



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO FORESTAL

**PROTOTIPO DE UN PENETRÓMETRO CÓNICO DE
IMPACTO Y SU VALIDACIÓN DE USO EN SUELOS
FORESTALES**

IRMA VÁSQUEZ GARCÍA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, 2010.

La presente tesis titulada: **Prototipo de un penetrómetro cónico de impacto y su validación de uso en suelos forestales**, realizada por la alumna: **Irma Vásquez García** bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
POSGRADO FORESTAL

CONSEJERO

Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR

Dr. Alejandro Velázquez Martínez

ASESOR

Dr. Aurelio Manuel Fierros González

ASESOR

Dr. Arnulfo Aldrete

ASESOR

Dr. Fernando Carrillo Anzures

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, Abril de 2010.

AGRADECIMIENTOS

Por el valioso apoyo, información y colaboración de conocimientos que recibí de investigadores del Colegio de Postgraduados durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, quiero agradecer sinceramente:

Al Dr. Armando Gómez Guerrero, por su valiosa colaboración en la planeación, supervisión y dirección del proyecto, y por ser un investigador comprometido con los recursos naturales en México.

Al Dr. Alejandro Velásquez Martínez, por sus sugerencias y comentarios en el aspecto académico y en la realización del proyecto de investigación.

Al Dr. Aurelio Manuel Fierros González, por sus comentarios y apoyo en el proyecto.

Al Dr. Arnulfo Aldrete, por sus comentarios, sugerencias y apoyo durante la realización del proyecto.

Al Dr. Fernando Carrillo Anzures, por el apoyo brindado al proyecto de investigación.

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por el apoyo al presente proyecto de investigación

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por todo el apoyo y comprensión que siempre me han brindado, en todas las etapas de mi vida y en especial en esta etapa tan importante.

Al Colegio de Postgraduados y todas las personas del Colegio de Postgraduados que contribuyeron a mi formación académica, en esta etapa de aprendizaje.

ACONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), por el apoyo económico durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados, durante la maestría.

A Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida y porque gracias a él soy lo que soy.

CONTENIDO

CONTENIDO	<i>i</i>
ÍNDICE DE CUADROS	<i>iii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>iv</i>
RESUMEN GENERAL	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Justificación.....	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Hipótesis	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Componentes de un penetrómetro	7
2.2 Antecedentes del uso del penetrómetro cónico de impacto.....	9
2.3 Tipos de penetrómetros	10
2.4 Penetrómetro cónico dinámico y resistencia mecánica	12
2.4.1 Modo de uso del penetrómetro	13
2.4.2 Resistencia mecánica	13
2.5. Densidad aparente	15
2.4.1 Métodos para medir la densidad aparente.....	16
2.6 Medición de la humedad	18
2.6.1 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo	19
2.6 Relación de la resistencia mecánica con densidad aparente y contenido de humedad.....	21
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1 Área de estudio	23
3.2 Desarrollo del prototipo y pruebas de campo y laboratorio.....	23
3.2.1 Diseño del prototipo.....	23
3.2.2 Ensayo preliminar de campo	25
3.2.3 Primer ensayo de laboratorio	31
3.2.4 Características generales de los suelos utilizados en las pruebas de laboratorio.....	34

3.2.5 Segundo Ensayo de Laboratorio.....	36
<i>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</i>	40
4.1 Prototipo final	40
4.2 Resultados del primer ensayo en campo.....	41
4.3 Resultados del primer ensayo de laboratorio	43
4.4 Resultados del segundo ensayo de laboratorio	46
4.5 Análisis de Varianza de los datos obtenidos del segundo ensayo de laboratorio.....	54
<i>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....</i>	58
<i>CAPÍTULO VI. LITERATURA CITADA.....</i>	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		página
2.1	Características generales de las muestras utilizadas en los ensayos de laboratorio	35
2.2	Análisis de varianza para la resistencia expresada como fuerza por unidad de área	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Penetrómetro en su forma más común, y las partes que lo componen.....	8
2 Método del cilindro para determinar la densidad aparente.....	16
3 Método del terrón para determinar densidad aparente.....	17
4 Fotografía de un equipo de TDR (Time Domain Reflectometry).....	20
5 Concepto de gráfico de el intervalo mínimo de disponibilidad de agua (Da Silva <i>et al.</i> , 2004).....	22
6 Sitios donde se hicieron los ensayos de campo.....	31
7 Secado al aire de las muestras de suelo.....	32
8 Envases de PVC con muestras de suelo 40.....	32
9 Muestras de suelo en proceso de saturacion.....	33
10 Prueba del penetrometro en las muestras de suelo.	33
11 Secado de suelo previo al experimento factorial.....	37
12 Compactación de muestras de suelo.....	38
13 Muestras de suelo en proceso de saturación.....	38
14 Muestras de suelo bajo secado al aire.....	39
15 Verificación de humedad alcanzada y medición de resistencia mecánica.....	39
16 Prototipo de penetrómetro cónico de impacto.....	40
17 Penetrómetro cónico de impacto y su tripié.....	41
18 Densidad aparente de los sitios de prueba preliminar del penetrómetro.....	42
19 Relación entre resistencia mecánica (Rs) y densidad aparente (Da).....	43
20 Relación entre profundidad y número de impactos.....	44
21 a) Resistencia mecánica acumulada en Jcm^{-1} , en diferentes suelos (Bosque Pino=Feozem, Bosque de Encino=Calcisol y Matorral= Leptosol) a 30% de humedad, b) Resistencia mecánica en Jcm^{-1} para cada impacto.....	45
22 Energía acumulada y resistencia a la penetración medida en suelo de	

	diferente tipo de vegetación.....	46
23	Profundidad y número de impactos mostrando el efecto de la densidad.....	47
24	Profundidad y número de impactos mostrando el efecto de la densidad. El número antes del guión indica la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.....	49
25	Resistencia mecánica por unidad lineal acumulativa. El número antes del guión indica la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.....	50
26	Resistencia mecánica por unidad lineal para cada impacto. El número antes del guión indica la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.....	51
27	Resistencia mecánica acumulativa considerando el peso del penetrómetro. El número antes del guión indica la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.....	52
28	Profundidad y resistencia mecánica, estimada con los parámetros del penetrómetro desarrollado y considerando tres niveles de humedad y densidad aparente. En la simbología, el primer número indica densidad aparente y el número des pues del guión indica el nivel de humedad.....	53
29	Relación de contenido de humedad y resistencia mecánica en Jcm^{-1}	56

RESUMEN GENERAL

La resistencia mecánica del suelo es un indicador importante de su condición física. Dado que en el Inventario Forestal y de Suelos de México se requiere incluir indicadores de la condición física del suelo, en el presente estudio se diseñó y validó un penetrómetro cónico dinámico para medir la resistencia mecánica de suelos forestales. El diseño del equipo tiene la ventaja de ser ligero, portátil y práctico. Para la validación se hicieron pruebas de campo en diferentes ecosistemas y se emplearon en laboratorio cuatro tipos de suelos (Calcisol, Leptosol, Feozem y Andosol). Se encontró que una serie de 10 impactos genera mediciones independientes y confiables sobre la resistencia mecánica del suelo superficial. La aportación de este trabajo demuestra que con principios técnicos es posible adecuar implementos de campo para la valoración de la condición física del suelo, sin tener que depender de tecnología importada, que frecuentemente es costosa.

PALABRAS CLAVE: Resistencia mecánica, penetrómetro cónico, física de suelos, suelo forestal, densidad aparente.

ABSTRACT

Soil strength is an important indicator of soil physical conditions. Because the Forest and Soils Inventory of Mexico is requiring to include indicators of soil physical condition, a dynamic cone penetrometer for measuring soil strength in forest soils was designed and validated in this study. The designed penetrometer has the advantage of being lightweight, portable and of practical use. To validate the penetrometer, field measurements were made under different ecosystems and in laboratory, using four types of soils (Calcisol, Leptosol, Phaeozem and Andosol). Results shows that a series of 10 impacts generates independent and reliable measurements of soil strength on the soil surface. This work confirms that using basic technical principles, a useful field tool for assessing soil physical conditions can be built without relying on imported technology, which is often costly.

KEYWORDS: Soil strength, conic penetrometer, soil physics, forest soils, bulk density.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la caracterización de las propiedades físicas del suelo son importantes para tomar decisiones sobre su manejo y para determinar los efectos de las prácticas mecánicas (preparación del suelo, prácticas de conservación de suelos) (Hanks, 1972). Existen diferentes variables para la caracterización física del suelo y éstas se miden directamente en campo o en laboratorio. Una variable importante del suelo es la resistencia mecánica, característica que está relacionada con otras propiedades del suelo como la densidad aparente, la textura, el contenido de humedad y la porosidad (Fisher y Binkley, 2000). La resistencia del suelo es variable durante el año debido a los cambios de humedad del mismo. Por lo que puede presentar variaciones estacionales y relacionadas con el tipo de suelo.

Desafortunadamente en México la medición de la resistencia mecánica del suelo no ha sido parte de un procedimiento rutinario en la caracterización de suelos forestales. Sin embargo, la importancia de su medición resalta para fines del establecimiento de plantaciones, programas de reforestación o evaluación de la condición del suelo en zonas forestales, ya que en todos esos casos se requiere un reconocimiento previo de la condición física del suelo. Llama la atención que en ningún programa de reforestación se tome en cuenta la resistencia mecánica del suelo como un reconocimiento previo del lugar a reforestar (Sánchez, 2008).

Una forma de inferir la resistencia mecánica del suelo es a través de la densidad aparente; sin embargo, por la influencia de la textura y contenido de humedad, no siempre hay una relación directa entre esta propiedad y la resistencia mecánica. Por lo anterior, es aconsejable que al medir la resistencia mecánica se complemente la información con datos de densidad aparente, humedad y textura (Gómez *et al.*, 2002).

Existen diversos equipos manuales y digitales de campo para medir la resistencia mecánica del suelo, los cuales pueden ser costosos y difíciles de manejar en el campo. Esta situación implica ciertas dificultades para el personal de campo que trabaja en zonas forestales, especialmente en los programas de inventario forestal. Por lo tanto, es importante dar alternativas de equipo de medición al personal de campo que se desplaza en grandes extensiones de bosque y que requiere un equipo portátil, práctico y económico.

Con base en lo anterior, el objetivo general de este proyecto fue diseñar un penetrómetro cónico simple de impacto, ligero, de transporte fácil y que contara con un proceso de validación en campo y laboratorio.

1.1 Justificación

La motivación de este trabajo surgió después de detectar la necesidad apremiante de evaluar la condición física del suelo en el inventario Nacional Forestal y de Suelos llevado a cabo por la Comisión Nacional Forestal. Siempre ha existido el interés de valorar las condiciones físicas del suelo, pero no se han probado protocolos específicos al respecto. Debido a que actualmente existen problemas de degradación física del suelo en zonas forestales, es importante proponer métodos para su evaluación.

La resistencia mecánica del suelo es un atributo físico útil que provee información del grado de compactación, además, es importante en la evaluación de la salud del bosque (Amacher *et al.*, 2007). Es primordial conocer esta información para poder tomar decisiones sobre mejores prácticas que aseguren la sustentabilidad.

1.2 Objetivos

- (1) Proponer un prototipo de penetrómetro cónico de impacto para uso en suelos forestales.
- (2) Probar experimentalmente la precisión del penetrómetro cónico para medir la resistencia mecánica del suelo.
- (3) Con base en los resultados experimentales, validar el uso de un penetrómetro cónico.

1.3 Hipótesis

- (i) El prototipo de penetrómetro cónico genera información confiable sobre la resistencia mecánica del suelo.
- (ii) Dada la precisión del penetrómetro cónico es posible validar su uso en suelos forestales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Componentes de un penetrómetro

Como en otras disciplinas, la definición de términos es importante, por lo que a continuación se presentan algunas definiciones y conceptos básicos del tema de penetrómetros cónicos para uso en suelo (Varela y Herrero 2002).

Penetrómetro (en agricultura y silvicultura): es un aparato que se desplaza en el suelo, ayudado por una fuerza externa con la finalidad de recabar información de las propiedades físico-mecánicas del suelo.

Partes del penetrómetro:

La Figura 1, ilustra un penetrómetro en su forma más común, y las partes que lo componen son:

- **Cono:** La pieza situada en el extremo del penetrómetro, con forma de cono, sobre la cual se ejerce fricción al avanzar en el suelo. Para fines de estandarización en pruebas de ingeniería, este tiene un ángulo de 30°.
- **Vástago:** varilla de acero que se utiliza para transmitir la energía de impacto desde una altura fija hasta el yunque, logrando el deslizamiento del penetrómetro a través del suelo.
- **Martillo:** Cuerpo de acero que se desliza por efecto de la gravedad a través del vástago y golpea el yunque para lograr la penetración del suelo.

