

**EFFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN EL DESARROLLO
DE ESPECIES FORESTALES UTILIZADAS PARA
LA REFORESTACIÓN URBANA**

Por

Rebecca Tirado Corbalá

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

Agronomía

**UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ**

2005

Aprobado por:

Juan G. Pérez Bolívar, Ph. D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Ramón I. Torres López, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Eric Harmsen, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Miguel A. Pando, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Miguel A. Muñoz, Ph. D.
Director de Departamento

Fecha

Ismael Pagán Trinidad, MSCE
Representante de Estudios Graduados

Fecha

ABSTRACT

Trees planted in containers or along sidewalks lack necessary nutrients and water to satisfy their needs due to the compaction of limited soil volumes. This results in restricted tree growth and development and eventually death. In order to determine the response of tree species established in compacted soils, a study was carried out with three tree species commonly used in urban forestry in Puerto Rico. Same-size saplings of three ornamental tropical tree species: trumpet brush (*Tecoma stans*), bottle brush (*Callistemon citrinus*), and pink trumpet (*Tabebuia rosea*) were transplanted in pots of sandy clay loam or clay at three levels of compaction: control (without compaction), ≈ 1.15 , and 1.4 g/cm^3 . Plant height and stem diameter, number and color of leaves, leaf area, and dry weights of roots, stems and leaves were measured on two plants every two months for six months. Data was analyzed as a $3 \times 2 \times 3 \times 3$ (species \times soil type \times compaction \times time) factorial arrangement in a completely randomized design with two replications. No leaf color differences were observed between species. All species exhibited better growth in sandy clay loam at a 1.15 g/cm^3 bulk density and, after six months, a reduced root-shoot ratio was observed. All trumpet brush saplings died within two months when planted in clay at the 1.4 g/cm^3 bulk density. Bottle brush had better growth than pink trumpet and trumpet brush for all compaction levels and both soil types.

RESUMEN

Árboles sembrados en tiestos y en aceras carecen de nutrientes y agua necesaria para satisfacer sus necesidades debido a la compactación de volúmenes limitados de suelo. Esto trae como resultado una reducción en el crecimiento y desarrollo del árbol y eventualmente, la muerte. Con el propósito de determinar la respuesta de las especies de árboles creciendo en suelos compactados, se realizó un estudio con tres especies de árboles comúnmente utilizadas para la reforestación urbana en Puerto Rico. Se utilizaron arbolitos de la misma altura de tres especies ornamentales tropicales: saúco amarillo (*Tecoma stans*), cepillo de botella (*Callistemon citrinus*) y roble venezolano (*Tabebuia rosea*) y fueron transplantados en tiestos con suelo franco arcillo arenoso o arcilloso a tres niveles de compactación: control (suelo sin compactar), $\approx 1.15 \text{ g/cm}^3$ y 1.4 g/cm^3 . Cada dos meses hasta seis meses, se tomaron dos muestras de cada especie, tratamiento y tipo de suelo y se realizaron mediciones en altura, diámetro del tallo, número de hojas, coloración de hojas, área foliar, peso seco de las hojas, tallo y raíz. La data fue analizada como un modelo factorial $3 \times 2 \times 3 \times 3$ (especie \times tipo de suelo \times nivel de compactación \times tiempo) en un diseño completamente aleatorizado con dos repeticiones. Se observó no diferencia en el color de hojas entre las especies. Todas las especies presentaron una mejor respuesta en crecimiento en el suelo franco arcillo arenoso ($D_a = 1.15 \text{ g/cm}^3$) y hubo una reducción en la relación vástago: raíz a los seis meses después del transplante. Mientras el saúco amarillo, sembrado en el suelo arcilloso ($D_a = 1.4 \text{ g/cm}^3$), murió. Cepillo de botella tubo un mejor crecimiento que el roble venezolano y el saúco amarillo en los tres niveles de compactación y ambos tipos de suelo.

© *Rebecca Tirado Corbalá, 2005*

DEDICATORIA

- A mis padres Alma R. Corbalá y Radamés Tirado, por siempre apoyarme en todos mis momentos de alegría y de sufrimiento.
- A mi madre Alma R. Corbalá, por enseñarme la importancia de la realización intelectual y profesional e independencia femenina sin olvidar los deberes como esposa y madre.
- En memoria del Dr. José A. Villarrubia y Carmen Bonet, ambos fueron y serán una guía en mi vida.
- A mi novio, amigos, familiares, hermanos y sobrinos por siempre estar ahí brindándome momentos de alegría y felicidad.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios y a mi familia.
- Al fenecido Dr. José A. Villarrubia, por aceptarme como estudiante en el Departamento de Agronomía y Suelos y brindarme sus conocimientos y amor hacia los bosques y la naturaleza.
- A los miembros del comité el Dr. Juan Pérez Bolívar, Dr. Ramón Torres, Dr. Eric Harmsen y Dr. Miguel Pando, por ayudarme a realizar este experimento y a madurar como persona e investigadora.
- A Evelyn Roselló, por ser mi secretaria favorita, mi amiga, consejera, sin ti, este árbol sinuoso establecido en un camino tortuoso, no hubiera tenido arreglo.
- Al personal de la Finca Alzamora y el personal del Departamento de Agronomía y Suelos, por su ardua ayuda, estímulo y los buenos ratos que pasamos juntos.
- A mis amigos y compañeros de estudios durante esta eterna aventura. Son muchos pero muy en especial a Judith Rengifo, Marilyn Rivera, Jackeline Vega, Sandra Justiniano, Miriam Paris, Angélica Alvarado, Jason Allison, Rockny Pérez, Carlos Pérez, César Zayas, Martín Figueroa y Juan Osorno.
- Al Dr. Miguel Muñoz, por su seriedad y profesionalismo y amor a la poesía, la expresión del alma.

Cuadro de Contenido

Lista de Tablas.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Apéndices.....	xii
1. Introducción	1
2. Objetivos	4
3. Revisión de Literatura.....	5
4. Materiales y Métodos.....	12
4.1 Localización del experimento	12
4.2 Especies.....	12
4.3 Establecimiento de los árboles.....	14
4.4 Diseño Experimental.....	15
4.5 Caracterización morfológica.....	16
4.5.1 <i>Altura del árbol</i>	16
4.5.2 <i>Número de hojas</i>	16
4.5.3 <i>Diámetro del tallo</i>	16
4.5.4 <i>Peso seco del tallo</i>	16
4.5.5 <i>Peso seco de las hojas</i>	16
4.5.6 <i>Peso seco de las raíces</i>	17
4.5.7 <i>Área foliar</i>	17
4.5.8 <i>Color de la hoja</i>	17
4.5.9 <i>Relación raíz:vástago</i>	18
4.6 Caracterización del Suelo.....	18
4.6.1 <i>pH del suelo</i>	18
4.6.2 <i>pH del suelo</i>	18
4.6.3 <i>Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	18
4.6.4 <i>Distribución de tamaño de partículas del suelo (textura)</i>	19
4.6.5 <i>Densidad aparente (Da) de un suelo perturbado</i>	19
4.6.6 <i>Densidad de partículas (Dp) utilizando el método del picnómetro</i>	20
4.6.7 <i>Gravedad específica (Gs)</i>	20
4.6.8 <i>Porcentaje de porosidad</i>	21
4.6.9 <i>Determinación de Estabilidad de Agregados</i>	21
4.6.10 <i>Materia orgánica: utilizando el procedimiento de oxidación</i>	22
4.6.11 <i>Determinación de los límites de Atterberg</i>	22
4.6.12 <i>Humedad volumétrica mediante la humedad gravimétrica</i>	22
4.6.13 <i>Humedad volumétrica: utilizando el Soil Profile Probe (PR-1)</i>	23
4.6.14 <i>Resistencia al suelo</i>	24
4.6.15 <i>Determinación de la permeabilidad del suelo mediante la prueba de consolidación unidimensional</i>	24
4.6.16 <i>Análisis de granulometría</i>	24

