sólo pesa 4.1 kg, preciso porque se validó en campo y laboratorio, portátil porque desensamblado se puede cargar en el chaleco de un operador de campo, y práctico porque la capacitación para su uso es sencilla y es adecuado para trabajos de inventarios forestales y de suelo. Los resultados mostraron que el uso del prototipo es viable en diferentes ecosistemas, ya que detectó el perfil de resistencia mecánica del suelo superficial en bosque de pino, bosque de encino y vegetación de matorral. En laboratorio se prepararon muestras de diferente densidad aparente y contenido de humedad para probar la sensibilidad del penetrómetro. El equipo diseñado es sensible a los cambios de resistencia mecánica a densidades bajas (0.6-1.0 Mg·m⁻³), que son comunes en los suelos forestales y cambios de humedad del suelo (5-25 %). Con la validación del protocolo se encontró que una serie de 10 impactos genera un dato confiable sobre la resistencia mecánica del suelo superficial.

Recibido: 7 de abril, 2010
 Aceptado: 15 de noviembre, 2010
 doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.04.017
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Resistencia mecánica, penetrómetro dinámico, física de suelos, densidad aparente, suelos forestales.

ABSTRACT

A dynamic cone penetrometer (DCP) was designed for measuring soil penetration resistance in forest soils. The designed DCP is lightweight as it weighs only 4.1 kg, accurate because it was validated in field and laboratory testing, portable because disassembled it fits into a cruising vest, and practical because it is very easy to use. It is suitable for forest and soil inventory work. Test results showed that use of the designed prototype is practical in different ecosystems, as it was used to detect the mechanical resistance profile of surface soil in pine and oak forests and shrubland. Soil samples with different bulk density and moisture content were prepared in the laboratory to test the sensitivity of the penetrometer. The designed DCP is sensitive to changes in soil penetration resistance at low bulk densities (0.6-1.0 Mg·m⁻³), which are common in forest soils, and changes in soil moisture (5-25 %). With the validation protocol for its use, it was found that ten successive blows are enough to generate reliable data on the mechanical resistance of the surface soil.

KEY WORDS: Mechanical resistance, dynamic penetrometer, soil physics, bulk density, forest soils.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de la condición física del suelo es importante porque permite conocer el entorno biofísico en el que se desarrollan las raíces de las plantas (Batey, 2009) y este conocimiento es la base de la sustentabilidad de los sistemas productivos (Jabro *et al.*, 2006). Una variable importante para describir la condición física del suelo es la resistencia mecánica. Existen diversos procedimientos de laboratorio y campo para medir la resistencia mecánica del suelo, pero el más utilizado es la medición directa en campo

INTRODUCTION

Characterization of soil physical conditions is important because it sheds light on the biophysical environment in which plant roots develop (Batey, 2009) and this knowledge is the basis for achieving sustainability in production systems (Jabro *et al.*, 2006). An important variable to describe the physical condition of the soil is mechanical resistance, also known as soil strength. There are several laboratory and field procedures for measuring soil mechanical resistance, but the most used

mediante un implemento llamado penetrómetro cónico (Herrick y Jones, 2002). Un penetrómetro cónico o probador de resistencia es un equipo que mide la resistencia que opone el suelo al paso de una punta cónica con área de la base y ángulo de punta estandarizada (ASAE, 1998). En general, se conocen dos tipos de penetrómetros, los estáticos y los dinámicos. Los primeros miden la resistencia del suelo con un desplazamiento del cono a una velocidad constante, por lo que generalmente se construyen con dispositivos motorizados para mantener una velocidad constante. Los segundos se basan en la energía lograda por el impacto de un martillo como resultado de su caída libre a una altura determinada (Bengough *et al.*, 2001; Vanags *et al.*, 2004). Los probadores de resistencia estáticos son más sofisticados y costosos porque requieren de una velocidad constante de avance en el suelo, y cuando los prototipos son menos sofisticados la velocidad de penetración depende de la habilidad del operador, generando datos de baja repetitividad (Fritton, 1990). Los penetrómetros dinámicos son baratos, y con un manejo adecuado generan datos reproducibles, ya que la energía empleada no depende del operador sino de la altura de caída, peso del martillo y la fuerza de gravedad (Klvac *et al.*, 2010; Herrick y Jones, 2002).

La idea de desarrollar un indicador de resistencia mecánica del suelo comenzó con los primeros estudios en los que se estimó la energía requerida para introducir un muestreador de suelo a una profundidad dada. Incluso se tenía la idea de desarrollar equipos que al mismo tiempo que midieran resistencia, tomaran muestras para densidad aparente (Herrick y Jones, 2002). El penetrómetro dinámico se ha usado principalmente en el campo de la ingeniería civil para caracterizar la resistencia mecánica de pavimentos y cimentaciones (Klvac *et al.*, 2010). Sin embargo, los penetrómetros usados en este campo y en la agricultura son generalmente pesados, ya que sólo el peso del martillo llega a ser de 9 kg. Esto implicaría una dificultad de desplazamiento con el equipo si se usara en zonas forestales. Se han propuesto penetrómetros con martillos de 2 kg para suelos agrícolas y con dimensiones estandarizadas de la punta cónica (Herrick y Jones, 2002; Vanags *et al.*, 2004). Meshalkina *et al.* (1995) propusieron un equipo de bolsillo con martillo de 50 g y de punta plana para explorar los primeros 5 cm del suelo, pero la limitación en la profundidad explorada y la falta de una punta cónica estandarizada dificultan la comparación de mediciones con otros equipos. No hay reportes en la literatura en los que explícitamente se propongan y se validen penetrómetros para suelos forestales. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto fue diseñar un penetrómetro dinámico para suelos forestales, que fuera ligero, de fácil transporte y que contara con un proceso de validación en campo y laboratorio. El equipo puede ser de utilidad tanto en proyectos individuales como en estrategias nacionales, por ejemplo para complementar la información del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