-Yunque: Pieza de metal que se encuentra arriba del cono, la cual recibe la energía del golpeo que es suministrada por el martillo que se desliza a lo largo del vástago

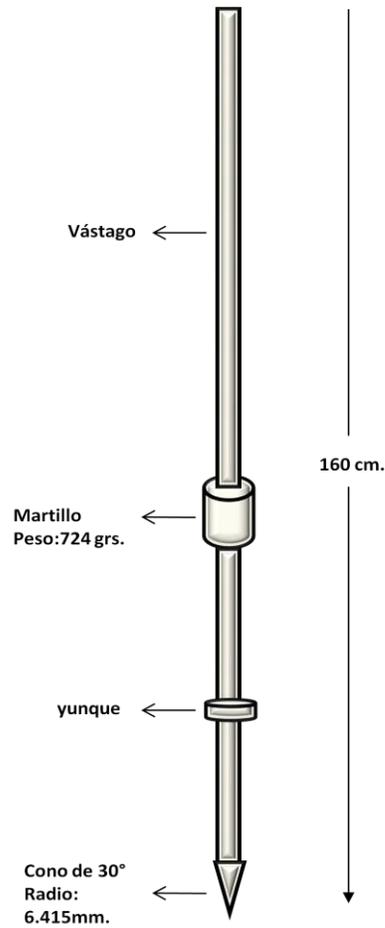


Figura 1. Penetrómetro en su forma más común, y las partes que lo componen

2.2 Antecedentes del uso del penetrómetro cónico de impacto

La primera vez que se usó el penetrómetro dinámico en la ciencia del suelo se atribuye a Parker y Jenny (1945), quienes cuantificaron la resistencia del suelo mediante la medición de la energía cinética necesaria para que el penetrómetro se desplazara a una profundidad determinada. En los primeros diseños de penetrómetros de impacto se utilizaron martillos de aproximadamente 9 kg, que se dejaban en caída libre a una altura de 30 cm (Vanags, 2006). Es evidente que con los primeros diseños se consideraba su uso en terrenos agrícolas de fácil acceso y topografía plana. El desplazamiento en zonas forestales con equipo de 9 kg es difícil, si se tienen que realizar varias mediciones.

De acuerdo con Ruiz (2004), las primeras aplicaciones del penetrómetro de impacto fueron con fines militares, con el propósito de conocer las condiciones del suelo para el tráfico de vehículos. La resistencia mecánica del suelo y la presión de los neumáticos es de importancia para la eficiencia de desplazamiento de equipo militar. Este mismo autor, menciona que en 1983, el penetrómetro de impacto fue propuesto en el XVIII Congreso de la ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologists) celebrado en Cuba, para determinar el laboreo en áreas cañeras. Entre los años de 1989 y 1994 el penetrómetro de impacto fue evaluado en los suelos de Matanzas y Santi Spiritus, Cuba, obteniendo como resultado que el equipo era lo suficientemente confiable y adecuado en la evaluación de propiedades físicas del suelo.

2.3 Tipos de penetrómetros

Hay diferentes tipos de penetrómetros con los que pueden evaluarse las propiedades físicas del suelo, en este apartado se hará una breve descripción de ellos

1. Penetrómetro dinámico. Es un instrumento que utiliza un martillo para golpear al yunque y lograr desplazarse dentro del suelo. De esto se deduce la resistencia a la penetración. Este tipo de penetrómetro se utiliza en todos los tipos de suelo, es rápido y relativamente económico (Sanz, 1975).
2. Penetrómetro estático. El fundamento es el mismo que el del penetrómetro dinámico, pero el hundimiento en el suelo se realiza de una manera continua y normalizada. Es decir el desplazamiento de este penetrómetro se realiza a velocidad constante. En general se escoge una velocidad de penetración constante de 3 milímetros por segundo. Se usa en casi todos los tipos de suelo, aunque la precisión se reduce con la pedregosidad y el exceso de materia orgánica (Navarro, 2004).
3. Penetrógrafo. Es una herramienta para medir la fuerza de la penetración de tierra, y es particularmente adecuado tanto para ingeniería civil como

para aplicaciones agronómicas y de evaluación de suelo de parques urbanos. La profundidad operativa depende de la longitud del vástago y las condiciones del suelo; sin embargo, pueden explorarse profundidades de hasta 80 centímetros. A lo largo de esa profundidad puede hacerse una medición continua, registrando la resistencia encontrada en las diferentes capas de suelo. Tiene la capacidad de almacenar la información en formato digital y genera gráficas en el curso de las operaciones, lo que hace mucho más rápido y preciso el trabajo de campo. Para asegurar la verticalidad de la penetración del instrumento en el suelo, el penetrógrafo está equipado con un nivel de burbuja (Rufat *et al.*, 2006).

4. Penetrologger. Es un instrumento electrónico que almacena los valores de penetración hasta una profundidad de 80 cm. Puede programarse desde una computadora personal o desde el mismo instrumento (Quero, 2007).
5. Penetrómetro digital. Mide y registra en forma digital la compactación de un suelo rápida y efectivamente. Es un instrumento útil para medir, registrar y analizar la compactación del suelo en campo. Un sensor sónico exclusivo de profundidad proporciona las lecturas de la profundidad en incrementos de 2.5 cm y una célula de carga mide la resistencia a la penetración. Los datos de compactación se leen en forma digital en libras por pulgada cuadrada (PSI) o en KPa. Un registrador tipo

datalogger incorporado elimina la necesidad de registrar los datos manualmente. Compatible con los GPS para mapeos de compactación (Ramírez *et al.*, 2008).

6. Penetrómetro de bolsillo. Determina la resistencia del suelo a la penetración, para determinar sus distintos niveles de compactación superficial. Se utiliza en evaluaciones superficiales de hasta 5 milímetros; es de uso conveniente en la descripción física de perfiles de suelo (Mejía, 2006).

Los tipos de ensayos que se hacen en Ingeniería civil con el penetrómetro dinámico y estático son el ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de penetración con el cono y ensayo de penetración estática con el cono (CPT) (Varela, 2002).

2.4 Penetrómetro cónico dinámico y resistencia mecánica

El penetrómetro cónico dinámico es una herramienta adecuada para el estudio indirecto de la densidad y resistencia mecánica del suelo; también es una herramienta útil para el control de las cimentaciones en la construcción (Navarro *et al.*, 2004). La ventaja principal del penetrómetro cónico es su bajo costo y transporte fácil.

El equipo de cono dinámico se ha usado en las últimas dos décadas para la determinación de la resistencia de los suelos al esfuerzo cortante, correlacionando el número de golpes necesarios para penetrar una punta cónica en el suelo en una longitud determinada, similar a una prueba de penetración estándar convencional (Ramírez *et al.*, 2009).

2.4.1 Modo de uso del penetrómetro

El desplazamiento en el suelo se realiza por golpeo de un martillo con un peso definido, sobre un cabezal colocado en la parte superior del vástago. Dicho martillo se eleva a una altura fija, y se deja caer libremente un número de veces que se considere suficiente para el nivel de profundidad de exploración. Herrick *et al.*, (2002) utilizaron 14, 7 y 5 impactos para un desplazamiento de martillo de 20, 40 y 60 cm, respectivamente para niveles de exploración de 15 cm. Un criterio puede ser el número de golpes necesarios para que el penetrómetro se introduzca a una determinada profundidad (Bakker, 2009); sin embargo, en este caso, la energía aplicada al suelo varía en cada medición.

2.4.2 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica es una propiedad física del suelo que proporciona información sobre el grado de compactación, por lo tanto es una herramienta

muy valiosa para identificar impedimentos al desarrollo radical y sobre la base de ello, decidir la preparación del suelo previo al establecimiento de una plantación o reforestación (Krüger *et al.*, 2009), ya que si no se hace una evaluación previa del suelo y se reforesta un área determinada, los resultados de la reforestación serán pobres si existen horizontes endurecidos.

El crecimiento de la raíz varía con la textura del suelo y, aunque hay una relación general de la densidad del suelo y la textura, no todos los valores altos de densidad corresponden a una resistencia mecánica alta. Por ejemplo, mientras que los valores de densidad aparente de 1.4 Mg m^{-3} , en suelos arcillosos limitan el crecimiento de la raíz; en los suelos arenosos se requieren de densidades de 1.7 Mg m^{-3} para impedir el crecimiento radicular (Tirado, 2005).

Varios estudios han demostrado que la compactación del suelo ocurre principalmente en los primeros 40 cm de la superficie del suelo, donde se presenta el mayor número de raíces que tienen como función principal la absorción (Gómez *et al.*, 2002). Cuando el suelo se compacta, se reducen los macroporos del suelo, estos son importantes porque permiten el movimiento rápido del agua y el aire en el suelo y sin ellos, se presentan condiciones anaeróbicas en la etapa de crecimiento. Al ocurrir condiciones anaeróbicas en el suelo, se reduce el oxígeno disponible afectando el crecimiento de las plantas (Tirado, 2005) y se producen gases de efecto invernadero como CH_4 y N_2O .

La resistencia mecánica que afecta el crecimiento de las raíces puede deberse tanto a la presencia de rocas u horizontes muy pedregosos a poca profundidad,

como a la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas, en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas.

Debe tenerse en cuenta que aunque las raíces son capaces de penetrar por grietas y poros muy pequeños, las paredes de éstos deben ser capaces de ceder ante la presión ejercida por la raíz. No obstante, conforme aumenta la densidad del suelo, el crecimiento de las raíces requiere un mayor gasto de energía, por lo que es necesario poder detectarla y controlarla (Torres, 2008).

2.5. Densidad aparente

La densidad aparente es una de las propiedades del suelo que reviste mayor importancia y se refiere a la relación entre la masa de suelo seco por unidad de volumen (Cabalceta, 2009). Esta propiedad se utiliza para estimar el espacio poroso, transformar la humedad gravimétrica a volumétrica o a lámina y en estimación de reservorios para calcular la masa neta de nutrimentos por unidad de volumen de suelo. También se utiliza como parámetro para clasificar los suelos orgánicos y derivados de cenizas volcánicas. Una densidad baja, generalmente equivale a más porosidad y mayores agregados del suelo. Un suelo de un bosque saludable tendrá una densidad baja, lo que corresponde a mayor estabilidad, menos compactación y, probablemente, mayor contenido de humedad que un suelo con una densidad mayor (Lampurlanés *et al.*, 2003).

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia mecánica y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un

incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica aumenta y la porosidad disminuye (Cabalceta, 2009).

2.4.1 Métodos para medir la densidad aparente

Según Rucks *et al.*, (2009) los métodos de medición de densidad aparente son los siguientes:

- **Cilindro**

En cada uno de los horizontes en donde se desee conocer la densidad aparente, se toma una muestra de suelo usando una barrena para la toma de muestras. La técnica consiste esencialmente de un muestreador dentro del cual se acomodan anillos de un diámetro de dos pulgadas y de altura variable de 2 a 6 pulgadas. El muestreador consta de un martillo deslizable que ayuda a la toma de muestra. El suelo se corta a nivel de las dimensiones del cilindro, es decir al ras se lleva a la estufa para remover la humedad a 105°C durante 24 horas (Figura 2).

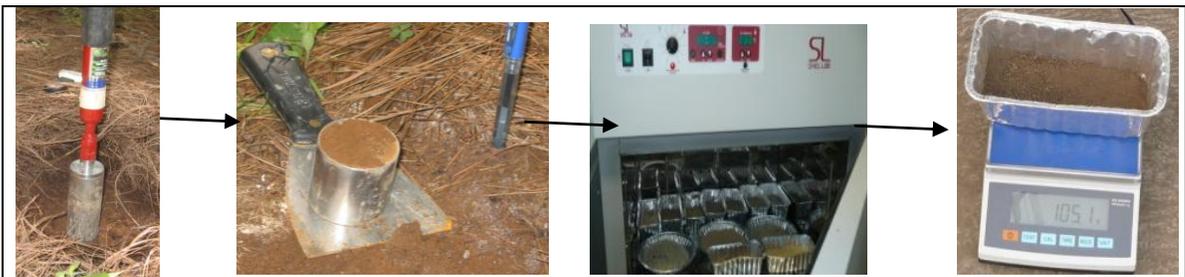


Figura 2. Método del cilindro para determinar la densidad aparente.

• Terrón

Este método se basa en el principio de Arquímedes, que establece que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desplazado. Considerando que el peso es el producto de masa por gravedad, es posible que determinando el peso de cuerpo inmerso en un fluido se deduzca su volumen. El método del terrón consiste en separar cuidadosamente del suelo "*in situ*" terrones de 30 a 100 gramos y luego pesarlos; recubrirlos con parafina, volverlos a pesar dentro del agua y determinar el volumen por peso registrado. Se hace la corrección correspondiente por el peso de la parafina impregnada (Blake, *et al.*, 1986).