4.6.18	<i>Demostración de la porosidad de los suelos utilizados</i>	25
4.6.19	<i>Mineralogía de los suelos utilizados</i>	25
5.	Resultados y Discusión	26
5.1	Caracterización morfológica	28
5.1.1	<i>Altura</i>	28
5.1.2	<i>Número de hojas</i>	29
5.1.3	<i>Diámetro del tallo</i>	31
5.1.4	<i>Peso Seco del tallo</i>	33
5.1.5	<i>Peso Seco de Hojas</i>	35
5.1.7	<i>Área Foliar</i>	40
5.1.8	<i>Color de la hoja</i>	41
5.1.9	<i>Relación raíz:vástago</i>	42
5.2	Caracterización del suelo	45
5.2.1	<i>Propiedades químicas y físicas de los suelos</i>	45
5.2.2	<i>Densidad Aparente (Da)</i>	46
5.2.3	<i>Humedad Volumétrica determinada por humedad gravimétrica</i>	46
5.2.4	<i>Humedad volumétrica utilizando el “soil profile probe” (PR-1)</i>	48
5.2.5	<i>Resistencia del suelo</i>	52
5.2.6	<i>Determinación de la permeabilidad del suelo mediante la prueba de consolidación unidimensional</i>	54
5.2.7	<i>Demostración de la porosidad de los suelos utilizados</i>	57
5.2.8	<i>Mineralogía de los suelos utilizados</i>	59
6.	Conclusiones	60
7.	Recomendaciones	60
8.	Literatura citada	62
9.	Apéndices	69

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados de las pruebas de F en el análisis de varianza de las variables en estudio.....	27
Tabla 2. Prueba de comparación de medias para la variable altura (especie*tiempo)....	28
Tabla 3. Prueba de comparación de medias para la variable número de hojas (especie *tiempo)	29
Tabla 4. Prueba de comparación de medias para la variable número de hojas (especie*suelo).....	30
Tabla 5. Prueba de comparación de medias del efecto principal suelo, para la variable diámetro del tallo.....	31
Tabla 6. Prueba de comparación de medias del efecto principal especie para la variable diámetro del tallo.....	32
Tabla 7. Prueba de comparación de medias del efecto principal tiempo para la variable diámetro del tallo.....	32
Tabla 8. Prueba de comparación de medias del efecto principal tratamiento para la variable diámetro del tallo.....	32
Tabla 9. Prueba de comparación de medias (trata * suelo) para la variable peso seco del tallo.....	33
Tabla 10. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo*tiempo) para la variable peso seco del tallo	34
Tabla 11. Prueba de comparación de medias (especie*tiempo) para la variable peso seco de hojas	35
Tabla 12. Prueba de comparación de medias (tratamiento* suelo) para la variable peso radicular	36
Tabla 13. Prueba de comparación de medias (especie*tiempo) para la variable área foliar	40
Tabla 14. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo) para la variable área foliar	41

Tabla 15. Análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos	45
Tabla 16. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo) para la densidad aparente mediante el procedimiento del terrón	46
Tabla 17. Prueba de comparación de medias (tratamiento*tiempo) para humedad volumétrica.....	47
Tabla 18. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo) para humedad volumétrica.....	47
Tabla 19. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo*tiempo) para humedad volumétrica.....	48
Tabla 20. Prueba de comparación de medias (especie*tratamiento) para resistencia del suelo	53
Tabla 21. Prueba de comparación de medias (trata*suelo) para resistencia del suelo....	53
Tabla 22. Prueba de comparación de medias (especie*tratamiento* suelo) para resistencia del suelo.....	54

Lista de Figuras

Figura 1. Comparación visual del número de hojas por especie y suelo (árboles en el lado izquierdo de la foto están sembrados en suelo franco arcillo arenoso y el del lado derecho están sembrados en el suelo arcilloso. En la foto: a) cepillo de botella, b) saúco amarillo y c) roble venezolano.....	31
Figura 2. Sistema radicular del saúco amarillo (<i>Tecoma stans</i>) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). En la foto: a) control, b) 3 capas y c) 7 capas	37
Figura 3. Sistema radicular del cepillo de botella (<i>Callistemon citrinus</i>) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). En la foto: a) control, b) 3 capas y c) 7 capas	37
Figura 4. Sistema radicular del roble venezolano (<i>Tabebuia rosea</i>) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). En la foto: a) Control, b) 3 capas y c) 7 capas	38
Figura 5. Humedad Volumétrica por nivel de compactación utilizando el PR-1	49
Figura 6. Humedad volumétrica de los controles utilizando el PR-1	50
Figura 7. Humedad volumétrica del suelo compactado en tres capas utilizando el.....	51
Figura 8. Humedad volumétrica del suelo compactado en siete capas utilizando el PR-1 (agosto/03-febrero/04)	52
Figura 9. Variación en el coeficiente de permeabilidad (Kv) versus la densidad aparente (Da) en el suelo arcilloso.....	56
Figura 10. Variación en el coeficiente de permeabilidad (Kv) versus la densidad aparente (Da) en el suelo franco arcilloso arenoso	57
Figura 11. Laminillas petrográficas del suelo franco arcillo arenoso en los tratamientos: a) control, b) 3 capas ($D_a=1.1 \text{ g/cm}^3$) y 7 capas ($D_a=1.4 \text{ g/cm}^3$)	58
Figura 12. Laminillas petrográficas del suelo arcilloso en los tratamientos: a) control, b) 3 capas ($D_a=1.2 \text{ g/cm}^3$) y c) 7 capas ($D_a= 1.4 \text{ g/cm}^3$).....	59