is direct field measurements with an instrument called a cone penetrometer (Herrick and Jones, 2002). A cone penetrometer or resistance tester is a device that measures the resistance of the soil to the penetration of a cone tip with a standardized base area and tip angle (ASAE, 1998). In general, there are two kinds of penetrometers: static and dynamic devices. Static penetrometers measure soil resistance with movement of the cone at a constant speed, so they are generally built with motorized devices to maintain a constant speed. The latter are based on the energy gained by the impact of a hammer as a result of its free fall from a certain height (Bengough *et al.* 2001; Vanags *et al.*, 2004). Static resistance testers are more sophisticated and expensive because they require a constant advance speed in the soil, and when the prototypes are less sophisticated the penetration speed depends on the skill of the operator, thereby generating low repeatability data (Fritton, 1990). Dynamic penetrometers are inexpensive, and with proper handling generate reproducible data, as the energy used does not depend on the operator but on the drop height, hammer weight and the force of gravity (Klvac *et al.*, 2010; Herrick and Jones, 2002).

The idea of developing an indicator of soil mechanical resistance originated with the first studies that estimated the energy required to drive a soil sampler to a given depth. Even the idea of designing an instrument that could measure resistance while taking samples for bulk density was floated (Herrick and Jones, 2002). The dynamic penetrometer has mainly been used in the field of civil engineering to characterize the mechanical resistance of pavements and foundations (Klvac *et al.*, 2010). However, penetrometers used in this field and in agriculture are generally heavy, with the hammer alone weighing up to 9 kg. Thus, it would be difficult to move with the equipment if used in forest areas. Penetrometers with a 2-kg hammer and standardized cone tip dimensions have been proposed for agricultural soils (Herrick and Jones, 2002; Vanags *et al.*, 2004). Meshalkina *et al.* (1995) proposed a pocket instrument with a 50-g hammer and a flat tip to explore the first 5 cm of the soil, but the limitation in the depth explored and the lack of a standardized cone tip make it difficult to compare measurements with other devices. There are no reports in the literature that explicitly propose and validate penetrometers for forest soils. Therefore, the aim of this project was to design a dynamic penetrometer for forest soils, which is light, easy to transport and can pass a laboratory and field validation process. The device can be useful in both individual projects and national initiatives, such as supplementing the information in the National Forest and Soil Inventory, which is managed by the National Forestry Commission (known by the acronym CONAFOR in Mexico).

MATERIALS AND METHODS

Penetrometer design

Construction of the penetrometer was based on

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del penetrómetro

Para la construcción del penetrómetro se partió de la experiencia de Herrick y Jones (2002), quienes probaron un diseño para suelos agrícolas. El prototipo diseñado en el presente trabajo partió de las siguientes necesidades identificadas: 1) Se requiere de un implemento para uso en suelos forestales; 2) las especificaciones de una punta cónica reemplazable deberán tener dimensiones estandarizadas y reconocidas internacionalmente, en este caso, cono con ángulo de 30° y diámetro de base de 12.83 mm (ASAE, 1996); 3) el peso del martillo podría reducirse, pero a su vez ampliar la altura de caída hasta 100 cm para incrementar la energía por impacto; 4) por los requerimientos de portabilidad se necesita un implemento de fácil ensamblaje y con segmentos que se puedan guardar en un chaleco de campo; 5) por la topografía irregular de los suelos forestales, es indispensable la adaptación de un tripié con nivel de burbuja para mantener la verticalidad del penetrómetro; 6) el implemento propuesto debe ser preciso y confiable, por lo que se requieren evidencias de su validación en campo y laboratorio.

Con las consideraciones señaladas, el prototipo final (Figura 1), consistió en seis segmentos ensamblables de acero inoxidable de 45 cm de largo y 1.1 cm de diámetro. Los seis segmentos del vástago pesan 1,855 g. El peso del martillo es de 724.9 g, de forma cilíndrica con 4.3 x 6.3 cm de diámetro y altura, respectivamente. La punta cónica con estándares de la ASAE, se une al vástago a través de una rosca haciendo fácil el cambio de punta. Con la energía que producen los impactos del martillo, se estima la resistencia del suelo en unidades de energía por unidad lineal o energía por unidad de área, como lo indican Herrick y Jones (2002) y Vanags *et al.* (2004).

Ensayo de campo

Con la finalidad de conocer su operatividad, el penetrómetro se probó en diferentes tipos de vegetación y de suelo. La Figura 2 muestra la ubicación de sitios donde se probó el implemento. La experiencia práctica indicó que una serie de 10 impactos da lugar a un indicador de resistencia del suelo, y el promedio de 10 estaciones separadas a tres metros en un transecto puede usarse para estimar la resistencia del suelo asociada a un sitio dado. Es decir, se sugieren 100 impactos por sitio para generar un indicador de resistencia. Paralelamente, se tomaron muestras para densidad aparente, con la finalidad de conocer el espectro de condiciones físicas de los suelos donde se realizaron las pruebas.