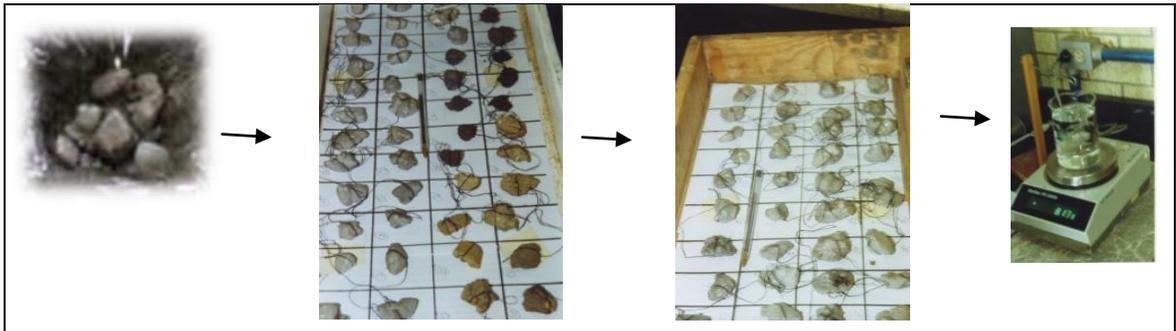


Figura 3. Método del terrón para determinar densidad aparente.

Existen otros métodos para calcular la densidad aparente como el de excavación, aspersor de rayos gamma y muchos más; sin embargo, los dos más importantes ya se mencionaron.

2.6 Medición de la humedad

El contenido de humedad de un suelo es la relación entre la masa de las partículas y la masa de agua que guarda, esto se puede expresar en términos de porcentaje con respecto a la masa o al volumen del suelo. También se puede expresar como una lámina de agua a determinada profundidad del suelo (Bacchi, *et al.*, 2003).

El estado hídrico del suelo puede ser expresado por:

- a) Por unidad de masa de suelo: Conocido como humedad gravimétrica (W).

Es la relación entre la masa del agua y la masa de la fracción sólida.

$$W = M_a / M_s$$

Donde: M_a es masa de agua y M_s es masa de suelo.

Cuando es porcentaje se expresa

$$W\% = (M_a / M_s) \times 100$$

- b) Por unidad de volumen de suelo: Conocido como humedad volumétrica (θ_v). Es la relación entre el volumen del agua (V_a) y el volumen de la muestra (V_s).

$$\theta_v = V_a / V_s$$

También puede ser expresada en porcentaje si se multiplica por 100.

2.6.1 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo

Tensiómetros:

Son aparatos que miden la presión que ejerce el suelo sobre el agua. A medida que el suelo pierde agua la presión requerida para extraer el agua aumenta, es decir, la matriz del suelo ejerce más fuerza para retener agua. Por la razón anterior a este componente de potencial de agua se le conoce como potencial mátrico. Los tensiómetros son un sistema cerrado con agua donde una cerámica con microporos, permite la salida de agua hacia el suelo, generando un vacío en el interior del sistema, el cual puede medirse con un manómetro. Por lo tanto observando cómo varía el valor de la presión podemos saber la evolución del contenido de agua en el suelo. Normalmente se instalan dos tensiómetros a distintas profundidades para medir gradientes hidráulicos y conocer la dirección de los flujos de agua en el suelo. Antes de enterrar el tensiómetro en el suelo es necesario llenarlo de agua eliminando cualquier burbuja de aire (Goyal, 2006).

Sonda de neutrones:

Esta emite neutrones de movimiento rápido los cuales chocan contra los núcleos de hidrógeno y desvían su trayectoria. Algunos de los neutrones desviados alcanzan a un detector situado en la misma sonda. La posibilidad de que los neutrones desviados alcancen la sonda es proporcional a la cantidad de

hidrógeno presente en el suelo. Dado que el agua es la principal fuente de hidrógeno en el suelo, puede tomarse como medida de la humedad del suelo la frecuencia con que los neutrones alcanzan al receptor. La sonda de neutrones se introduce en el suelo a la profundidad deseada, leyéndose el porcentaje de humedad en una tabla de conversión. El método es sencillo y rápido (Bacchi, *et al.*, 2003).

Otra herramienta útil es el TDR (del Inglés Time Domain Reflectometry) (Figura 4) este mide la humedad en forma instantánea. Este aparato es preciso y de manejo fácil para detectar la humedad de suelo. El medidor de humedad de suelo muestra la humedad actual en porcentaje volumétrico y con la densidad del suelo se estiman contenidos en masa (Blanco, 2009).



Figura, 4. Fotografía de un equipo de TDR (Time Domain Reflectometry)

El uso de la TDR para el estudio de la humedad del suelo y su manejo en campo es mucho más fácil y rápido que otros sistemas convencionales como la sonda de neutrones, la determinación gravimétrica o los bloques de yeso. Asimismo, la señal que da es relativamente independiente de la composición mineral del suelo y de la temperatura. Este funciona en un amplio rango de

suelos ya que tiene una calibración universal, sin embargo, los contenidos de materia orgánica altos como ocurre en Histosoles, influyen en su precisión (Oliet *et. al.*, 2009).

2.6 Relación de la resistencia mecánica con densidad aparente y contenido de humedad.

Dos parámetros importantes que se relacionan con la resistencia mecánica del suelo son la densidad aparente y el contenido de humedad.

El aumento en la densidad aparente por un lado causa un aumento de la resistencia mecánica y por otro, reduce la porosidad y la tasa de infiltración de agua, causando disminución en el drenaje, reduciendo la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces (Ramírez *et. al.*, 2009). Por lo anterior, una forma indirecta de evaluar la resistencia mecánica del suelo es con la determinación de la densidad aparente.

Por otra parte el contenido de agua es un factor muy asociado a la resistencia mecánica de los suelos. Los suelos en estado natural presentan mayor resistencia mecánica de acuerdo a la menor cantidad de humedad que presentan durante el año.

Autores como Da Silva *et al.* (2004), sugieren que es posible calcular un indicador integral de la condición física del suelo, el cual han denominado

“Intervalo mínimo de disponibilidad de agua” (The least limiting water range). Estos autores definieron gráficamente el comportamiento de la resistencia mecánica, la densidad aparente y contenido de humedad encontrando que existe una región donde las condiciones físicas y potencial de agua del suelo son aptas para el crecimiento de la raíz (Figura 5).

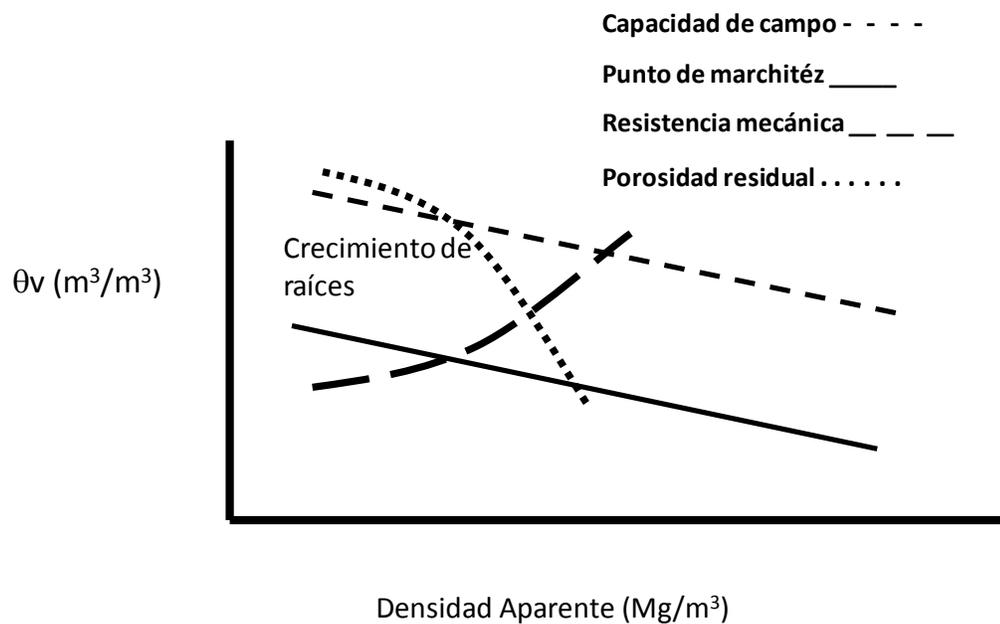


Figura 5. Concepto gráfico del intervalo mínimo de disponibilidad de agua (Da Silva *et al.*, 2004).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El estudio se desarrollo en dos etapas, la primera consistió en la prueba del penetrómetro en el campo, una vez que se decidió el diseño final. La prueba en campo, consistió en ensayar el penetrómetro en 14 sitios con diferentes tipos de vegetación forestal y que se describen posteriormente (Figura 6). La segunda, en pruebas de laboratorio en las instalaciones del Colegio de Postgraduados el cual se ubica en el Estado de México. Sus coordenadas geográficas son 98° 39' 28" y 99° 01' 45" Latitud, 19° 23' 40" y 19° 33' 41" Longitud con una altitud: 2,250 msnm

3.2 Desarrollo del prototipo y pruebas de campo y laboratorio

3.2.1 Diseño del prototipo

Para la construcción del penetrómetro se emplearon las experiencias encontradas en la revisión de literatura y a partir de esta base, se hicieron las primeras propuestas considerando que la utilidad del equipo debería ser específica para suelos forestales. Se propusieron varios diseños los cuales no

resultaron prácticos dado que se rompieron en los procesos de prueba. La principal razón de ruptura fue debido a que los segmentos de ensamble no se unían con la suficiente solidez a través de la rosca y esto hacía que la estructura completa se rompiera con el uso. El prototipo final que se mantuvo en las pruebas fue elaborado con segmentos de acero inoxidable armable de 6 piezas de 45 cm de largo y 1.1 cm de diámetro. El peso del martillo es de 724.9 gramos, la forma de éste es cilíndrica con un diámetro de 4.3 cm y una altura de 6.3 cm. El vástago está compuesto por seis segmentos y tiene un peso de 1855 gramos, la punta cónica se une al vástago a través de una rosca haciendo fácil el cambio de la punta. El cono tiene un ángulo de 30° y 6.415 mm de radio. También se le hizo un tripié de plástico retráctil el cual se adecúa a la altura que se desee utilizar, este también cuenta con un nivel de burbuja para mantener la verticalidad del penetrómetro. El diseño del prototipo de penetrómetro cónico se basó en el principio de caída libre de un martillo (una pieza de metal). El impacto provoca que la punta del penetrómetro cónico penetre el suelo venciendo su resistencia. La energía aplicada depende del número de golpes.

El indicador de resistencia se estima a partir de la energía aplicada y la profundidad aplicada. La fórmula que se utiliza para evaluar la resistencia mecánica del suelo es la siguiente:

$$R_s = W_s / P_d$$

Donde:

R_s es la resistencia mecánica del suelo;

W_s es el trabajo hecho por el suelo

P_d es la distancia que recorre el penetrómetro a través del suelo.

El trabajo realizado por el suelo se calcula de acuerdo al cambio de energía cinética del martillo en cada recorrido de 1m de caída. Cuando el penetrómetro es introducido en el suelo por el martillo, la energía cinética del martillo es transferida al cono del penetrómetro. El trabajo se calcula con las siguientes fórmulas:

$$KE = W_s = 1/2mv$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a(x)}$$

Donde:

KE = energía cinética

v = velocidad final

v_0 =velocidad inicial

x =altura fijada

a =gravedad

Las pruebas preliminares de operación indicaron que 10 impactos eran suficientes para considerarse como una medición independiente de la resistencia mecánica del suelo.

3.2.2 Ensayo preliminar de campo

El penetrómetro se probó en suelos de diferentes tipos de bosques aplicando un transecto de 10 estaciones y en cada una de ellas se hizo un sitio en la cual se realizó una serie de 10 impactos. El promedio de los sitios de las estaciones se tomó como una medición de la resistencia mecánica del suelo. Paralelamente se tomaron muestras de suelo para determinarles su densidad aparente. De un total de 14 sitios, ubicados, en diferentes ecosistemas de la República Mexicana, sólo en dos sitios (5 y 10) no pudo usarse el equipo por exceso de roca superficial.

Los sitios donde se hicieron las pruebas de campo con el prototipo diseñado se describen a continuación y su ubicación se muestra en la Figura 6.

Sitio 1

Se ubica en la región La Morena, San Luis Potosí, es un sitio con afloramiento de roca y vegetación arbustiva. Sólo hay suelo en lugares donde se acumula material fino transportado. La cobertura de vegetación es entre 30 y 40%. La hojarasca debajo de los árboles (encinos y mezquites), puede ser de 2-3 cm y el humus (capas en descomposición), de 2 cm. El material geológico es de roca volcánica y metamórfica.

Sitio 2

Se ubica en la ecoregión Desiertos de Norte América, en la región La Morena en SLP. El suelo es extremadamente delgado. Existen rocas abundantes, aunque no se encuentra un horizonte de lecho rocoso; sin embargo, existe una

capa de tepetate muy superficial. La vegetación típica es: yuca (*manihot esculenta*) y gobernadora (*Larrea tridentata*).

Sitio 3

Se ubica en las sierras templadas de Valle de los Fantasma, San Luis Potosí. Es un bosque de encino. Condición muy húmeda y alto grado de oxidación en el suelo. Afloramiento de roca 30% con respecto a la superficie. Hay evidencias de pastoreo intensivo y abundante presencia de líquenes.