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Inflorescencia de Cepillo de botella (<i>Callistemon citrinus</i>).	71
Apéndice 2. Inflorescencia del Saúco amarillo (<i>Tecoma stans</i>).	71
Apéndice 3. Inflorescencia del Roble venezolano (<i>Tabebuia rosea</i>)	71
Apéndice 4. Tiesto construido con tela metálica de 1.27 cm x 2.54 cm, a) altura de 15.2 cm y b) diámetro interno de 15.9 cm.	72
Apéndice 5. Compactación del suelo arcilloso en el campo con un martillo caída libre de 5.5 lbs y una altura de caída libre de 1 pie para obtener una densidad aparente de 1.4 g/cm ³	72
Apéndice 6. Cepillo de botella sembrado en los dos tipos diferentes de suelo compactado a) una densidad de 1.2 g/cm ³ para el ultisol (arcilloso) y b) 1.1 g/cm ³ para el aluvión (franco arcilloso arenoso).....	73
Apéndice 7. Tiesto con a) suelo arcilloso y b) suelo franco arcilloso arenoso, ambos compactado a una densidad de 1.4 g/cm ³ con tela metálica y el tubo de acceso ya colocados.....	73
Apéndice 8. Medidor del área foliar	74
Apéndice 9. Potenciómetro de pH.	74
Apéndice 10. Procedimiento utilizado para determinar la distribución de tamaño de partículas del suelo.....	74
Apéndice 11. Fotos del procedimiento de la determinación de la densidad aparente de un suelo perturbado mediante el método del terrón. a) Muestra de suelo sacado con el barrenador de suelo b) Terrón envuelto con papel de parafina c) Terrón dentro de la probeta d) Terrones listos para llevar al horno para determinar el por ciento de humedad en el suelo.....	77
Apéndice 12. Foto del sistema de agitación con los tamices No.10 y 20 montados.....	78
Apéndice 13. Procedimiento para la determinación de la materia orgánica mediante la oxidación húmeda de Walkey y Black	78
Apéndice 14. Procedimiento utilizado para determinar el límite líquido del suelo.....	79

Apéndice 15. Equipo utilizado para determinar el límite líquido del suelo.....	80
Apéndice 16. Procedimiento utilizado para determinar el límite plástico del suelo.....	80
Apéndice 17. Realización del hilo para determinar el límite plástico del suelo.	81
Apéndice 18. Procedimiento para realizar la prueba de Consolidación.....	81
Apéndice 19. Foto a) establecimiento del suelo y b) proceso de compactación del suelo dentro de la anilla en tres capas donde a cada capa se le añadió 10 golpes con un martillo de goma.	83
Apéndice 20. Foto a) Nivelación del suelo con una segueta y b) resultado de la reducción del suelo hasta llevarlo a la altura de la anilla.....	83
Apéndice 21. Celda de consolidación.....	84
Apéndice 22. Consolidómetro tipo Bishop. a) reloj que mide la deformación del suelo y muestra saturándose y en b) brazo mecánico donde se va a colocar la carga para obtener las diferentes presiones.	84
Apéndice 23. Procedimiento utilizado para el análisis de granulometría mediante el método del juego de tamices.....	84
1. Porcentaje de suelo retenido en cada tamiz.....	85
2. Porcentaje acumulativo del suelo retenido en el tamiz.	85
3. Porcentaje acumulativo del suelo que pasa a través del tamiz.....	85
Apéndice 24. Procedimiento de la prueba de compactación Proctor estándar.	87
Apéndice 25. Procedimiento de la preparación de las laminillas petrográficas.....	88
Apéndice 26. Análisis de varianza para la variable altura de las especies en estudio	89
Apéndice 27. Análisis de varianza para la variable número de hojas de las especies en estudio.....	90
Apéndice 28. Análisis de varianza para las variables peso seco del tallo de las especies en estudio.....	90
Apéndice 29. Análisis de varianza para la variable peso seco de hojas de las especies en estudio.....	91

Apéndice 30. Análisis de varianza para la variable peso seco radicular de las especies en estudio	91
Apéndice 31. Análisis de varianza para la variable área foliar de las especies de estudio .	92
Apéndice 32. Análisis de varianza para la variable humedad volumétrica de las especies de estudio	92
Apéndice 33. Análisis de varianza para la variable reistencia del suelo.....	93
Apéndice 34. Análisis de varianza para la variable densidad aparente de las especies de estudio mediante el procedimiento del terrón	93

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques urbanos son áreas verdes en y alrededor de los lugares donde vivimos que poseen árboles (Lawrence, 1993). Estos se definen como un sistema continuo a través del tiempo, el cual otorga beneficios similares a los de un bosque natural (Clark, 1997). Se ha demostrado que los parques, jardines residenciales o públicos y la vegetación urbana, juegan un papel importante en el ambiente humano. Por ejemplo, lugares como el Parque Central en Nueva York han contribuido a la habitabilidad de esa ciudad (Lawrence, 1993).

El establecimiento de árboles en el entorno urbano, incluye factores y/o componentes físicos, biológicos e institucionales que son necesarios para el desarrollo de paisajes en los bosques urbanos (Bradley, 1995). Dentro de los beneficios de la reforestación urbana se encuentran los siguientes: el aumento de las áreas verdes, el aumento del valor del terreno, reduce el efecto del calor insular, aumenta y sostiene las especies silvestres, reduce la sedimentación de los arroyos, ocultan paisajes desagradables, crean un sentido de identidad, reducen el ruido, añaden un carácter natural a nuestras ciudades, absorben CO₂ y otros gases que pueden ser nocivos al medioambiente, reduce la erosión del suelo que causa el viento, ayudan a disminuir la temperatura y conservar energía (Heisler, 1974; EPA, 1992; McPherson *et al.*, 1994).

Estudios realizados por Beatty y Heckman (1981) sobre el manejo de árboles sembrados en ciudades americanas demostraron que existe una relación inversa entre el tamaño de la ciudad con respecto a la supervivencia de los árboles. Además, encontraron que el por ciento de supervivencia es mayor en regiones con clima cálido, obteniendo de

un 75 % a un 100 % de supervivencia a largo plazo. Se han documentado cinco problemas principales asociados con el crecimiento de árboles en zonas urbanas: insuficiencia de agua; deficiencia de nutrimentos; compactación del suelo; vandalismo y daños mecánicos (Beatty y Heckman, 1981).

Otros estudios han obtenido resultados similares en ciudades del Norte de Inglaterra, donde se ha encontrado un alto porcentaje de mortalidad en árboles recién transplantados en áreas metropolitanas comparado con ciudades pequeñas. Simultáneamente, estas áreas metropolitanas necesitan el establecimiento de árboles para poder reducir el calor insular y añadir paisajes al área (Moil, 1989; Moll y Kollin; 1993; American Forests, 1997) Esta diferencia en mortalidad se atribuye a la calidad del lugar a establecerse, vandalismo, contaminación en el aire y en el suelo, transplante y a las prácticas de mantenimiento (Bassuk y Whitlow, 1985; Craul, 1992). Según Lindsey y Bassuk (1991) la calidad pobre del suelo es el problema más significativo que enfrentan los árboles sembrados en áreas urbanas. En dicho estudio se determinó que la compactación del suelo contribuye el nueve por ciento de la mortalidad de árboles (Kjell y Randrup, 1997).