Evolución de la energía en diez impactos

Se colectó suelo superficial (15 cm) de tres tipos de vegetación contrastante de los sitios visitados en el ensayo de campo, sitios tres, cuatro y nueve que corresponden

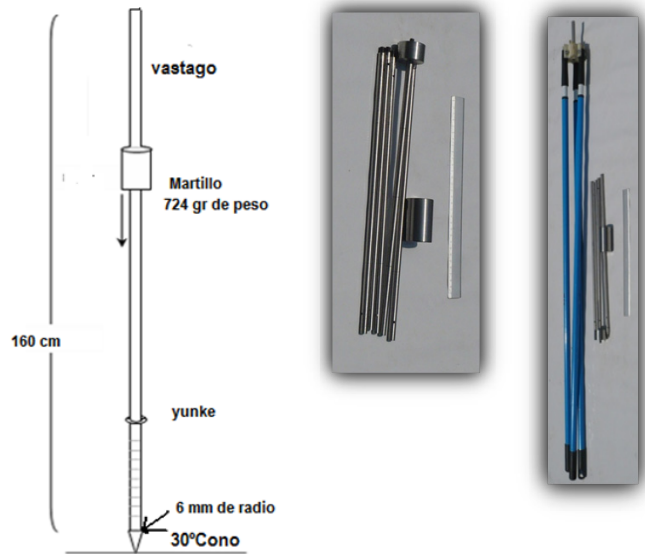


FIGURA 1. De izquierda a derecha, diagrama del penetrómetro, segmentos de ensamble del vástago y penetrómetro con tripié. La regla que se muestra en las dos imágenes de la derecha es de 30 cm.

FIGURE 1. From left to right, diagram of the penetrometer, disassembled rod segments and penetrometer with tripod. The ruler shown in the two images on the right is 30 cm long.

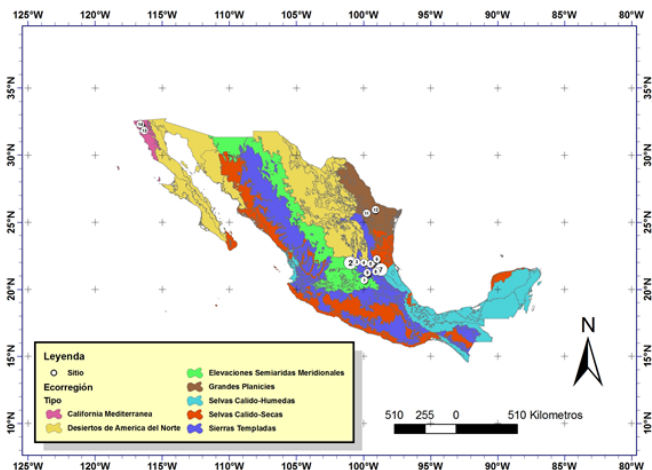


FIGURA 2. Distribución de sitios de prueba de campo del penetrómetro.

FIGURE 2. Distribution of penetrometer field-test sites.

the experience of Herrick and Jones (2002), who tested a design for agricultural soils. The prototype designed in this study was based on the following identified needs: 1) a device is required for use in forest soils; 2) the specifications of a replaceable cone tip should have internationally standardized and recognized dimensions, in this case, a cone with a 30° angle and a 12.83-mm base diameter (ASAE, 1996); 3) the weight of the hammer needs to be reduced, which in turn requires increasing the drop height to 100 cm to increase the impact energy; 4) due to the need for portability, the device needs to be easy to assemble with

a Bosque de Encino, Matorral y Bosque de Pino. De acuerdo al INEGI, los suelos en los puntos muestreados corresponden Calcisol lúvico, Leptosol rendzídico y Feozem háplico. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron a 4 mm para preservar los agregados. El suelo se colocó en recipientes de PVC de 11 cm de diámetro y 30 cm de altura, y se llevaron a una humedad del 30 % con respecto a su masa. Posteriormente, se probó el penetrómetro diseñado aplicando una serie de 10 impactos, con la finalidad de conocer la sensibilidad del penetrómetro a los diferentes tipos de suelo y bajo un mismo contenido de humedad. Es decir, se eliminó el efecto por contenido de humedad del suelo, y la aplicación de energía fue la misma para cada suelo. Las características generales de los suelos utilizados en este estudio se muestran en el Cuadro 1.

Ensayo de laboratorio con suelo de un Andosol

Para conocer la sensibilidad del penetrómetro bajo diferentes combinaciones de humedad y de densidad aparente, se planeó un experimento factorial de tres niveles de densidades aparentes, tres niveles de humedad y con tres repeticiones. El suelo seco se pasó por un tamiz de 4 mm y se colocó en recipientes de PVC 30 cm x 11 cm creando tres niveles de densidad aparente, 0.64, 0.80 y 1.0 Mg·m⁻³. Las últimas dos densidades se lograron compactando el suelo. Las muestras se llevaron a saturación y posteriormente se dejaron secar hasta alcanzar los siguientes contenidos de humedad respecto a la masa: 25, 15 y 5 %. Para facilitar el drenaje, la parte inferior del recipiente de PVC se hizo de malla de 1 mm y en acero inoxidable. Este experimento permitió medir la sensibilidad del penetrómetro a diferentes intervalos de humedades y densidades aparentes típicas en suelos forestales. Alcanzadas las humedades deseadas, se probó el penetrómetro en las muestras aplicando una serie de 10 impactos como indicador de resistencia del suelo. El suelo utilizado en esta prueba, se colectó de la parte superficial de un Andosol mólico que sustenta bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso de alta productividad forestal (Cuadro 1). El lugar donde se tomó la muestra es Aquixtla, Puebla, cuyas coordenadas geográficas son 19° 42' 42" y 19° 51' 54" de latitud Norte y 97° 49' 36" y 97° 54' 06" de longitud Oeste.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayo de campo

Excepto por los lugares de extrema rocosidad superficial que se presentó en el sitio 10, el prototipo propuesto mostró factibilidad de su uso en suelos forestales. Las densidades aparentes en los suelos donde se probó el penetrómetro van de 0.3 Mg·m⁻³ en vegetación de selva, hasta 1.1 y 1.2 Mg·m⁻³ en matorral espinoso y bosques de encino, respectivamente (Figura 3).

parts that can fit into a cruising vest; 5) due to the irregular topography of forest soils, the tripod must be fitted with a bubble level to maintain the verticality of the penetrometer; 6) the proposed instrument must be accurate and reliable, so it requires evidence of validation through field and laboratory testing.