Sitio 4

Se ubica en los Desiertos de Norte América en Miguel Hidalgo, SLP. La vegetación es matorral espinoso. La textura del suelo superficial, medida al tacto, es franco-arenosa. El suelo está desnudo en 70% de su superficie, tiene poco desarrollo de estructura ya que los agregados se destruyen fácilmente con el manipuleo del suelo. El suelo se perturba fácilmente por el paso de humanos. Se encuentra aproximadamente un 15% de musgo sobre la superficie, la cual es muy importante para la protección del suelo. El suelo superficial tiene baja resistencia mecánica.

Sitio 6

Ubicado al norte de Ciudad Valles, SLP. Ubicado en una transición de selva cálido seca y selva calidad húmeda. Sin embargo, se encontró abundante *Bursera sp.*, como en el sitio 5. El suelo es rocoso y la cobertura es del 100% no hay evidencia de erosión o compactación, pero el potrero contiguo tiene

serios problemas de compactación. Alrededor del 40% muestra daños de compactación debido al paso del ganado. El suelo que se va formando cubre parte de la superficie pero no es muy profundo. Bajo el horizonte A de 20 cm se encuentra el lecho rocoso.

Sitio 7

Ubicado en la selva cálida húmeda de Rascón, SLP. El primer sitio de selva húmeda, en este se ve cedro rojo y ceiba. En lugares contiguos existen huertos de cítricos. El suelo es muy arcilloso y está cubierto por herbáceas, y rocas y hojarasca que en conjunto logran una cobertura del 100% y por lo tanto a pesar de la pendiente fuerte (50%) no hay erosión. La profundidad del mantillo va de 5 a 8 cm. No se distingue fácilmente la capa de humus.

Sitio 8

Ubicado en el Laurel Tamazunchale, SLP. Es una selva perturbada. Hay plantación de café. La pendiente es mayor al 100% y la superficie del suelo es extremadamente rocosa. Es un sistema productivo que incluye especies como mamey (*Mamea americana*), cedro (*Cedrela odorata*), caoba (*Swietenia macrophylla*), y palma camedor (*Chamaedorea elegans*). En los espacios donde hay mantillo la profundidad llega a 8 cm, pero oscila entre 5-8. El humus es variable y va de 2-6 cm. En este sitio no se probó el penetrómetro.

Sitio 9

Ubicado en el poblado de Pinal de Amoles en la Sierra de Queretaro. Es un Bosque de *Pinus patula*. Las principales especies que se encontraron en el estrato arbustivo son: *Baccharis sp.* y *Crataegus sp.*

Sitio 11

Ubicado cerca del poblado de San Isidro, a 30 km de Monterrey, Nuevo León, la vegetación es matorral espinoso. Hay grandes planicies y suelo muy pedregoso. Son rocas pequeñas de 1-10 cm de diámetro y con extremos muy redondos. El suelo esta 90% protegido por vegetación menor (hasta una altura de 2 m). No hay evidencias de erosión. Sólo en las partes bajas de micro relieve hay suelo. Se dificulta la toma de muestra de densidad aparente. El uso del suelo es ganadería extensiva. El suelo superficial es de baja infiltración debido a que se forma una costra en la superficie que impide el paso del agua.

Sitio 12

Peña Blanca, Nuevo León. El uso del suelo es para ganadería extensiva. La protección del suelo por la vegetación se estima en 60%. La cobertura vegetal es por matorral espinoso y pastos. No hay evidencia de erosión, pero sí de compactación, específicamente sobre las veredas que usa el ganado.

Sitio 13

Ubicado en Ojos Negros, Ensenada, Baja California. Vegetación herbácea y arbustiva con especies sin espinas. Hay algunas evidencias de uso ganadero,

pero es bajo. Varios senderos para el tránsito de humanos y ganado muestran efectos de compactación. El suelo está cubierto en un 90% por la vegetación. La cobertura se logra por el estrato herbáceo de 1.2 m y por un estrato de 40 cm representado por compuestas y pastos. La textura superficial es arenosa. Hay poca pedregosidad superficial.

Sitio 14

Ubicado en Ensenada Valle de Guadalupe, Baja California. Se tomó sobre una cañada donde hay diferentes especies de encino. Hay también *Platanus sp.*, *Salix* y *Acacia* (introducida), esta vegetación sólo se da en cañadas, donde hay más humedad y tiende a prolongarse a lo largo de las cañadas. Bajo el encino la materia orgánica superficial es hasta 12 cm, el suelo está protegido en un 90% se observa perturbación por uso pecuario, hay varias veredas compactadas por ganado. No hay una capa de fermentación. Inmediatamente abajo de la capa orgánica, sigue el suelo mineral con estructura en bloques y fuertemente desarrollada.

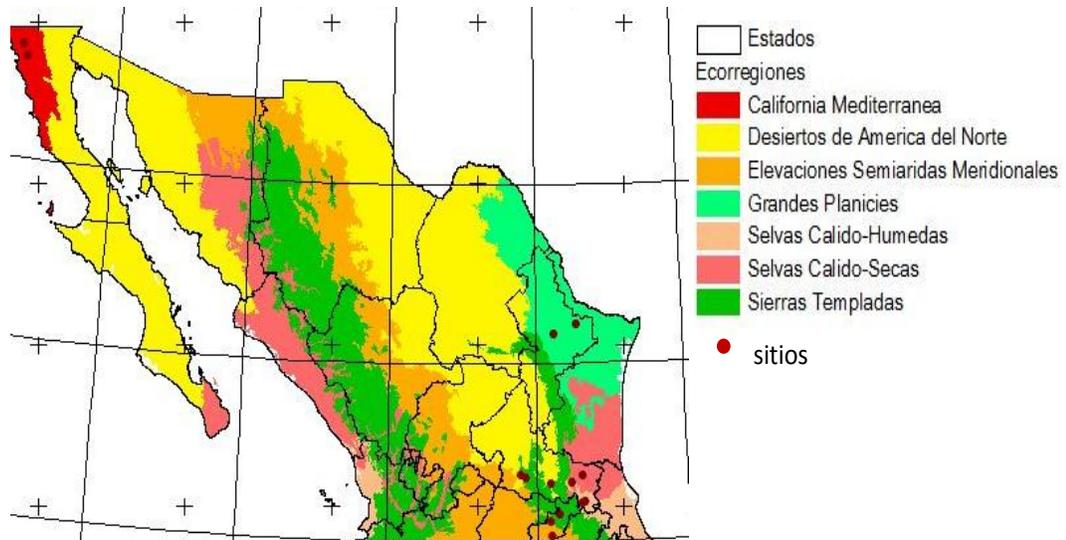


Figura 6. Sitios donde se hicieron los ensayos de campo.

3.2.3 Primer ensayo de laboratorio

Para conocer la precisión de penetrómetro en suelos forestales, se hicieron dos ensayos en laboratorio bajo condiciones controladas de humedad y densidad aparente.

Las pruebas de laboratorio para el primer ensayo se concentraron en tres tipos de bosque diferentes que corresponden a los sitios tres, cuatro y nueve, descritos anteriormente. Estas muestras se recolectaron de los primeros 10 cm del perfil, posteriormente estas muestras se llevaron al vivero, se extendieron y se secaron a temperatura ambiente, una vez secas las muestras de suelo se tamizaron a 4 milímetros para preservar los agregados medios y finos del suelo (Figura 7).



Figura 7. Secado al aire de las muestras de suelo.

Ya tamizadas las muestras, se elaboraron recipientes de PVC de 11 cm de diámetro y 30 cm de altura. Posteriormente, estos recipientes se llenaron con suelo con una capa de 25 cm de suelo. Con las muestras de suelo, se llenaron tres recipientes de PVC como se muestra en la Figura 8, después se pesaron en una balanza con precisión a décimos de gramo.



Figura 8. Envases de PVC con muestras de suelo.

Llenados los recipientes y pesado el contenido de suelo y los envases, se colocaron en un recipiente con agua para llevarlos a saturación como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Muestras de suelo en proceso de saturación.

Cuando las muestras alcanzaron el punto de saturación, se sacaron del agua y se dejaron secar hasta alcanzar a un contenido de humedad del 30% con respecto a la masa. En todas las muestras se probó el penetrómetro diseñado aplicando una serie de 10 impactos para ver la sensibilidad de este (Figura 10). A todas las muestras de suelo se les determinó la densidad aparente, el contenido de humedad y la resistencia mecánica.



Figura 10. Prueba del penetrómetro en las muestras de suelo.

3.2.4 Características generales de los suelos utilizados en las pruebas de laboratorio

Para el primer ensayo de laboratorio se emplearon tres muestras de suelo provenientes del recorrido de campo. Las muestras de suelo que se recolectaron son de los sitios 3, 4, 9 mencionados. La muestra del sitio 3 es de un Bosque de Encino la cual pertenece a la clase textural de arcilla, la del sitio 4 es de un Matorral Espinoso, la cual tiene una clase textural Franco, y la del sitio 9 que se recolectó en un Bosque de Pino; es de la clase textural migajón arcilloso. Para el segundo ensayo de laboratorio se utilizó una muestra de un bosque de *Pinus patula* del predio de Aquixtla, Puebla. Esta muestra es de la clase textural arcilla. El Cuadro 2.1, muestra otras características edafológicas importantes de estos cuatro suelos. Los suelos son de pH moderadamente ácido a neutro (6 a 7). El Ca y Mg son los cationes dominantes en la zona de intercambio. El porcentaje de saturación de bases va de 21.6% en el suelo de bosque de encino hasta 57.8% en el suelo de la Sierra de Puebla, lo cual denota un buen estado de fertilidad en este último suelo. En este cuadro también se muestran la capacidad de retención de humedad con valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) que van de 27 a 48% y de 15 a 27.6%, respectivamente.

Cuadro 2.1. Características generales de las muestras utilizadas en los ensayos de laboratorio

Sitio	Capa (cm)	MO (%)	Nt (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH	Ca	K ----Cmol _c kg ⁻¹ ---	Mg	Na	CIC meq/100g	PSB (%)	CC % de humedad	PMP	Clase textural
3	0-30	2.29	0.11	13	10	76	7.4	33.4	0.55	2.81	0.49	24.78	100.00	36	27.6	Arcilla
4	0-30	3.63	0.18	29	48	22	7.9	31	0.92	4.74	0.05	24.78	96.83	27	15	Franco
9	0-30	2.42	0.12	25	47	27	6.4	9.3	0.39	1.94	0.16	13.22	89.45	39	19.5	Migajón Arcilloso
1	0-30	2.15	0.11	33	25	41	5.7	10.1	0.86	3.33	0.67	19.44	77.31	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

3.2.5 Segundo Ensayo de Laboratorio

La principal desventaja del primer ensayo de laboratorio, es que no hubo repeticiones con las muestras de suelo que se utilizaron, por lo que se planeó un segundo ensayo en laboratorio. Las muestras que se utilizaron para este segundo ensayo se extrajeron de un bosque de *Pinus patula* ubicado en Aquixtla, Puebla (Figura 11). Se escogió este tipo de suelo porque es representativo de los bosques templados más productivos del centro de México.

El municipio de Aquixtla se localiza en la parte Noroeste del Estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son: los paralelos 19° 42' 42" y 19° 51' 54" de latitud norte y los meridianos 97° 49' 36" y 97° 54' 06" de longitud occidental. Sus colindancias son al Norte con Zacatlán y Chignahuapan al Sur con Ixtacamaxtitlán al Oeste con Tetela de Ocampo y al este con Chignahuapan (Arredondo *et al.*, 2009).

Con las muestras recolectadas en el segundo ensayo de laboratorio se planeó un experimento factorial de tres niveles de densidades aparentes, tres niveles de humedad y con tres repeticiones. La muestra obtenida para la prueba en laboratorio se colectó de los primeros 30 cm del suelo, posteriormente se secó al aire en el vivero del Colegio de Postgraduados y se tamizó a 4 mm. El material que pasó por el tamíz se colocó en recipientes de PVC 30 cm x 11 cm creando tres tipos de densidad aparente de 0.64, 0.80, y 1 Mg/cm, estas dos últimas densidades aparentes se lograron compactando el suelo en los

recipientes de PVC (Figura 12), cuando se logró obtener los tres niveles de densidad, se llevaron a saturación (Figura 13). Una vez alcanzado el punto de saturación se ajustó a las humedades de 25%,15% y 5% (Figura 14). Para facilitar el drenaje del agua, la parte inferior del recipiente de PVC se hizo de malla tipo mosquitero de acero inoxidable.

Alcanzadas las humedades antes mencionadas se probó el penetrómetro en todas las muestras de suelo, aplicando una serie de 10 impactos ajustando en forma vertical el penetrómetro con la ayuda del tripié y (Figura 15).



Figura 11. Secado de suelo previo al experimento factorial.



Figura 12. Compactación de muestras de suelo.



Figura 13. Muestras de suelo en proceso de saturación.



Figura 14. Muestras de suelo bajo secado al aire.



Figura15. Verificación de humedad alcanzada y medición de resistencia mecánica.