La compactación del suelo ocurre cuando se aplica presión o carga a la superficie del suelo, como resultado de tráfico vehicular o de peatones, edificios, aceras, carreteras y equipos de construcción cuando se construye, especialmente cuando el suelo está húmedo (Bassuk y Whitlow, 1985; Grady, 1996). La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia y la densidad aparente y reduciendo la porosidad (Patterson, 1977). La compactación también reduce la velocidad de infiltración de agua, causa una disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de

agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces (Patterson *et al.*, 1980; Handreck y Black, 1994). Al volverse más denso el suelo se crea una barrera física que no permite que las raíces penetren adecuadamente (Patterson *et al.*, 1980). Estas condiciones anteriormente mencionadas, pueden modificar el crecimiento radicular y pueden experimentarse simultáneamente en la compactación del suelo, siendo difícil diferenciar entre sus efectos (Scout-Russell, 1977).

La compactación del suelo en áreas urbanas, es un impedimento o factor de gran importancia para el establecimiento de árboles en zonas urbanas (Patterson, 1977). La compactación del suelo resulta en la reducción del crecimiento radicular y trae como resultado la inhibición del crecimiento del árbol. Se ha encontrado, que dependiendo de la textura del suelo, la penetración de las raíces va a tener mayor o menor grado de dificultad. Valores de densidad seca de 1.4 g/cm^3 en suelos arcillosos y de 1.7 g/cm^3 en suelos arenosos, limita el crecimiento radicular en las plantas y árboles (Morris y Lowry, 1988). Varios estudios han demostrado que la compactación del suelo causa una reducción en el crecimiento de varias especies forestales (Zisa *et al.*, 1980; Pan y Bassuk, 1985; Gilman *et al.*, 1987).

El propósito de esta investigación es analizar el crecimiento de tres especies forestales comúnmente utilizadas en la reforestación urbana en Puerto Rico, establecidas en suelos compactados a diferentes densidades aparentes, durante los primeros seis meses después del trasplante. Los resultados serán de gran beneficio en futuros trabajos en reforestación urbana y los diferentes pasos a seguir para lograr programas de reforestación y ornato más eficientes.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal en este estudio es determinar el efecto de la compactación del suelo sobre el desarrollo morfológico y radicular de varias especies de árboles.

Otros objetivos secundarios:

- Determinar el efecto de la compactación del suelo sobre el desarrollo radicular de algunas especies utilizadas comúnmente en Puerto Rico para la reforestación urbana tales como: Cepillo de botella (*Callistemon citrinus*), Roble de sabana (*Tabebuia rosea*) y Saúco amarillo (*Tecoma stans*).
- Determinar los cambios en la porosidad del suelo, distribución de poros y retención de humedad a diferentes niveles de compactación.
- Determinar los cambios morfológicos en los árboles como resultado de diferentes niveles de compactación del suelo.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Los suelos urbanos son aquellos suelos que han sido cambiados o alterados debido al desarrollo de infraestructuras urbanas (Neal y Whitlow, 1997). Estos suelos urbanos son compactados y rellenados con mezclas de construcción (Day *et al.*, 1995). Los árboles sembrados en zonas urbanas representan menos del 10 % de los 60 millones de árboles establecidos en los bosques urbanos de Estados Unidos de América (Moll y Kollin, 1993). A pesar de su escasez, los árboles sembrados a lo largo de los corredores de transportación en zonas urbanas son importantes (Kielbaso, 1990). Los árboles sembrados en este ambiente enfrentan nuevos retos al momento de establecerse y la mayoría de estos mueren en los primeros dos años después de sembrarse (Foster y Blaine, 1978; Craul, 1992). Estudios realizados en árboles sembrados alrededor de pavimento en el centro de la ciudad, demuestran que éstos tienen un largo de vida de aproximadamente siete años, mientras aquellos árboles sembrados al lado de las aceras, tienen un largo de vida de aproximadamente 32 años (Moil, 1989; Craul, 1992; American Forests, 1997). Entre los nuevos retos se encuentran el vandalismo, la falta de mantenimiento de los árboles recién establecidos, como también un complejo de factores abióticos que aumentan el nivel de estrés de estos árboles (Waring y Schlesinger, 1985). Entre los factores abióticos se incluye: la compactación del suelo (Craul, 1992; Patterson, 1977), altas temperaturas en el suelo (Craul, 1992), pH alto, altas concentraciones de sales, drenaje pobre en el suelo (Craul, 1992; Kelsey y Hootman 1990; Kozlowski, 1985), reducción en el volumen radicular (Lindsey y Bassuk, 1991) y aumento en el déficit de presión de vapor causado por el calor reflejado y al microclima

urbano (Bassuk y Whitlow, 1988; Kjelgren y Clark, 1992). A los mencionados anteriormente, se les añade la pérdida del sistema radicular que sufren los árboles al momento del trasplante (Waring y Schlesinger, 1985), observándose un aumento en la mortalidad. Se ha corroborado que un árbol sembrado en zonas urbanas tiene un largo de vida de aproximadamente 10 años y en tiestos de dos a cinco años (Berrang y Karnosky, 1983; Foster y Blaine, 1978).

Estudios realizados por Lindsey y Bassuk (1991) han demostrado que el mantener sistemas radiculares confinados es una de las causas de muerte prematura en los árboles sembrados en zonas urbanas. Árboles que están sembrados en áreas confinadas, ya sea por pavimento, estructuras urbanas o en tiestos que pueden estar tanto dentro como afuera del suelo, poseen una humedad en el suelo limitada y la evaporación tiende a ser alta debido al poco volumen de suelo o a la compactación del mismo. La humedad y la textura del suelo afectan grandemente la fuerza del suelo y las respuestas que poseen las raíces al enfrentarse a condiciones de compactación (Craul, 1992). Se ha estimado que las densidades aparentes encontradas en las áreas urbanas fluctúan entre 1.4 a 2.2 g/cm³ (0.051 a 0.0791 lb/in³) (Patterson, 1977; Alberty *et al.*, 1984).

Adicionalmente, se ha demostrado que la compactación del suelo es dañina, cuando ocurre en las primeras 30 pulgadas de la superficie del suelo, donde ocurre el mayor crecimiento radicular de los árboles (Foster y Blaine, 1978). Cuando el suelo es compactado, se reduce o se destruye el sistema de macroporos presente en el suelo (Wieland y Wample, 1985). Los macroporos son importantes para el movimiento 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, trae como consecuencia reducción en la efectividad de las sales empleadas en las carreteras, desnitrificación, pérdida de nutrimentos en las raíces y cambios en el metabolismo de las plantas. Suelos compactados con valores de presión tan bajos como 470 kPa, redujeron el crecimiento radicular en el pino austriaco (*Pinus nigra*) (Zisa *et al.*, 1980), mientras suelos con valores de 2,500 a 3,000 kPa, detuvieron el crecimiento radicular en el pino radiata y algodónoso (Sands *et al.*, 1979). Se ha encontrado que una densidad aparente de 1.8 g/cm³ paraliza el crecimiento radicular en las coníferas (Zisa *et al.*, 1980). En investigaciones realizadas por Patterson (1977), se encontraron suelos con densidades aparentes entre 1.7 a 2.2 g/cm³ cerca de un centro comercial en Washington D.C. Otro estudio encontró una densidad aparente de 1.56 g/cm³ en áreas cercanas a centros comerciales y a nuevos residenciales, 0.5 g/cm³ mayor a aquellos suelos localizados en áreas cercanas a suelos no perturbados (Alberty *et al.*, 1984). Se ha encontrado que estos niveles de compactación restringen el crecimiento radicular de ciertas especies de árboles (Chiapperini y Donnelly, 1978; Pan y Bassuk, 1985; Pittenger y Stamen, 1990).