Taking into account these considerations, the final prototype (Figure 1) consisted of six interlocking stainless steel segments, each 45 cm long and 1.1 cm in diameter. The six rod segments weigh 1.855 g. The cylinder-shaped hammer weighs 724.9 g and is 4.3 x 6.3 cm in diameter and height, respectively. The cone tip meets ASAE standards and is joined to the rod by a thread, making it easy to change the tip. Based on the energy produced by the hammer blows, soil resistance is estimated in units of energy per linear unit or energy per unit area, as indicated by Herrick and Jones (2002) and Vanags *et al.* (2004).

Field Test

In order to determine its operational capability, the penetrometer was tested on different types of vegetation and soil. Figure 2 shows the location of the sites where the instrument was tested. Practical experience indicates that 10 successive impacts provides an indicator of soil strength, and the average of 10 stations three meters apart along a transect can be used to estimate soil strength associated with a given site. That is, 100 impacts per site are recommended to generate a resistance indicator. At the same time, samples were taken for bulk density, in order to determine the spectrum of soil physical conditions where the tests were conducted.

Evolution of the energy in ten impacts

Surface soil (15 cm) was collected from three contrasting vegetation types at the sites visited during the field test; sites three, four and nine correspond to an oak forest, scrubland and a pine forest, respectively. According to INEGI, the soils at the sampling points are luvic Calcisol, rendzidic Leptosol and haplic Phaeozem. The samples were dried at room temperature and sieved to 4 mm to preserve the aggregates. The soil was placed in PVC containers measuring 11 cm in diameter and 30 cm high, and then taken to 30 % moisture content relative to their mass. Subsequently, the designed penetrometer was tested by applying 10 successive impacts, in order to determine the sensitivity of the penetrometer to different soil types and with the same moisture content. That is, the effect of soil moisture content was eliminated, and the application of energy was the same for each soil. The general characteristics of the soils used in this study are shown in Table 1.

Bench test with an Andosol soil

To determine the sensitivity of the penetrometer under

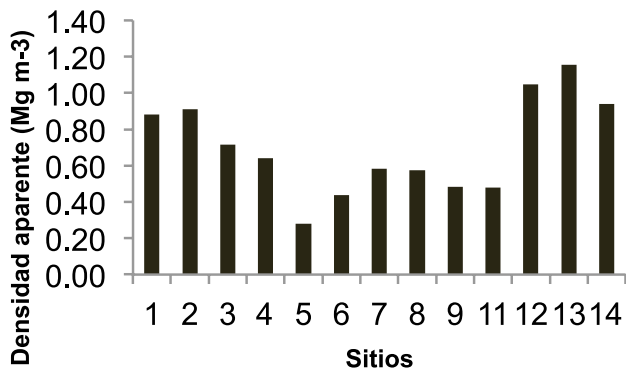
CUADRO 1. Características generales los suelos utilizados en los ensayos de calibración.

TABLE 1. General characteristics of the soils used in calibration tests.

Sitio	Capa (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	CC (% de humedad)	PMP	Clase textural
3	0-30	13	10	76	36	27.6	Arcilla
4	0-30	29	48	22	27	15	Franco
9	0-30	25	47	27	39	19.5	Migajón Arcilloso
1	0-30	33	25	41	48	22.3	Arcilla

3=Bosque de encino, 4=Matorral espinoso, 9= Bosque de Pino de la Sierra Gorda, Qro, 1=Bosque de pino de la Sierra de Puebla, utilizado en el segundo ensayo de laboratorio. CC=Capacidad de campo. PMP=Punto de marchitamiento permanente.

3= Oak forest, 4= Thornscrub, 9= Pine forest in the Sierra Gorda, Queretaro, 1= Pine forest in the Sierra de Puebla, used in the second bench test. CC = Field capacity. PMP = Permanent wilting point.



- 1. Matorral espinoso 2. Matorral espinoso 3. Bosque de encino
- 4. Matorral espinoso 5. Selva calida 6. Selva calida 7. Selva humeda
- 8. Selva calido-humeda 9. Bosque pino 11. Matorral espinoso
- 12. Matorral espinoso 13. Bosque encino 14. Bosque encino

FIGURA 3. Densidad aparente de los sitios de prueba preliminar del penetrómetro

FIGURE 3. Bulk density of the preliminary penetrometer test sites

La resistencia mecánica y densidad aparente presentaron una correlación baja ($R=0.48$), lo cual se explica porque los suelos en campo se encontraban con diferente contenido de humedad lo que dificulta las correlaciones altas entre propiedades físicas del suelo (Utset y Cid, 2001). Sin embargo, los resultados indicaron que el penetrómetro diseñado en general registra mayores valores de resistencia mecánica al aumentar la densidad aparente, y por lo tanto es sensible para detectar diferencias en la resistencia mecánica del suelo en diferentes tipos de suelos. La variación de resistencia observada en los suelos de prueba varió de 5 a 15 $J\cdot cm^{-1}$, es decir, hubo una variación en una magnitud de tres, similar a la magnitud de variación de la densidad aparente. Debido a la alta actividad biológica y contenido de materia orgánica, los primeros horizontes del suelo en

different moisture and bulk density combinations, a factorial experiment consisting of three bulk density levels, three moisture levels and three replications was planned. The dry soil was passed through a 4-mm sieve and placed in 30 cm x 11 cm PVC containers, creating three bulk density levels, 0.64, 0.80 and 1.0 $Mg\cdot m^{-3}$. The last two densities were achieved by compacting the soil. The samples were brought to saturation and then left to dry until achieving the following moisture contents relative to mass: 25, 15 and 5 %. To facilitate drainage, the bottom of the PVC container was made of 1-mm stainless steel mesh. This experiment allowed measuring the sensitivity of the penetrometer at different moisture and bulk density levels typical of forest soils. Upon reaching the desired moisture levels, the penetrometer was tested in the samples by applying 10 successive blows as an indicator of soil resistance. Soil used in this test was collected from the surface of a mollic Andosol underlying high-productivity *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso forests (Table 1). The place where the sample was taken is Aquixtla, Puebla, whose geographical coordinates are 19° 42' 42" and 19° 51' 54" N and 97° 49' 36" and 97° 54' 06" W.