Las condiciones controladas del experimento facilitaron la determinación de densidad aparente, el contenido de humedad y resistencia mecánica del suelo.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Prototipo final

El penetrómetro cónico de impacto diseñado se considera viable para evaluar la resistencia mecánica en los suelos forestales (Figura 16 y 17). Con este modelo final, se realizaron dos pruebas en campo y dos pruebas en laboratorio lo que implicó la realización de 1250 impactos en total en las pruebas. Esto comprueba que el penetrómetro es durable sometido a trabajo de campo. El vástago y la punta cónica fueron resistentes a la deformación. El diseño del tripié que se le hizo, es una herramienta muy útil, ya que minimiza los errores de medición con el nivel de burbuja que se adaptó. Por lo tanto, este modelo final es viable para evaluar la resistencia mecánica de los suelos forestales.

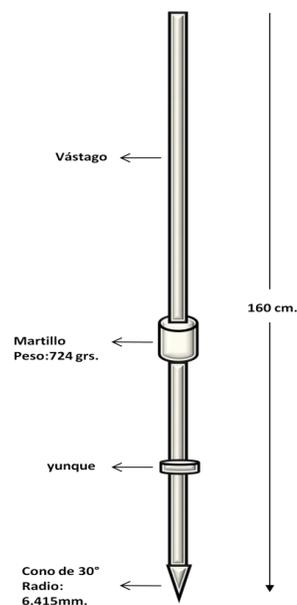


Figura 16. Prototipo de penetrómetro cónico de impacto.



Figura 17. Penetrómetro cónico de impacto y su tripié.

4.2 Resultados del primer ensayo en campo

En el primer ensayo de campo se observó una amplia variación de densidades aparentes en los sitios en donde se probó el penetrómetro. Los valores extremos de densidad aparente van de 0.4 Mg m^3 en una selva cálida hasta 1.2 en un bosque de encino, en la región mediterránea de Baja California (Figura 18).

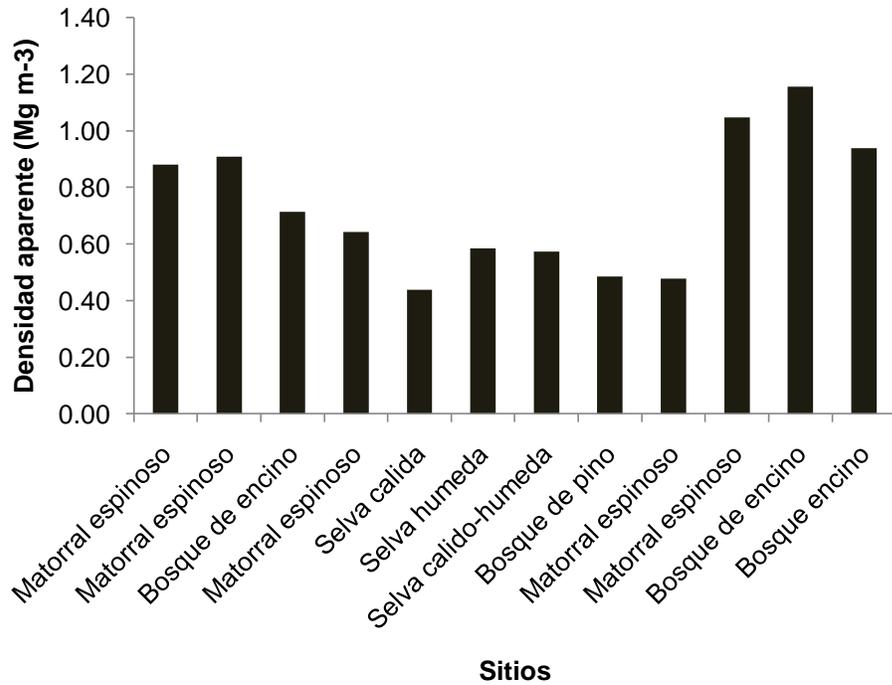


Figura 18. Densidad aparente de los sitios de prueba preliminar del penetrómetro.

También se muestra que la variable de resistencia mecánica y densidad aparente tienen una correlación baja ($R=0.48$), lo cual se explica porque los suelos en campo se encontraban con diferente contenido de humedad. Los valores de resistencia en los ensayos de campo varían en promedio de 5 a 15 $J.cm^{-1}$ (Figura 19). No obstante, esto indica que el penetrómetro diseñado es sensible para detectar diferencias en la resistencia mecánica del suelo en diferentes tipos de suelos.

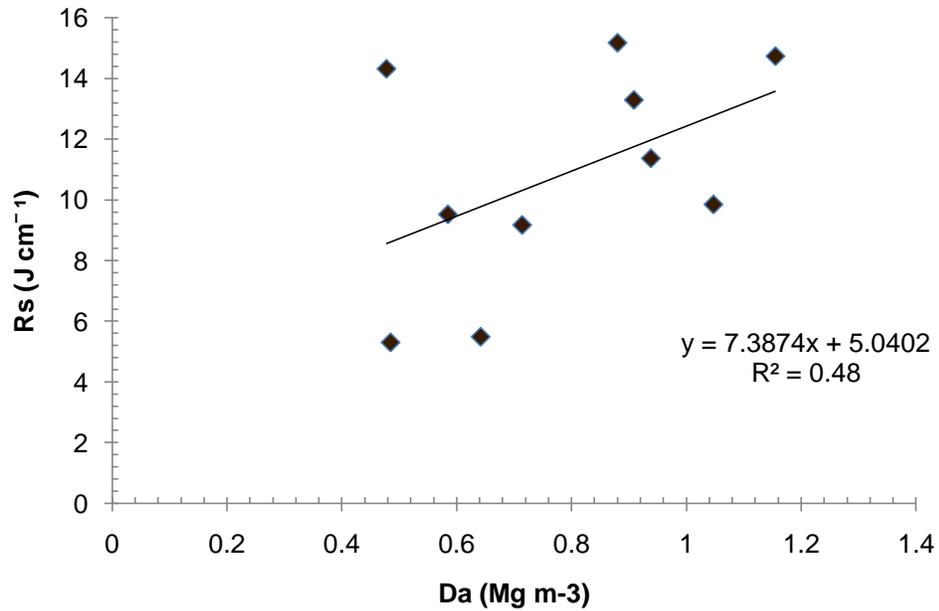


Figura 19. Relación entre resistencia mecánica (Rs) y densidad aparente (Da).

4.3 Resultados del primer ensayo de laboratorio

En los ensayos en laboratorio con tres suelos diferentes, ajustados a un contenido de humedad del 30% y aplicando una serie de 10 impactos, mostraron diferentes tendencias dependiendo del tipo de suelo (Calcisol, Leptosol, y Feozem) (Figura 20). Este resultado también corrobora que el penetrómetro es sensible para evaluar la resistencia mecánica de diferentes suelos. La resistencia mecánica del suelo en los ensayos en laboratorio, después de 10 impactos fue de 52 Jcm⁻¹ para el Calcisol, 42.9 Jcm⁻¹ para Feozem y 57.7 Jcm⁻¹ para el Leptosol, respectivamente (Figura 21a y b). En la Figura 21b se corrobora la variación de la resistencia mecánica en unidades de

presión y corrigiendo por el peso del vástago. La resistencia fue de 1.12 MPa en el bosque de encino (Calcisol), 0.90 MPa en el bosque de pino (Feozem), y 1.18 MPa en el matorral espinoso (Leptosol) (Figura 22).

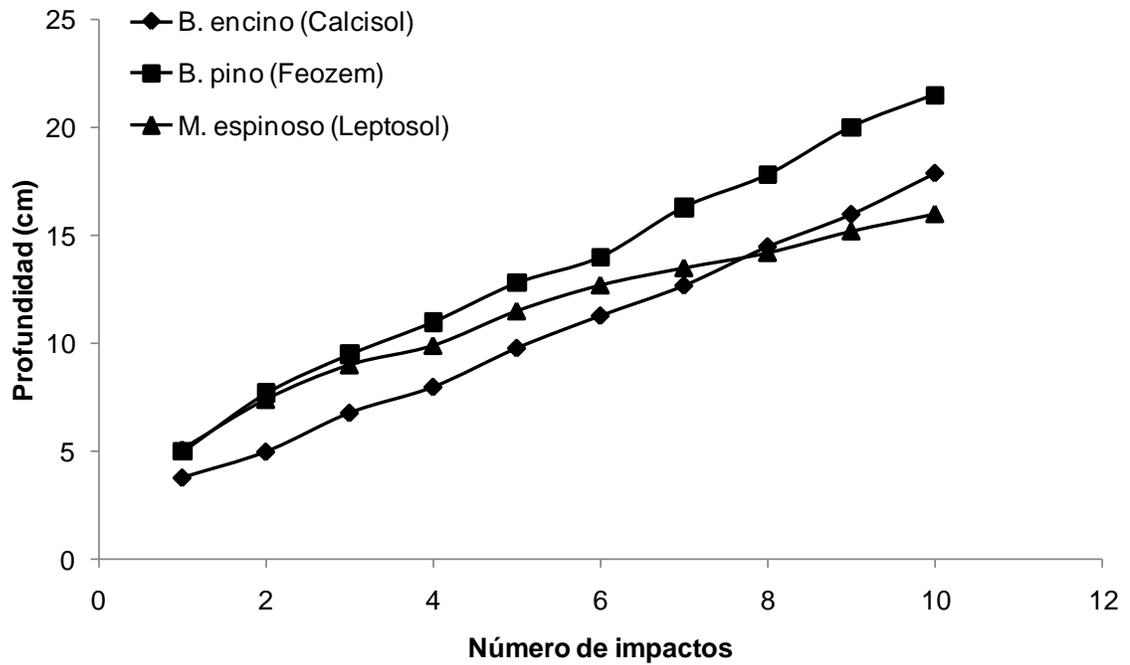


Figura 20. Relación entre profundidad y número de impactos.

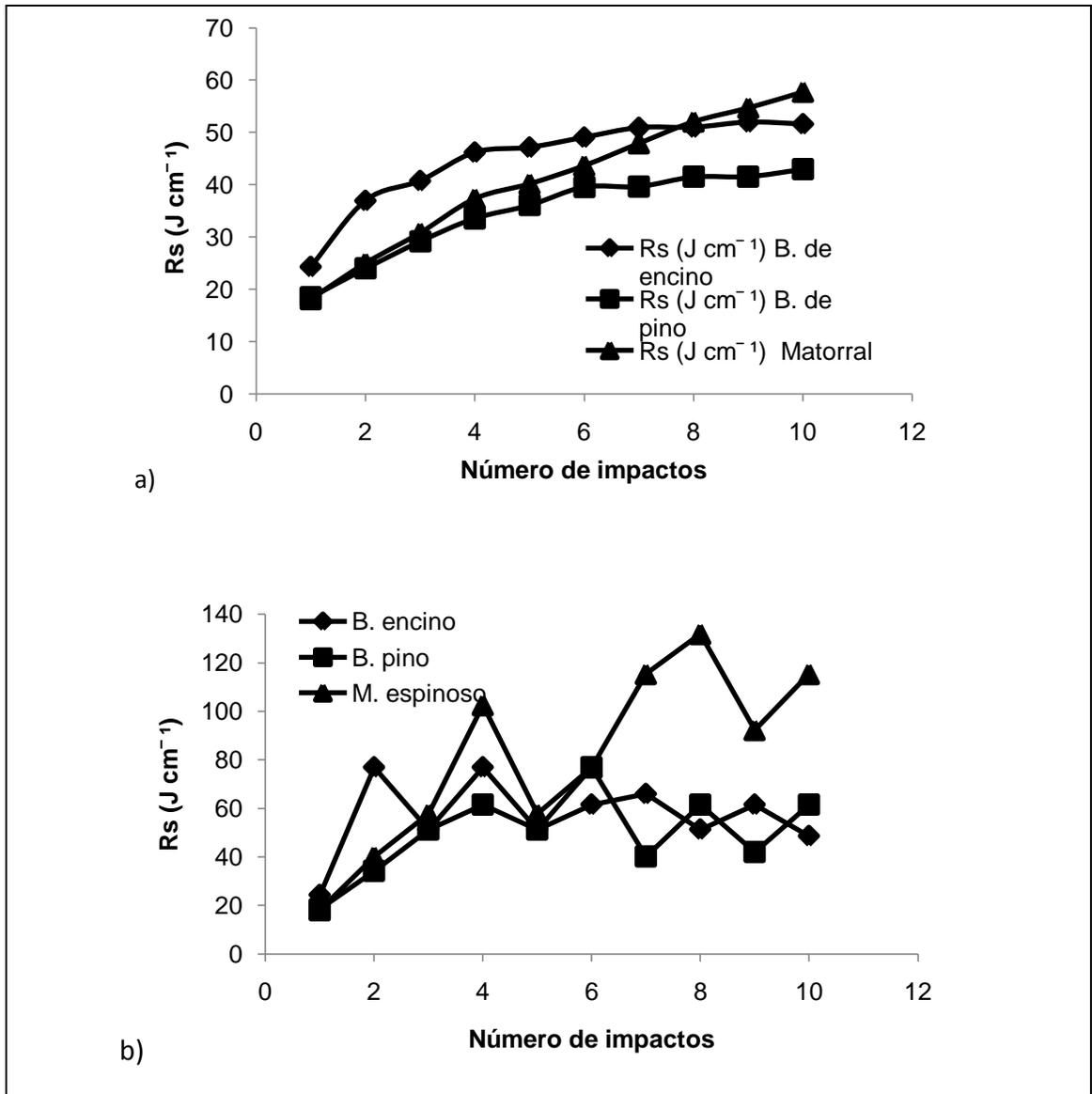


Figura 21. a) Resistencia mecánica acumulada en Jcm^{-1} , en diferentes suelos (Bosque Pino=Feozem, Bosque de Encino=Calcisol y Matorral= Leptosol) a 30% de humedad, b) Resistencia mecánica en Jcm^{-1} para cada impacto.