Otros estudios en suelos compactados demuestran que las raíces que encuentran mayor resistencia mecánica tienden a crecer menos y a ser más finas y con más ramificaciones laterales que en suelos no compactados (Materechera *et al.*, 1991). Cuando las raíces se encuentran en un suelo demasiado denso, no pueden penetrar y cambian la dirección de crecimiento o detienen su crecimiento. Esto ocurre frecuentemente en ambientes urbanos, donde las raíces de los árboles sembrados sujetas a suelos compactados, tienden a crecer solamente en los primeros 30.5 cm a 45.7 cm de

profundidad (Grabosky y Bassuk, datos no publicados). Esto aumenta el área superficial del sistema radicular por volumen de suelo a diferentes profundidades (Liu y Waldron, 1988) y aumenta la susceptibilidad a estrés de sequía, especialmente en verano (Grimes *et al.*, 1972; Bassuk y Whitlow, 1985; Grabosky y Bassuk, 1995). También la disponibilidad de nutrientes y de agua tiende a ser poca o ninguna. Niveles extremos de compactación pueden romper raíces finas de 1-2 mm de diámetro (Wargo, 1983). Los síntomas típicos de los árboles afectados por la compactación del suelo fluctúan desde la reducción del crecimiento y establecimiento de los árboles (Foster y Blane, 1978), reducción dramática del crecimiento del tallo (Chiapperini y Donnelly, 1978), caída masiva de las hojas, desmejoramiento físico del árbol y eventualmente la muerte. La compactación del suelo ha sido señalada como la causa principal de muerte de *Acer saccharum* en áreas urbanas (Ruark *et al.*, 1983). El crecimiento radicular de (*Forsythia ovata*) 'Nakai', fue restringido a densidades tan bajas como 1.21 g/cm^3 (Alberty *et al.*, 1984). Al parecer, existen diferencias entre las especies en su capacidad de penetrar suelos compactados a diferentes densidades aparentes.

En experimentos realizados por Chiapperini y Donnelly (1978) en tiestos, las raíces de *Acer saccharum* se distribuían uniformemente en un suelo areno arcilloso no compacto pero cuando aumentó el confinamiento en la parte superior del suelo en los tiestos, la densidad aparente aumentó. En este estudio se encontró que a densidades aparentes de 1.4 g/cm^3 o más, parte o todo el sistema radicular puede estar confinado en la tercera parte superior del tiesto (Chiapperini y Donnelly, 1978). La penetración radicular puede ser afectada hasta en densidades aparentes bajas. Estas variaciones se

deben a las diferentes texturas de los suelos estudiados. Zisa (1980), encontró que las raíces del pino austriaco (*Pinus nigra*) pueden penetrar en un suelo limo arenoso sin ninguna dificultad hasta que alcanzan densidades aparentes de 1.6 g/cm^3 , pero el crecimiento radicular se interrumpe al alcanzar 1.4 g/cm^3 en suelos limo arcillosos. Estas variaciones en restricción se deben a la interacción existente entre la densidad aparente y la textura del suelo (Pan y Bassuk, 1985). El crecimiento del ápice radicular de *Ailanthus altissima* es más restringido en suelos limo arenosos con una densidad aparente de 1.64 g/cm^3 que en un suelo arenoso con una densidad de 1.67 g/cm^3 (Pan y Bassuk, 1985).

En otros estudios se ha citado que el estrés hídrico es el factor de gran importancia al momento del transplante, causando un establecimiento radicular pobre (Harris y Gilman, 1993). El crecimiento radicular durante la primera etapa luego del transplante, específicamente al comienzo, puede ser mínima en algunas especies (Harris *et al.*, 1996). Es importante tener una relación favorable entre la disponibilidad del agua y el sistema radicular durante el primer año de crecimiento de los árboles.

La relación raíz:vástago es el término utilizado para describir la relación entre la porción superior e inferior de la planta. Se define como el total de la masa radicular dividida por la masa total del tallo, usualmente basado en peso seco (Sutton y Tinus, 1983). Para la mayoría de los árboles sembrados bajo condiciones naturales, la relación raíz:vástago es 1:5 a 1:6, donde la parte superior es cinco a seis veces mayor que las raíces (Kramer, 1969 y Perry, 1982). Si no se toma en consideración el peso del tallo, el peso de la parte superior y de las raíces tienden a ser iguales (Perry, 1982). El balance

del mismo, es considerado según la relación existente entre la absorción de agua y nutrientes en el sistema radicular y la utilización de la copa. Las prácticas comunes de los arboricultores también afectan la relación raíz:vástago. Ejemplos comunes de esto lo son el trasplante, el corte de raíces en las aceras y en áreas de construcción. El crecimiento y desarrollo del sistema radicular de los árboles sembrados en zonas urbanas es limitado por la cantidad como por la calidad del suelo. Adicionalmente, el balance de la relación raíz:vástago es afectada tanto por cambios físicos como por los fisiológicos del árbol. La ruptura física del balance ocurre al remover las raíces o las ramas del árbol. Los cambios fisiológicos pueden ocurrir al reducir la humedad del suelo y al tener una evapotranspiración excesiva. Por lo tanto, la reducción del abastecimiento de agua tendrá efectos mayores, reduciendo el balance entre raíz:vástago. También este balance se ve afectado por factores genéticos y ambientales.

El caso más extremo de desbalance en la relación raíz:vástago ocurre en árboles transplantados. Sobre el 95% del sistema radicular se pierde al momento del trasplante si se utilizan métodos estándares de trasplante en los viveros (Watson y Sydnor, 1987). Esto reduce proporcionalmente la capacidad de absorber agua del suelo, ya que las raíces sólo pueden absorber agua del suelo donde se proliferan (Kozlowski, 1985). Por lo tanto, si el agua disponible en el suelo está fuera de la zona radicular, ésta no puede ser utilizada por el árbol transplantado. Puede tomar hasta siete semanas para que nuevas raíces proliferen, provenientes del callo formado luego de que otra raíz sea cortada. Por otro lado, puede tardarse hasta 13 semanas antes de que las raíces regeneradas absorban cantidades sustanciales de agua provenientes del suelo que está fuera de la bola

radicular, y hasta 20 semanas para conseguir humedades de absorción en el suelo que sean similares al de la bola radicular (Struve y Rhodus, 1988).