RESULTS AND DISCUSSION

Field Test

Except for the areas of extreme surface rockiness found at site 10, the proposed prototype showed the feasibility of its use in forest soils. The bulk densities in the soils where the penetrometer was tested ranged from 0.3 $Mg\cdot m^{-3}$ in jungle vegetation, up to 1.1 and 1.2 $Mg\cdot m^{-3}$ in thornscrub and oak forests, respectively (Figure 3).

Mechanical resistance and bulk density had a low correlation ($R=0.48$), which explains why the field soils were found with different moisture content, which makes

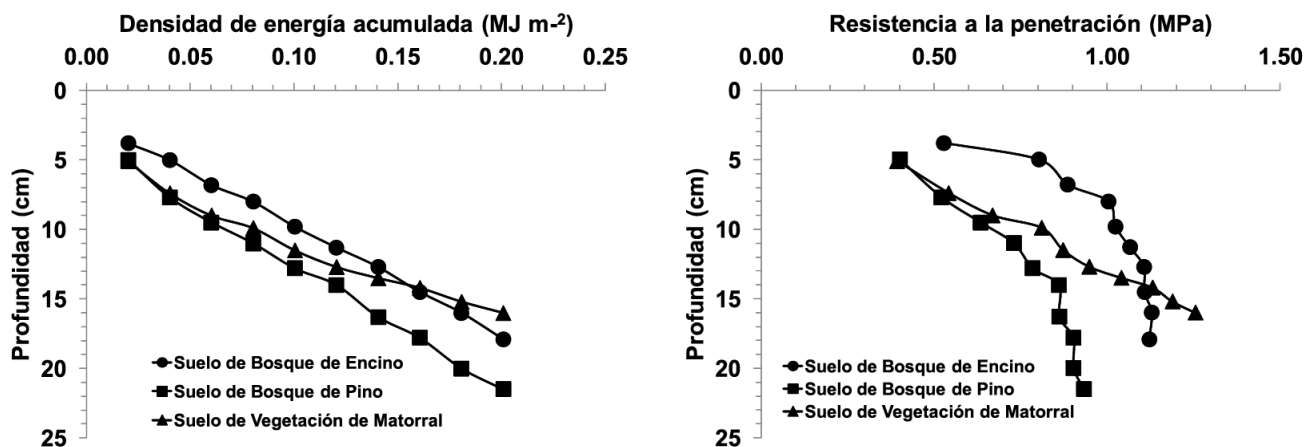


FIGURA 4. Energía acumulada y resistencia a la penetración medida en suelo de diferente tipo de vegetación.

FIGURE 4. Accumulated energy and penetration resistance measured in soil of different types of vegetation.

ecosistemas forestales presentan densidades aparentes menores o igual a $1 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fisher y Blinkley, 2000). La baja resistencia mecánica en suelos forestales obliga al uso de equipo sensible. Sterber *et al.* (2007) encontraron que los protocolos usados en el Inventario Forestal de los Estados Unidos, frecuentemente no detectan perturbaciones al suelo a menos que se consideren las mediciones de resistencia mecánica del suelo con un penetrómetro de bolsillo. Por lo tanto los cambios en resistencia mecánica de la Figura 3 muestran la viabilidad del penetrómetro construido para suelos forestales.

Evolución de la energía en diez impactos

Con una serie de 10 impactos se detectó la diferencia en resistencia de los tres tipos de suelo (Figura 4). Esta prueba indicó una densidad de energía y resistencia diferente para cada uno de ellos. El orden de resistencia a 30 % de contenido de humedad es: Suelo de Matorral, Suelo de Bosque de Encino y Suelo de Bosque de Pino, respectivamente. Este resultado corrobora la sensibilidad del equipo con diferentes tipos de suelo y la confiabilidad que se puede tener en una medición de resistencia basada en una serie de diez impactos. Con un contenido de 30 % de humedad ningún suelo presenta resistencia superior a 1.5 MPa, lo que indica condiciones aceptables para el crecimiento de la raíz. Este resultado se explica por qué la humedad a la que se hicieron las pruebas está dentro del intervalo de humedad aprovechable (Cuadro 1). Sin embargo, con humedades relativamente menores al 15 %, algunos suelos forestales pueden alcanzar resistencia de 2.0 MPa (Ley *et al.*, 1995).

Ensayo de laboratorio con suelo de un Andosol

Se observó que hay un cambio drástico en la resistencia del suelo cuando la humedad disminuye de 25 a 15 %. Analizando los resultados por densidad del suelo,

high correlations between soil physical properties difficult (Utset and Cid, 2001). However, the results indicated that the designed penetrometer generally records higher mechanical resistance values with increasing bulk density, and it is therefore sensitive enough to detect differences in soil mechanical resistance in different soil types. The variation in resistance observed in the test soils ranged from 5 to 15 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$, i.e., there was a variation on a scale of three, similar to the magnitude of change in bulk density. Due to the high biological activity and organic matter content, the first soil horizons in forest ecosystems have bulk densities less than or equal to $1 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fisher and Blinkley, 2000). The low mechanical resistance in forest soils requires the use of sensitive equipment. Sterber *et al.* (2007) found that the protocols used in the National Forest Inventory of the United States often do not detect disturbances to the soil unless measurements of soil mechanical resistance made with a pocket penetrometer are taken into account. Therefore, the changes in mechanical resistance presented in Figure 3 show the viability of the penetrometer built for forest soils.