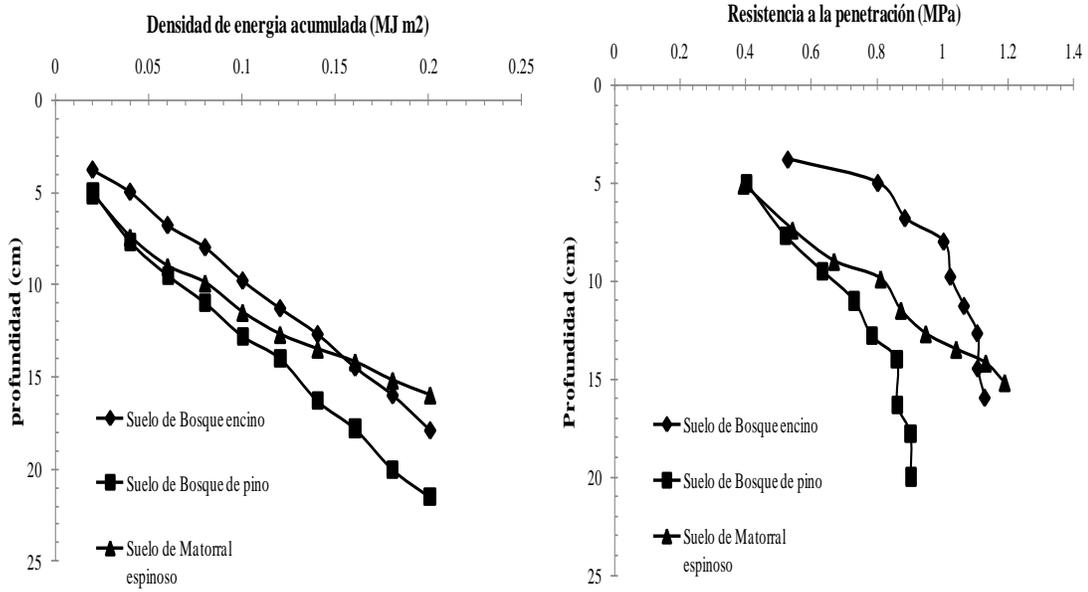


Figura 22. Energía acumulada y resistencia a la penetración medida en suelo de diferente tipo de vegetación.

4.4 Resultados del segundo ensayo de laboratorio

En el segundo ensayo de laboratorio, las muestras ajustadas a las densidades aparentes de 0.64, 0.80 y 1.00 Mg m^{-3} y a tres contenidos de humedad (25, 15 y 5%) alcanzaron la profundidad máxima de 30 cm después de 10 impactos con la humedad mayor, mientras que con la humedad media e inferior no rebasaron los 6 cm (Figura 23).

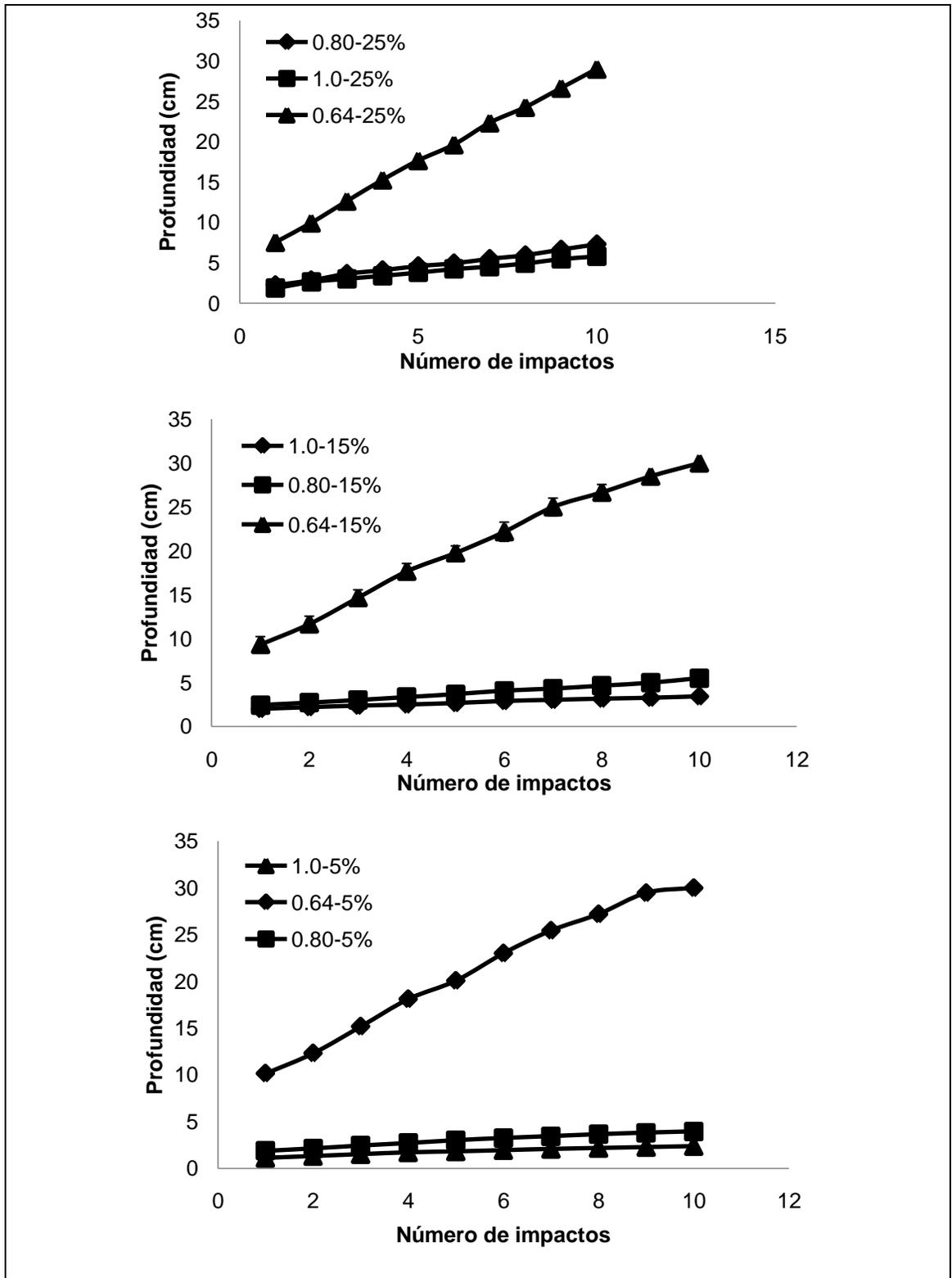


Figura 23. Profundidad y número de impactos mostrando el efecto de la densidad.

Se observó que hay un cambio drástico en la resistencia del suelo cuando la humedad disminuye de 25 a 15% ó 5%. Cuando se analizan los resultados por densidad del suelo, es evidente que independientemente de la humedad del suelo, la resistencia es baja con densidades de 0.64 Mg m^{-3} , dado que ésta es la condición natural del suelo. Esta densidad baja, el PSB mayor al 50% y la alta capacidad de retención de agua (Cuadro 2.1), explica indirectamente la alta productividad del suelo forestal de la Sierra de Puebla. Por otro lado, incrementando la densidad a 1.0, la resistencia del suelo se triplica. Es decir un incremento de 54% en densidad aparente se tradujo en un incremento del 300% en resistencia mecánica del suelo (Figura 24). Esto también muestra que hay la suficiente sensibilidad de parte del penetrómetro para evaluar la resistencia mecánica del suelo.

La resistencia mecánica del suelo en los ensayos en laboratorio tuvo una variación en promedio de 32 Jcm^{-1} en la densidad aparente de 0.64 Mg m^{-3} , con un contenido de humedad del 25%, hasta 391 Jcm^{-1} con densidad de 1.0 Mg m^{-3} al 5% de humedad (Figuras 25 y 26). Considerando el propio peso del penetrómetro en los cálculos la resistencia de 0.69 MPa en la densidad aparente de 0.64, con 25% de humedad hasta, 8 MPa en la densidad de 1.0 Mg m^{-3} con 5% de humedad (Figura 27).

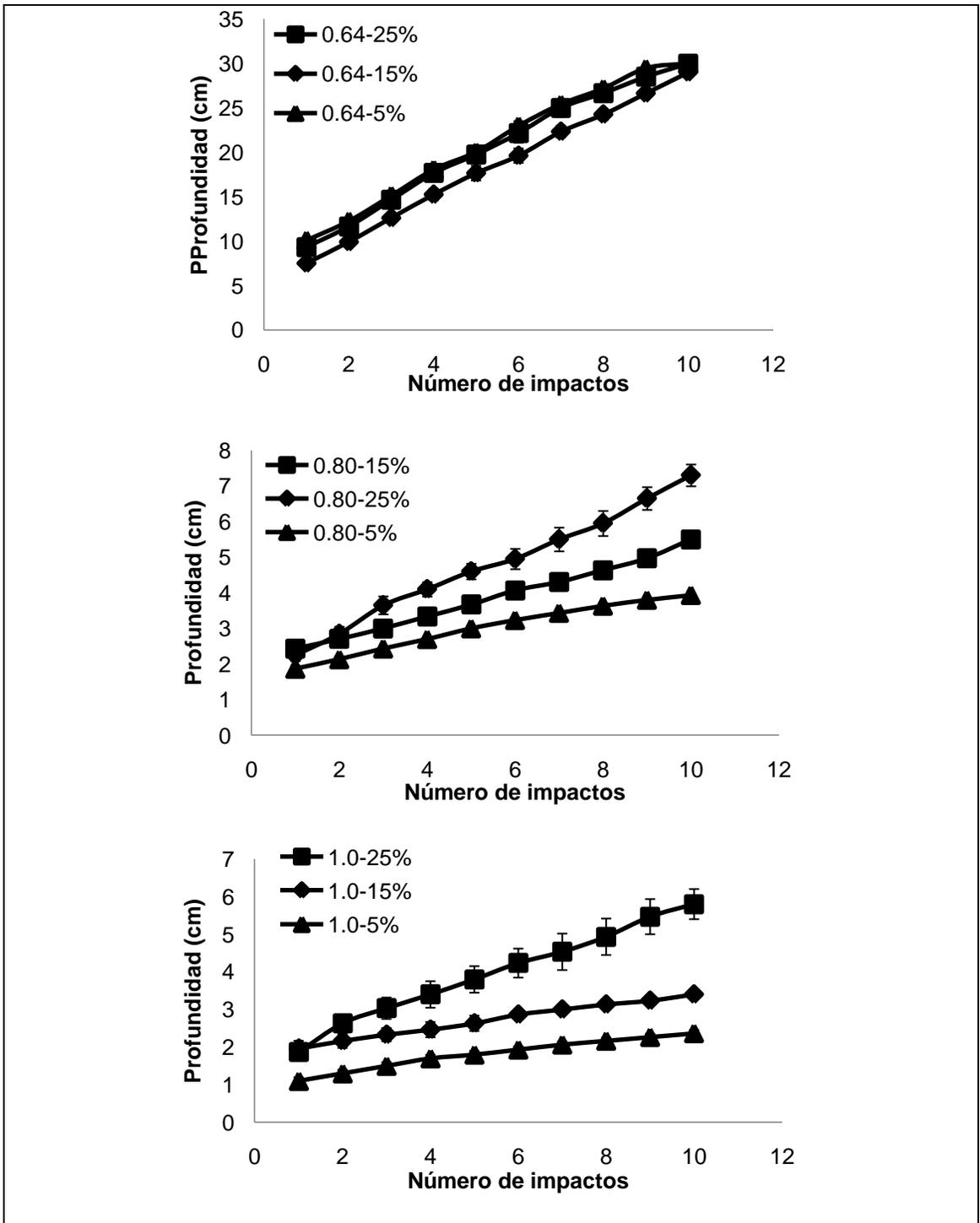


Figura 24. Profundidad y número de impactos mostrando el efecto de la densidad. El número antes del guión indica la densidad aparente (Mg m^{-3}) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.