Los árboles provenientes de invernadero poseen la capacidad de tolerar las pérdidas de sus raíces, mientras que los árboles adultos tienden a ser menos tolerantes. El agua disponible en los árboles recién transplantados usualmente dura solamente algunos días, mientras que la duración del estrés por sequía tiende a ser más prolongada ya que toma más tiempo reemplazar el sistema radicular perdido. El largo de la hoja y la velocidad de crecimiento son buenos indicadores de estrés en árboles recién transplantados en áreas urbanas (Watson, datos no publicados).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del experimento

El experimento principal se estableció en la Finca Alzamora de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Esta finca se encuentra ubicada a 18° 12' 54.3" latitud norte y a 67° 08' 43.3" longitud oeste a 45 m.s.n.m. La temperatura media anual es 25.0 ° C, con pocas variaciones mensuales. La precipitación promedio anual es de 3,220 mm, con un periodo seco entre los meses de diciembre a abril donde las precipitaciones promedio mensuales alcanzan 68.6 mm de agua. Se observa también un periodo lluvioso de julio a septiembre, donde las precipitación promedio mensual alcanza 202.4 mm de agua, en comparación al promedio mensual anual de 133.6 mm de agua (ATMOS, 2003).

4.2 Especies forestales

Para el estudio se utilizaron tres especies de árboles forestales comúnmente usadas para la reforestación urbana en Puerto Rico. Estos son: cepillo de botella (*Callistemon citrinus*), roble venezolano (*Tabebuia rosea*) y saúco amarillo (*Tecoma stans*). A continuación se describen en detalles estas tres especies.

Cepillo de botella (*Callistemon citrinus*) es una especie nativa de Australia y crece bien en el trópico y subtropico. Este árbol de altura pequeña a mediana, siempre verde se propaga por semilla y acodos aéreos. Posee hojas simples, vellosas estrechas y fragantes al presionarlas. Las hojas son de 2.54 cm a 7.62 cm de largo y menos de 2.54 cm de ancho. La semilla del cepillo de botella se encuentra disponible durante todo el

año y puede recolectarse fácilmente. La supervivencia después del trasplante al campo es alta. La inflorescencia tiene forma de un cepillo de limpiar botellas (Apéndice 1).

El cepillo de botella crece mejor en suelos limo arcilloso y moderadamente salino, pero no tolera condiciones de pobre drenaje. Esta especie es usada en Puerto Rico como ornamental y de sombra para áreas urbanas y posee raíz pivotante que no representa una amenaza a la seguridad pública ni a la infraestructura soterrada.

El roble venezolano (*Tabebuia rosea*) es una especie nativa de Centro y Sur América. Este árbol es de altura mediana, siempre verde y con crecimiento mediano, se propaga por semillas y posee hojas palmado-compuestas y opuestas, con tres a cinco folíolos de tamaños diferentes, los basales siempre son mas pequeños, el de mayor tamaño es el central. Los folíolos tienen forma abobada, con ápice acuminado, bordes enteros y base obtusa. También tolera una gran variedad de tipos de suelo, incluyendo suelos pobres, parcialmente inundados y áreas secas (Francis, 1999). El roble venezolano es una especie ornamental, con flores blancas o rosadas y en forma de campana, reunidas en grupos terminales (Apéndice 2). En Puerto Rico se planta a lo largo de las calles, patios y parques. Esta especie de árbol alcanza una altura de alrededor de 20 a 35 m. Posee un sistema radicular pivotante y no representan una amenaza a la seguridad pública.

El saúco amarillo (*Tecoma stans*) es un árbol nativo del Caribe. Este árbol es de pequeña a mediana altura y siempre verde, se propaga por semillas y posee hojas opuestas, pinadas compuestas, hojuelas lanceoladas y con el borde aserrado. El crecimiento de esta especie es rápido y se encuentra principalmente en el sur de Puerto Rico. Tolerancia todo tipo de suelos, incluyendo los de alta salinidad. El saúco amarillo es

una especie ornamental y de sombra urbana, con flores vistosas de racimos terminales, grandes, tubulares y amarillas (Apéndice 3). La flor es considerada como la flor Nacional de las Islas Vírgenes. Actualmente se planta a lo largo de las calles, parques y patios.

Para el establecimiento de los árboles, se usaron dos tipos de suelo: franco arcilloso arenoso (aluvión de río- Entisol) proveniente del pueblo de San Germán y un suelo arcilloso (Ultisol) proveniente de la Finca Alzamora de Mayagüez. Los suelos se analizaron para determinar su textura, pH y contenido de materia orgánica.

4.3 Establecimiento de los árboles

Todos los árboles se sembraron en tiestos de 18.52 litros (5 galones) con un diámetro interno superior de 28.89 cm y un diámetro interno inferior de 26.0 cm y un largo de 36.5 cm. Los mismos fueron transplantados directamente a un tiesto más pequeño construido con tela metálica de 1.27 cm x 2.54 cm, con un diámetro interno de 15.9 cm y una altura de 15.2 cm que estuvieron ubicados dentro del tiesto de 18.52 L (Apéndice 4). Se añadió suelo alrededor del tiesto construido con tela metálica, el cual fue compactado a diferentes densidades aparentes: control (sin compactar), 1.1 g/cm^3 y 1.4 g/cm^3 para el suelo franco arcilloso arenoso y para el suelo arcilloso: control (sin compactar), 1.2 g/cm^3 y 1.4 g/cm^3 (Apéndice 5). Se compactó el suelo con el impacto de caída libre de un martillo de 2.5 kg y una altura de caída de 30.4 cm. Para obtener los valores de 1.1 g/cm^3 para el suelo franco arcilloso arenoso y 1.2 g/cm^3 para el suelo arcilloso, se llenaron los tiestos de 18.52 L en tres capas. Cada capa tuvo un espesor

aproximado de 12.1 cm y se le aplicó 25 golpes por capa, en total de 75 golpes por tiesto (Apéndice 6). Para obtener los valores de 1.4 g/cm^3 para ambos suelos, se llenaron los tiestos de 18.52 L en siete capas. Cada capa tuvo un espesor de 5.2 cm y a cada capa se le aplicaron 200 golpes por capa, para un total de 1,400 golpes por tiesto (Apéndice 7). Los 108 tiestos con árboles fueron ubicados aleatoriamente en una planicie donde tenían un espacio de 30.48 cm entre columnas y 60.96 cm entre fila. A los árboles no se le aplicó riego, ni fertilizantes, ni encalado. Estos recibieron agua por la precipitación natural.

Se tomaron datos de crecimiento en altura, peso seco del tallo, raíz y hojas, diámetro a la altura del suelo, número de hojas, área foliar y color de hojas. Estas medidas fueron utilizadas para determinar el rango de tolerancia de los árboles en los suelos urbanos.