Evolution of energy in ten impacts

With 10 successive impacts, the difference in resistance of the three soil types was detected (Figure 4). This test indicated a different energy density and resistance for each of them. The order of resistance at 30 % moisture content is: Scrubland Soil, Oak Forest Soil and Pine Forest Soil, respectively. This result confirms the sensitivity of the instrument with different soil types and the reliability it provides with a resistance measurement based on ten successive impacts. With 30% moisture content, no soil presents resistance greater than 1.5 MPa, indicating acceptable conditions for root growth. This result explains why the moisture level tested is within the range of usable moisture (Table 1). However, with moisture content less than 15 %, some forest soils can attain a resistance level of 2.0 MPa (Ley *et al.*, 1995).

es evidente que independientemente de la humedad, la resistencia es baja con densidades de $0.64 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dado que esta es la condición natural del suelo, esta densidad baja explica indirectamente la alta productividad de estos suelos forestales. Por otro lado, incrementando la densidad a $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ la resistencia se incrementa de 30 a $390 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-1}$, cuando la humedad es del 5 %. Es decir, el incremento es mayor a 900 % cuando se incrementa la densidad del suelo en 40 % (de 0.64 a 1.0) y la humedad es del 5 %. Esto también muestra que hay la suficiente sensibilidad del penetrómetro para evaluar la resistencia del suelo bajo diferentes condiciones físicas. Este resultado es relevante porque las mediciones del penetrómetro cónico están altamente correlacionadas con las regiones morfológicas de los horizontes del suelo. Rooney y Lowery (2000) demostraron que es posible inferir las zonas de acumulación de arcilla de los horizontes Bt con mediciones de resistencia mecánica. Por lo anterior, dada la sensibilidad del penetrómetro diseñado, se podrían también detectar cambios en resistencia mecánica debidos a cambios en los horizontes morfológicos del perfil del suelo, generando así información complementaria del suelo.

Considerando el propio peso del penetrómetro y realizando los cálculos de resistencia en MPa para una profundidad determinada, las densidades de 0.8 y 1.0 rebasaron los 2.5 MPa en los primeros siete centímetros de suelo, aun cuando la humedad del suelo era de 20 % (Figura 5). En la literatura se reconoce que 2.0 MPa ya es un valor crítico para crecimiento (Fisher y Binkley, 2000). Este resultado es muy importante porque indica que cuando se degrada físicamente este suelo y su densidad se incrementa de 0.64 a $0.8 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (25 % de incremento), el medio físico del suelo no es apto para el crecimiento normal de la raíz, aun cuando la humedad sea del 25 %. La magnitud de los cambios físicos encontrados en este trabajo lleva a pensar que en gran medida, y muy probablemente, los programas de reforestación en suelos similares de México, están fracasando por no considerar la resistencia del suelo, ello aunado a otros factores. La relación estrecha entre resistencia mecánica, textura, potencial de agua y límites biológicos para el crecimiento de la raíz en suelos forestales es discutida por Gómez *et al.* (2002). Un aspecto importante es que bajo condiciones de densidad baja y humedad de 25 %, los primeros dos impactos alcanzan una profundidad de 10 cm, lo que indica la alta vulnerabilidad de deterioro del suelo si se permite el tráfico de vehículos o maquinaria para aprovechamiento forestal bajo estas condiciones de humedad. La resistencia medida en suelo estudiado (Andosol mólico) a baja humedad y alta densidad alcanzó valores de hasta 9 MPa, que son comparables a los encontrados en pastizales tropicales de México después de dos décadas de uso pecuario (Geissen *et al.*, 2009). Los Andosoles de Chile muestran resistencias de 6 MPa después de 150 años de cambio de uso del suelo de forestal a pecuario (Bachman *et al.*, 2006).

Análisis de varianza del experimento factorial

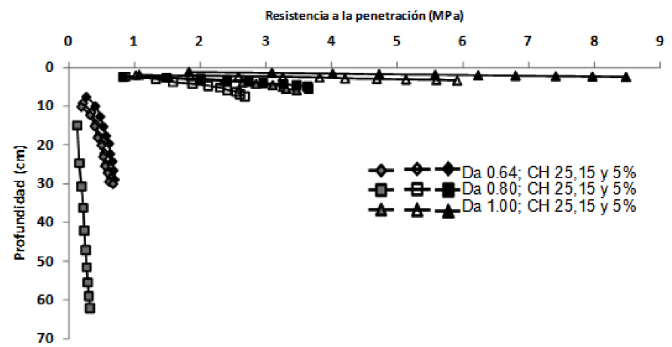


FIGURA 5. Resistencia mecánica de un Andosol en tres densidades aparentes (Da) y niveles de humedad gravimétrica (CH).

FIGURE 5. Mechanical resistance of an Andosol in three bulk densities (Da) and gravimetric moisture levels (CH).

Bench test with an Andosol soil

It was observed that there is a drastic change in soil strength when moisture content decreases from 25 to 15 %. Analyzing the results by soil density, it is clear that regardless of moisture content, resistance is low with densities of $0.64 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Since this is the natural condition of the soil, this low density indirectly explains the high productivity of these forest soils. On the other hand, when density increases to $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, resistance increases from 30 to $390 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-1}$ when moisture content is 5 %. That is, the increase is greater than 900 % when soil density increases by 40 % (from 0.64 to 1.0) and moisture content is 5 %. This also shows that the penetrometer is sensitive enough to assess soil resistance under different physical conditions. This result is relevant because cone penetrometer measurements are highly correlated with the morphological regions of soil horizons. Rooney and Lowery (2000) showed that it is possible to infer the areas of clay accumulation in Bt horizons with mechanical resistance measurements. Therefore, given the sensitivity of the designed penetrometer, it could also be used to detect changes in mechanical resistance due to changes in the morphological horizons of the soil profile, thereby generating additional information from the soil.