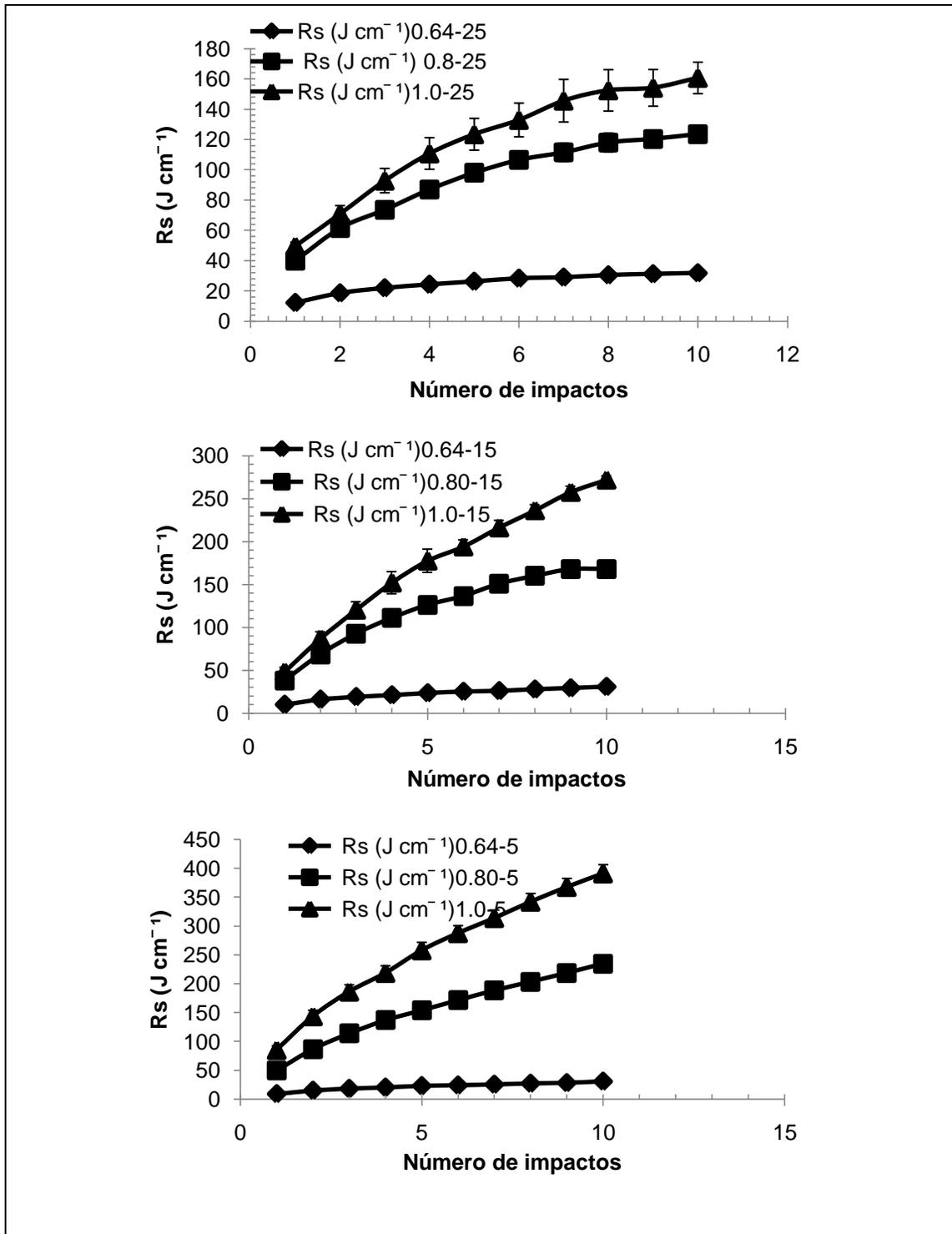


Figura 25. Resistencia mecánica por unidad lineal acumulativa. El número antes del guión indica la densidad aparente (Mg m^{-3}) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.

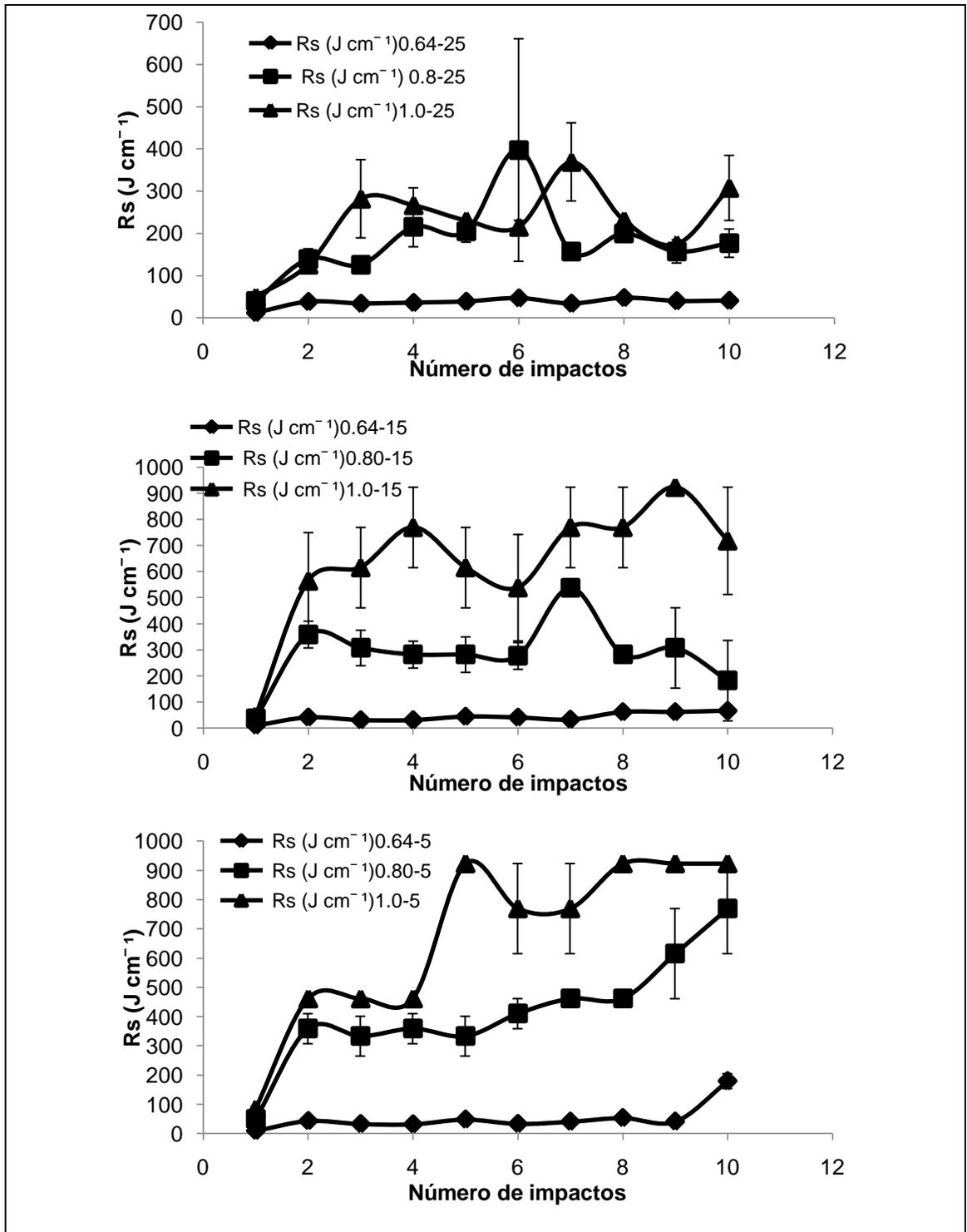


Figura 26. Resistencia mecánica por unidad lineal para cada impacto. El número antes del guión indica la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.

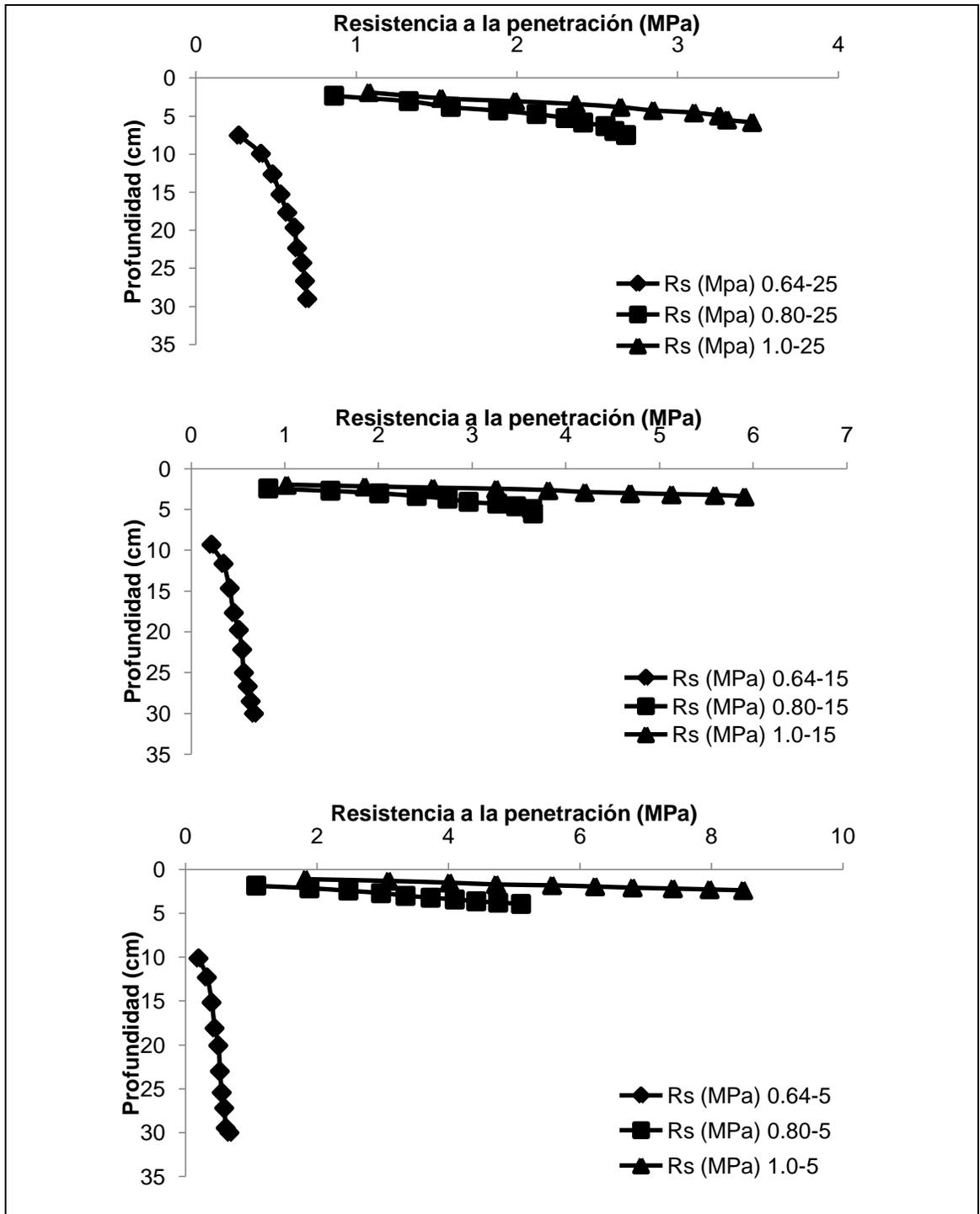


Figura 27. Resistencia mecánica acumulativa considerando el peso del penetrómetro. El número antes del guión indica la densidad aparente (Mg m^{-3}) y el dato posterior al guión indica porcentaje de agua en masa.

La Figura 28 muestra la relación entre profundidad y resistencia mecánica de acuerdo a las especificaciones del penetrómetro desarrollado. Todos los tratamientos se distribuyen de manera diferente ya que son tratamientos diferentes. Sin embargo, destaca el hecho de que las densidades de 1.0 Mg m^{-3} y humedad de 5% pueden llegar a 8 MPa. En la literatura se reconoce que este ya es un valor muy crítico para el crecimiento (Fisher y Binkley, 2000). Por lo tanto, en este suelo productivo, la condición física se deteriora muy rápido con un mínimo impacto que incremente su densidad aparente. Una consideración relevante para los silvicultores de la Sierra de Puebla.