4.4 Diseño Experimental

En este experimento se utilizó un diseño completamente aleatorizado con un modelo factorial $3 \times 2 \times 3 \times 3$ con dos repeticiones. Se utilizaron tres especies: cepillo de botella, saúco amarillo y roble venezolano, dos tipos de suelo [suelo franco arcilloso arenoso (Aluvión-Entisol) y un suelo arcilloso (Ultisol)]. Se compactó el suelo franco arcillo arenoso en tres densidades aparentes diferentes [control (suelo sin compactar), 1.1 g/cm^3 y 1.4 g/cm^3 (suelos compactados)] y el suelo arcilloso en densidades aparentes [control (suelo sin compactar), 1.2 g/cm^3 y 1.4 g/cm^3 (suelos compactados)] en tres tiempos. Cada dos meses y hasta seis meses, se tomaron dos muestras de cada especie, tratamiento y tipo de suelo. Las observaciones realizadas fueron:

1. Crecimiento en altura (cm)

2. Peso seco del tallo (g)
3. Peso seco de la raíz (g)
4. Peso seco de las hojas (g)
5. Diámetro del tallo al nivel del suelo (cm)
6. Número de hojas
7. Área foliar (cm²)
8. Color de la hoja

Se compararon los resultados de las tres especies y de cada especie por separado. Los valores se analizaron mediante una prueba de ANOVA utilizando (SAS Institute Inc., 1999) y se realizó una comparación de medias con LSD de Fisher a un nivel de confiabilidad de 5 %.

4.5 Caracterización morfológica

Se tomaron en consideración las siguientes variables morfológicas analizadas a partir de las mediciones realizadas cada dos meses:

4.5.1 *Altura del árbol:* utilizando una cinta métrica en centímetros (cm)

4.5.2 *Número de hojas:* se contaron todas las hojas de los árboles.

4.5.3 *Diámetro del tallo:* al nivel del suelo utilizando un Caliper (cm).

4.5.4 *Peso seco del tallo:* Los tallos se envolvieron en papel de periódico y se secaron a temperatura ambiente por dos semanas. El peso seco se determinó utilizando una balanza analítica Ohaus GT 480.

4.5.5 *Peso seco de las hojas:* Las hojas se envolvieron en papel de periódico y se secaron a temperatura ambiente por dos semanas. El papel se cambió cada dos días para

evitar que se pudrieran las hojas. El peso seco se determinó utilizando una balanza analítica Ohaus GT 480.

4.5.6 *Peso seco de las raíces:* Las raíces se envolvieron en papel de periódico y se secaron a temperatura ambiente por dos semanas. El papel se cambió cada dos días para evitar que se pudrieran las raíces. El peso seco se determinó utilizando una balanza analítica Ohaus GT 480.

4.5.7 *Área foliar:* Se utilizó un medidor de área foliar (Apéndice 8). Se determinó el área foliar de cada árbol utilizando un metro de área foliar localizado en el “Tropical Agriculture Research Station” (TARS-USDA), Mayagüez, Puerto Rico.

4.5.8 *Color de la hoja:* El color de las hojas se determinó utilizando el “Munsell® Color Chart for Plant Tissues” (1977). Se usó la carta de coloración de hojas ya que el color de las hojas refleja la influencia de la luz, la temperatura y la composición química del suelo, especialmente cuando el suelo tiene alguna deficiencia de macro o micronutrientes. Según la carta de colores, los colores de la hoja son: verde, verde oscuro, verde amarillo, verde grisáceo. Algunas veces la coloración de las hojas revela el origen genético de las plantas, el efecto de una sustancia tóxica o la acción de un organismo parasítico. El sistema de notación de color “Munsell” es esencialmente científico el cual describe y analiza los colores en término de los siguientes tres atributos: color (hue), valor (value) y croma (chroma). Estos atributos son arreglados en escala según el campo visual. Los colores cromáticos en el sistema están divididos en cuatro clases principales de color: rojo, amarillo, azul y violeta. Una subdivisión a estos colores lo son: amarillo verdoso, verde amarilloso. El valor indica el grado de oscuridad o claridad del color en relación a la escala de gris neutral que se extiende del

negro puro (0) al blanco puro (10). El croma indica la fuerza de saturación o el grado de partida de un color en particular proveniente de un gris neutral (0) hasta la saturación de un color (12).

4.5.9 Relación raíz:vástago Se determinó la relación entre la masa seca de las raíces y la masa seca del tallo.

4.6 Caracterización del Suelo

Los análisis del suelo fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y de Física de Suelos del Departamento de Agronomía y Suelos y en el Laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, de la Universidad de Puerto Rico. Se midieron los siguientes parámetros para ambos tipos de suelos utilizados:

4.6.1 pH del suelo (1:2), 20 gramos de suelo en 40 ml de agua destilada (Apéndice 9). El pH del suelo se determinó utilizando 20 gramos de suelo y 40 ml de agua. La muestra se agitó por 10 minutos y el pH del suelo en suspensión se midió utilizando un potenciómetro Fisher Accumet 800 (Sims, 1996).

4.6.2 pH del suelo (1: 2), 20 gramos de suelo en 40 ml de KCL.

El pH del suelo también se determinó utilizando 20 gramos de suelo y 40 ml de KCl 1M. La muestra se agitó por 10 minutos y el pH del suelo en suspensión se midió utilizando un potenciómetro Fisher Accumet 800.

4.6.3 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico

Los cationes intercambiables: potasio, calcio y magnesio fueron extraídos con acetato de amonio (NH_4Ac) 1N a pH 7.0. Mientras que los cationes extractables: hierro, manganeso y zinc fueron extraídos con una solución doblemente ácida (0.05N HCL + 0.025N

H₂SO₄). Todos los elementos se determinaron por absorción atómica utilizando un espectrofotómetro Perkin-Elmer A.Analyst 300.

4.6.4 Distribución de tamaño de partículas del suelo (*textura*) (Jackson, 1975).

La textura del suelo se determinó mediante el sistema de clasificación del suelo de la USDA. Este método determinó la textura del suelo mediante la separación cuantitativa de las fracciones texturales del suelo (arena, limo y arcilla), haciendo una dispersión adecuada de la muestra. Para poder obtener las fracciones texturales se removió la materia orgánica utilizando acetato de sodio y peróxido de hidrógeno, y los carbonatos saturando el suelo con carbonato de sodio, ya que estos dificultan la dispersión de las partículas (Apéndice 10).