Considering the weight of the penetrometer and by performing the resistance calculations in MPa for a given depth, the densities of 0.8 and 1.0 exceeded 2.5 MPa in the first seven centimeters of soil, even when soil moisture was 20 % (Figure 5). It is recognized in the literature that 2.0 MPa is already a critical value for growth (Fisher and Binkley, 2000). This result is very important because it indicates that when this soil is physically degraded and its density increases from 0.64 to $0.8 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (25 % increase), the physical environment of the soil is not suitable for normal root growth, even when moisture content is 25 %. The magnitude of the physical changes found in this study suggests that to a large extent, and most likely, reforestation programs in similar soils in Mexico are failing as a result of not considering soil strength, along with other factors.

CUADRO 2. Análisis de varianza para la resistencia expresada como fuerza por unidad de área.**TABLE 2. Analysis of variance for the resistance expressed as force per unit area.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	Probabilidad estimada
Contenido de humedad	2	0.36	0.18	226.97	<0.0001
Densidad Aparente	2	1.666	0.833	1050.82	<0.0001
Interacción	4	0.249	0.062	78.8	<0.0001

La variación de la resistencia mecánica del suelo expresada como energía por unidad lineal o energía por unidad de área, se explican satisfactoriamente con el modelo completo incluyendo los niveles de humedad y densidad aparente ($P = 0.001$). Hay alta correlación (0.99) entre los dos indicadores de resistencia, por lo que el análisis de varianza de esas variables genera los mismos resultados, y por esa razón sólo se muestra un análisis. La significancia de los factores estudiados y su interacción se muestran en el Cuadro 2. Tanto la humedad como la densidad del suelo fueron significativas estadísticamente. La alta significancia de la interacción indica que la respuesta en resistencia mecánica para un mismo nivel de densidad aparente dependió del contenido de humedad.

Los resultados indican que el Andosol tiene características particularmente sensibles a deterioro físico. Si ocurre compactación en este suelo, las condiciones del mismo generan resistencia superior a los límites biológicos para el crecimiento de raíz (Parker, 2007). La condición más crítica sería con $1.00 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ de densidad y 5 % de humedad, y estas condiciones se pueden presentar en sitios sin arbolado y expuestos al tráfico de ganado, vehículos o personas inclusive. Generalmente se asume que las especies forestales pueden crecer en condiciones adversas de resistencia mecánica, pero este estudio indica que aun con densidades bajas como $0.8 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, un suelo como el estudiado incrementa su resistencia hasta en un 900 % cuando disminuye la humedad. Por la razón anterior, es importante no asumir que los cambios mínimos en las condiciones del suelo no afectarán el crecimiento de las especies forestales, o que la respuesta de las especies forestales será similar a la de cultivos agrícolas donde el abastecimiento de agua y nutrientes está generalmente garantizado (Gómez *et al.*, 2002).

En resumen, los resultados de este estudio validan un protocolo de uso de un penetrómetro dinámico para suelos forestales, con las especificaciones propuestas en este trabajo. Se observó que las lecturas, independientemente de la resistencia mecánica, se logran a los 10 impactos. El uso del tripié facilita la verticalidad del penetrómetro y genera mediciones repetibles y precisas, las cuales varían en función del suelo y sus condiciones de humedad y densidad aparente.

CONCLUSIONES

- 1) Fue posible proponer un prototipo de penetrómetro

The close relationship between mechanical resistance, texture, water potential and biological limits for root growth in forest soils is discussed by Gómez *et al.* (2002). An important aspect is that under low density conditions and 25 % moisture content, the first two blows reach a depth of 10 cm, indicating the high risk of soil damage if vehicular traffic or logging equipment is allowed under these moisture conditions. The resistance measured in the studied soil (mollic Andosol) at low moisture content and high density reached values of up to 9 MPa, which are comparable to those found in Mexico's tropical grasslands after two decades of livestock use (Geissen *et al.*, 2009). Andosols in Chile show strengths of 6 MPa after 150 years of land-use change from forestry to livestock activities (Bachman *et al.*, 2006).

Analysis of variance of the factorial experiment

The variation in soil mechanical resistance, expressed as energy per linear unit or energy per unit area, is explained satisfactorily with the full model, including moisture and bulk density levels ($P = 0.001$). There is a high correlation (0.99) between the two resistance indicators, so the analysis of variance of these two variables produces the same results, and for that reason only one analysis is shown. The significance of the factors studied and their interaction are shown in Table 2. Both soil moisture and density were statistically significant. The high significance of the interaction indicates that the mechanical resistance response for the same level of bulk density depended on moisture content.

The results indicate that the Andosol has features that are particularly sensitive to physical deterioration. If compaction occurs in this soil, this produces resistance greater than the biological limits for root growth (Parker, 2007). The most critical condition would be $1.00 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ density and 5 % moisture content, and these conditions can occur in treeless areas exposed to livestock, vehicle and even people traffic. It is generally assumed that tree species can grow in adverse soil strength conditions, but this study indicates that even with densities as low as $0.8 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, a soil such as the one studied here increases its resistance by up to 900 % when moisture content decreases. For this reason, it is important not to assume that minimal changes in soil conditions do not affect the growth of forest species, or that the response of forest species will be similar to that of agricultural crops which generally enjoy a guaranteed supply of water and nutrients (Gómez *et al.*, 2002).

para su uso en suelos forestales (Patente en trámite).