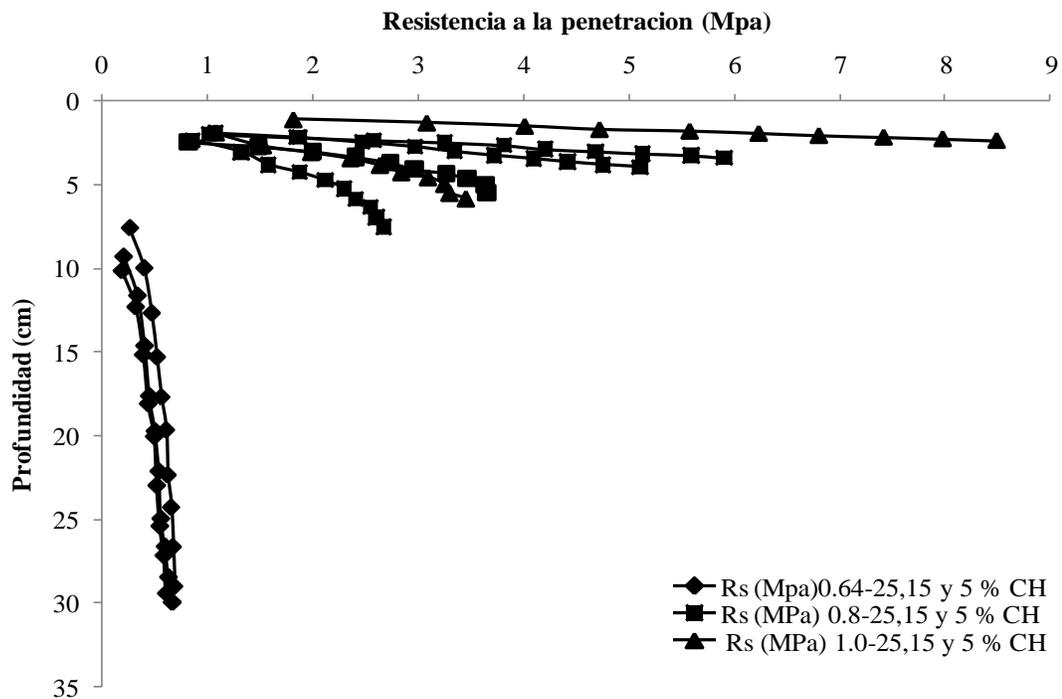


Figura 28. Profundidad y resistencia mecánica, estimada con los parámetros del penetrómetro desarrollado y considerando tres niveles de humedad y densidad aparente. En la simbología, el primer número indica densidad aparente y el número des pues del guión indica el nivel de humedad

4.5 Análisis de Varianza de los datos obtenidos del segundo ensayo de laboratorio.

El análisis de varianza indicó que la variación de la resistencia mecánica del suelo se explica satisfactoriamente con el modelo completo incluyendo los niveles de humedad y densidad aparente ($p = 0.001$). La significancia de estos factores y su interacción se muestran en el Cuadro 2.2. Tanto la humedad como densidad del suelo fueron muy significativas estadísticamente. La alta significancia de la interacción indica que la respuesta en resistencia mecánica para un mismo nivel de densidad aparente depende del contenido de humedad. Es decir, el daño físico y adversidad para el crecimiento de la raíz que se pueda originar en este suelo depende de la densidad y la humedad que tenga el suelo.

Los resultados aplicados de este trabajo indican que en la Sierra de Puebla no deben realizarse prácticas silvícolas que lleven la densidad del suelo a valores de 1 Mg m^{-3} . Dado que hay una alta correlación entre los indicadores de resistencia expresados como profundidad, resistencia por unidad lineal y fuerza por unidad de área, los análisis de varianza de esas variables generan los mismos resultados.

Cuadro 2.2. Análisis de varianza para la resistencia expresada como fuerza por unidad de área.

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	<.0001
Densidad Aparente	2	1.66	0.83	1050.82	<.0001
Interacción	4	0.24	0.06	78.8	<.0001

La Figura 29 muestra gráficamente la interacción entre las variables humedad y densidad aparente. Cuando el suelo tiene una densidad de 0.64 Mg m^{-3} , el nivel de humedad no influye en la resistencia mecánica. Es decir bajo condiciones de baja perturbación, el entorno físico del suelo se mantiene en niveles adecuados para el crecimiento de la raíz. Este resultado denota una propiedad inherente al suelo bajo estudio y explica su alto nivel productivo.

Sin embargo, si el nivel de perturbación se traduce en densidades de 0.80 ó 1.0 Mg m^{-3} , el efecto de la humedad sobre la resistencia mecánica se hace evidente. Este resultado nos indica que si ocurre compactación en este suelo, sus condiciones suelo generan resistencia cercana al límite de crecimiento de la raíz, en la medida que la humedad del suelo baje hasta 5%. La condición más crítica sería con 1.0 Mg m^{-3} de densidad y 5% de humedad. Destaca el hecho de que una densidad de 1.0 Mg m^{-3} es favorable para muchos cultivos

agrícolas, pero los resultados de este estudio indican un cambio drástico en resistencia para la raíz de las coníferas. Se tiene la impresión de que las especies forestales pueden crecer en condiciones adversas de resistencia mecánica, pero este estudio indica que aún con densidades bajas como 1.0 Mg m^{-3} , un suelo como el estudiado, incrementa su resistencia hasta en un 800% 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 es generalmente garantizado (Gómez *et al.*, 2002).

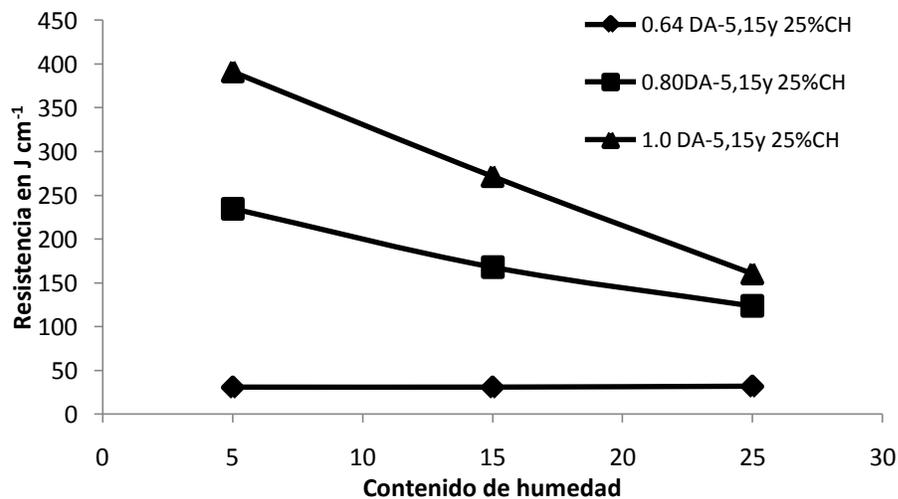


Figura 29. Relación de contenido de humedad y resistencia mecánica en Jcm^{-1} .

Los resultados de este trabajo validan el uso de un penetrómetro dinámico para suelos forestales (patente en trámite). Se observó que las lecturas

independientes de 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.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Con el presente estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) Fue posible proponer un prototipo de penetrómetro para su uso en suelos forestales. Los prototipos similares reportados en la literatura son pesados y de difícil portabilidad.
- 2) Los resultados muestran que el prototipo es de aplicación práctica en los suelos de diferentes ecosistemas. Además, fue sensible a los cambios de resistencia mecánica a densidades bajas ($0.6-1.0 \text{ Mg m}^{-3}$) 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 4.1 kg en conjunto con el tripié; preciso, porque se validó estadísticamente su precisión; portátil, porque desensamblado puede cargarse 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.
- 6) La aportación modesta de este trabajo demuestra que con principios técnicos es posible adecuar implementos de campo para la valoración de nuestros

recursos forestales, sin tener que depender de tecnología importada, que frecuentemente es costosa.

CAPÍTULO VI. LITERATURA CITADA

- Amacher, M. C., K. P., O'Neil, and Perry, C. H. 2007. Soil vital signs: A new Soil Quality Index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO. 12 p.
- Bacchi, O. O. y K. Reichardt. 2003. Sondas de neutrones y gamma: Sus aplicaciones en agronomía. Segunda edición. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena. Impreso por el OIEA en Austria. 83 p.
- Bakker, M. 2009. Cone penetration tests (CPT). University of London. U.K. 126 p.
- Blake, G. R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk Density. *In*: A. Klute (ed), Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph No. 9 (2nd ed.), pp: 363-375.
- Blanco G., S. 2009. Medidores de humedad. Escuela Universitaria, Ingeniería Técnica y Agrícola INEA-UVA. España. 8 p.
- Cabalceta A., G. 2009. Propiedades físicas del suelo. Densidad aparente y de partículas Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. 16 p.

- Da Silva A.P., B. D. Kay and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Department of Land Resource Science. Univ. of Guelph, Ontario, Canada. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1775-1781.
- Fisher, R.F. and D. Binkley. 2000. Ecology and management of forest soils. 3d ed. John Wiley & Sons, New York. 489 p.
- Ferreiro, A. y C. Oneto. 2009. Un equipo patrón para las evaluaciones de resistencia de suelos agrícolas por penetrometría. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina. 6 p.
- Gómez, G. A., R. F. Powers and M. J. Singer. 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
- Goyal M., R. 2006. Manejo de riego por goteo. Capítulo V. El tensiómetro. Su uso, instalación y mantenimiento. Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez. Colegio de Ingeniería. PR. 00681-9044. Primera Edición. 32 p.
- Jaramillo D., F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, primera edición, Ed. Ecográficas Ltda. Colombia. 619 p.
- Hanks, R.J. 1992. Applied soil physics. Soil water and temperature applications. 2nd ed. Springer-Verlag. New York. 176 p.
- Herrick, J. E. and T. L. Jones. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1320–1324

- Ingaramo, O. E. y A. P. González. 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el Nordeste de la Península Ibérica. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina 4 p.
- Krüger H., S. Venanzi y E. de Sá Pereira. 2009. Resistencia mecánica del suelo en secuencias de cultivos agrícolas y mixtas bajo siembra directa. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Argentina. 7 p.
- Lampurlanés, J., and C. C. Martinez. 2003. Tillage. Soil Bulk Density and Penetration Resistance under Different Tillage and Crop Management Systems and Their Relationship with Barley Root Growth. Spain. Agron. J. 95:526–536.
- Mejía, F. 2006. Estudio de suelos. Edificio España. Instituto de estudios ambientales, de la Universidad de Colombia. Informe técnico. Trabajo fm:-3504. Bogotá.10 p.
- Nacci, S. e I. P. Sentis. 1992. Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. Agronomía Tropical, Venezuela. 42: 115-132.
- Navarro, M. y F. G. Gómez. 2004. Correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelo. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción 8 p.
- Quero P., J. L. 2007. Mecanismos y procesos implicados en la regeneración del bosque mediterráneo en respuesta a la heterogeneidad ambiental:

- Desde la fisiología hasta la demografía. Universidad de Granada, Departamento de Ecología. Tesis doctoral. Granada, España. 269 p.
- Ramírez R., P. y C. S. Jiménez. 2009. Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un andisol-marinilla la montañita. Universidad de Colombia, Escuela de Goeciencias, Documento de la materia de manejo y conservación de suelos. Colombia, Sede de Medellín. 22 p.
- Ramírez L., L. y R. A. Sánchez. 2008. Variabilidad espacial de atributos físicos de un typic haplustox de los llanos orientales de Colombia. Universidad de Colombia. Eng. Agríc., Jaboticabal, .28(1):.55-63.
- Rojas, R. 2009. Las relaciones agua suelo planta atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, ULA, Mérida, Venezuela. 41 p.
- Rucks, L. y F. García. 2004. Propiedades físicas de los suelos. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Departamento de suelos y aguas. Montevideo, Uruguay, 68 p.
- Rufat, J., J. del Campo, y M. Mata. 2006. Ensayos de aplicación del riego superficial o enterrado de alfalfa. Controles de compactación del suelo. Área de tecnología frutícola. Universidad de Lleida, Centro UDL-IRTA Lleida. Vida rural. España.7 p.
- Ruiz, T. J. y F. Cuadra. 2004, Penetrómetro de impacto un equipo para preservar el hombre, el suelo y el medio en el agroecosistema cañero.

- Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar. EPICA Matanzas. Memorias, 40 aniversario INICA, La Habana, Cuba. 9 p.
- Sánchez L., L.A. 2008. Influencia de la zanja trinchera en el estado hídrico y crecimiento en reforestaciones del área de Perote Veracruz. Tesis de Maestría, Posgrado Forestal, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. De México. 58 p.
- Sanz LL., J.J. 1975. Mecánica de suelos. Capítulo VII. Penetrómetros y resistencia mecánico. Reunión de ingenieros, primera edición española. Editores Asociados S. A. Barcelona, España.115-117 p.
- Tirado R., C. 2005. Efecto de la compactación del suelo en el desarrollo de especies forestales utilizadas para la reforestación urbana. Tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico. Recinto universitario de Mayagüez, Puerto Rico. 107 p.
- Torres, D., G. Lorena, y Navarro C. 2008. Forestería Análoga: Principios e Implementación. Taller de la Red Internacional de Forestería Análoga (RIFA). Manual Técnico. Republica Dominicana. 55 p.
- Vanags, C.P., B. Minasny and A. B. McBratney. 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.
- Varela, J. L. é I.G. Herrero. 2002. Exploración del subsuelo mediante penetrómetro. Apuntes de Geología. Escuela Universitaria de Ingeniería

Técnica de Minas y de Obras Públicas de Barakaldo (EUIT MINAS).
Universidad del País de Vasco. España. 39 p.