2) Los resultados muestran que el prototipo es de aplicación práctica en suelos de diferentes ecosistemas. Además, fue sensible a los cambios de resistencia mecánica a densidades bajas ($0.6-1.0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y cambios de humedad del suelo (5-25 %).

3) Con la validación del protocolo se encontró que una serie de 10 impactos genera un dato confiable sobre la resistencia mecánica del suelo superficial.

4) El diseño del equipo tiene la ventaja de ser ligero, ya que sólo pesa 2.579 kg, preciso porque se validó estadísticamente su precisión, portátil porque desensamblado se puede cargar en el chaleco de un operador de campo y práctico porque la capacitación para su uso es sencilla.

5) El equipo es viable en trabajos de inventarios forestales y de suelo, como el contemplado por la Comisión Nacional Forestal. Por lo tanto, es conveniente generar más información experimental con el equipo diseñado considerando otros suelos de relevancia forestal.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por el apoyo al presente estudio que es parte del proyecto "Desarrollo y validación de indicadores para el monitoreo de la salud de los bosques de México".

LITERATURA CITADA

- ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. 1998. ASAE Standards 1998, 45th ed. Standards Engineering Practices Data. Soil Cone Penetrometer. ASAE S313.2 Dec. 94. St Joseph, MI; 820-821.
- BACHMAN, J.; CONTRERAS, K.; HARTAGE, H.; MAC DONALD, R. 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research* 87:112-118.
- BATEY, T. 2009. Soil compaction and soil management- a review. *Soil use and management* 25: 335-345.
- BENGOUGH A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. *In* SMITH, K. A.; MULLINS C. E. (eds.). *Soil and Environmental Analysis. Physical Methods*. 2nd Ed. New York. pp. 377-403.
- FISHER, R. F.; BINKLEY, D. 2000. *Ecology and management of forest soils*. 3d ed. John Wiley & Sons. New York. 489p.
- FRITTON, D. D. 1990. A standard for interpreting soil penetrometer measurements. *Soil Science* 150: 542-550.
- GEISSEN, V.; SÁNCHEZ, R.; KAMPICHLER, C.; RAMOS, R.; SEPULVEDA, A.; LOZADA, S.; OCHOA, S.; DE JONG, B. H. J.; HUERTA, E.; HERNÁNDEZ, S. 2009. Effects of Land-use change on some properties of tropical soils-An example from Southeast México. *Geoderma* 151: 87-97.

In summary, the results of this study validate the use protocol for a dynamic penetrometer for forest soils, with the specifications proposed in this paper. It was noted that the readings, regardless of the mechanical resistance, are achieved after 10 impacts. The use of the tripod facilitates the verticality of the penetrometer and generates accurate and repeatable measurements, which vary depending on the soil and its moisture and bulk density conditions.

CONCLUSIONS

1) It was possible to propose a penetrometer prototype for use in forest soils (patent pending).

2) The results show that the prototype is practical for use in soils of different ecosystems. It was also sensitive to changes in mechanical resistance at low densities ($0.6-1.0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and changes in soil moisture (5-25 %).

3) With the validation protocol, it was found that 10 successive impacts are enough to generate reliable data on the mechanical resistance of the surface soil.

4) The designed instrument has the advantage of being lightweight, as it only weighs 2.579 kg, accurate because its accuracy was statistically validated, portable because disassembled it can fit into a cruising vest, and practical because it is easy to use.

5) The instrument is suitable for use in forest and soil inventory work, such as that envisaged by the National Forestry Commission. Therefore, it would be beneficial to conduct further testing with the designed instrument in other forest soils.

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank the National Forestry Commission (CONAFOR) for supporting this study which is part of the project entitled "Development and validation of indicators for monitoring the health of Mexican forests."

End of English Version

- LEY, G. J.; MULLINS, C. E.; LAL, R. 1995. The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils. *Soil and Tillage Research* 33: 133-142.
- MESHALKINA, J. L.; STEIN, A.; DMITRIEV, Y. A. 1995. Spatial variability of penetration data on Russian plots in different land use. *Soil Technology* 8: 43-79.
- ROONEY, D.; LOWERY, B. 2000. A profile cone penetrometer for mapping soil horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2136-2139.
- STEBER, A.; BROOKS, K.; PERRY, C. H.; KOLKA, R. 2007. Surface compaction estimates and soil sensitivity in Aspen stands

- GÓMEZ, G. A.; POWERS, R. F.; SINGER M. J. 2002. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1334-1343.
- HERRICK, J. E.; JONES, T. L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1320-1324.
- JABRO, D. J.; EVANS, R. G.; KIM, Y.; STEVENS, W. B.; IVERSEN, W. M. 2006. Characterization of spatial variability of soil Electrical conductivity and cone index using coulter and penetrometer-type sensors. *Soil Science* 171: 627-637.
- KLVAC, R.; VRANA, P.; JIROUSEK, R. 2010. Possibilities of using the portable falling weight deflectometer to measure the bearing capacity and compaction of forest soils. *Journal of Forest Science (Prague)* 56: 130-136.
- of the Great Lakes States. *Northern Journal of Applied Forestry* 24: 276-281.
- PARKER, R. T. 2007. Monitoring soil strength conditions resulting from mechanical harvesting in volcanic ash soils of central Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* 22: 261-268.
- UTSET, A.; CID, G. 2001. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil and Tillage Research* 61: 193-202.
- VANAGS, C. P.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. 2004. The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance In *Supersoil 2004: Program and Abstracts for the 3rd Australian New Zealand Soils Conference*, University of Sydney, Australia, 5-9 December 2004. 8 p.