4.6.5 Densidad aparente (*Da*) de un suelo perturbado mediante el método del terrón

Para poder sacar una muestra de cada tiesto, se utilizó el barrenador de suelo utilizado para la instalación del “soil profile probe”. De esa muestra se seleccionó un terrón que entrara en una probeta de 100 ml y se pesó (Apéndice 11a). El mismo fue envuelto en papel de parafina de tal forma que no quedó burbujas de aire y se tomó el peso (Apéndice 11b). Se introdujo el terrón dentro de la probeta llevada a volumen de 60 ml (Apéndice 11c). Se determinó el volumen que se desplazó de agua (1ml = 1cm³). Al terrón se le quitó el papel de parafina y se puso a secar en el horno a 105° C por 24 horas (Apéndice 11d). Se tomó el peso seco. Se calculó la densidad aparente utilizando la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Volumen de agua desplazada} - \text{Volumen de la parafina}} \quad (1)$$

4.6.6 Densidad de partículas (D_p) utilizando el método del picnómetro

Se determinó la densidad de partículas del suelo mediante el método del picnómetro (Black, 1965). Se pesó el picnómetro seco y tapado, se le añadió 1 cm³ de suelo previamente secado al horno y se volvió a pesar. Se le añadió agua destilada hasta la mitad del picnómetro y se cubrió la boca del picnómetro con un pedazo de papel de cera y se agitó para que los poros del suelo se llenaran de agua. Se puso el picnómetro en la hornilla durante 10 minutos para extraer todo el aire del agua. Se dejó enfriar el picnómetro en un baño de agua corriente hasta alcanzar la temperatura de salón (aproximadamente 30 minutos). Se llenó completamente el picnómetro con agua destilada, se tapó y se volvió a tomar el peso.

4.6.7 Gravedad específica (G_s) (ASTM 152-H)

Se determinó la gravedad específica utilizando un matraz volumétrico de 500 ml seco. Se le tomó el peso seco y se le añadió agua destilada hasta la marca de 500 ml y se tomó el peso. Además se le tomó la temperatura del agua. Se tomó 100 gramos de suelo secado al aire libre, se colocó en un plato de evaporación. Si el suelo es adhesivo se le añadió agua a la mezcla hasta formar una pasta, dejando el suelo saturarse durante media a una hora en el plato de evaporación. Se transfirió el suelo a un matraz volumétrico de 500 ml y se añadió agua hasta llenar dos tercera partes del matraz. Se removió el aire de la mezcla del suelo al agitar y calentar el matraz por 20 minutos. Se le succionó el aire retenido en la mezcla. Al finalizar la succión se llevó la temperatura a la de salón. Se llenó la volumétrica al nivel de 500 ml, y se pesó de nuevo y se tomó la temperatura. El suelo que estaba dentro del matraz se vació a un plato de evaporación y se determinó el

peso seco de la muestra al horno a las 24 horas. Se calculó la gravedad específica mediante la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{\text{Peso seco del suelo al aire}}{\text{Peso equivalente del volumen de agua}} \quad (2)$$

4.6.8 Porcentaje de porosidad

Se calculó el porcentaje de porosidad del suelo perturbado utilizando los valores de D_a y los valores de D_p . La fórmula de porosidad es:

$$\% \text{ de Porosidad} = \left(1 - \frac{D_a}{D_p}\right) * 100 \quad (3)$$

4.6.9 Determinación de Estabilidad de Agregados

La estabilidad de agregados se determinó por el método de tamizado húmedo (Kemper y Rosenau, 1986). Se utilizaron cuatro muestras de 30 g de suelo de los cuales dos fueron puestos en el horno a 105° C por 24 horas y luego se les tomó el peso. Las otras dos muestras se colocaron en el tamiz no.10 sobre el tamiz no. 20 y se fijaron en el sistema agitador. El sistema de agitación se llevó hasta el punto más alto de ondulación (Apéndice 12). Se le añadió agua al tanque hasta que el mismo tocó la muestra de suelo, permitiendo que el mismo se humedeciera por capilaridad durante 10 minutos. Se le añadió 2.54 cm³ de agua para que saturara el suelo. Se encendió el sistema de agitación por 30 minutos. Al cabo de los 30 minutos se removieron los cedazos y se secaron los agregados en el horno a 105° C por 24 horas y se pesaron. La fórmula de estabilidad de agregados es:

$$\% \text{ A.E.} = \frac{(A+B)}{C} * 100 \quad (4)$$

Donde A y B es el peso seco de los agregados retenidos en los tamices no.10 y no. 20, y C es el peso seco del suelo (30 g de suelo) puesto inicialmente en el horno.

4.6.10 Materia orgánica utilizando el procedimiento de oxidación húmeda de Walkley y Black

Se determinó el porcentaje de materia orgánica mediante el método de oxidación húmeda de Walkey y Black (Nelson y Sommers, 1982). En este método se mide el carbono orgánico oxidado por dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Luego el mismo se titula con sulfato amónico ferroso ($Fe(NH_4)(SO_4)_2$). (Apéndice 13).

4.6.11 Determinación de los límites de Atterberg

Se midieron los límites de Atterberg de ambos suelos según el procedimiento de la norma ASTM D-4318. Para cada suelo se determinó el límite líquido (Apéndice14-15) y el límite plástico (Apéndice16-17).

4.6.12 Humedad volumétrica mediante la humedad gravimétrica

Se determinó la humedad volumétrica (Θ_v) mediante la humedad gravimétrica utilizando la fórmula:

$$\Theta_v = \frac{(P.H. - P.S.) * D_p}{P.S. * D_w} * 100 \quad (5)$$

Donde P.H. es el peso húmedo del suelo, P.S. es el peso seco del suelo, D_p densidad de partículas y D_w densidad del agua. Se utilizó una muestra de suelo para cada nivel de compactación y se puso a secar al horno a 105° C por 24 horas.

4.6.13 Humedad volumétrica utilizando el Soil Profile Probe (PR-1)

Se utilizó el “soil profile probe” (PR-1) para determinar la humedad volumétrica del suelo y comparar los resultados obtenidos con los calculados mediante la humedad gravimétrica. Se realizaron lecturas dos veces en la semana por los seis meses de experimentación. El “soil profile probe” es un instrumento diseñado para tomar el contenido de humedad volumétrica del suelo a diferentes profundidades del perfil del suelo. Consiste de un tubo sellado de aproximadamente 25 mm de diámetro con sensores electrónicos (en forma de pares de anillo de acero inoxidable), arreglados en intervalos en su longitud. Cuando se va a tomar una lectura, el “sensor” es insertado en el tubo de acceso. Los tubos de acceso son especialmente construidos con unas paredes delgadas, lo cual maximiza la penetración del campo electromagnético en el suelo que lo rodea. La salida de cada “sensor” es un análogo simple de voltaje. Esta salida es fácil de convertir a contenido de humedad usando la calibración general de los suelos ya dado, o el “probe” puede ser calibrado para algún suelo en específico utilizando el “Theta Probe”. La instalación del tubo de acceso del “Soil Profile Probe” en el suelo, fue mediante el uso de un barrenador de suelo y se insertó derecho haciendo un hueco de forma vertical al suelo ubicado dentro del tiesto de 18.52L. El hueco realizado tenía un diámetro de alrededor de 28 mm ajustándose perfectamente el tubo de acceso. Se prefiere obtener huecos más angostos ya que se obtiene lecturas más reales y confiables.

4.6.14 Resistencia del suelo

Se utilizó el penetrómetro de bolsillo para evaluar la resistencia del suelo compactado y así determinar el nivel de compactación con el tiempo, es decir a los 2, 4 y 6 meses

después del transplante. Las lecturas con el penetrómetro de bolsillo se hicieron en la capa superior del suelo en cuatro puntos diferentes.

4.6.15 Determinación de la permeabilidad del suelo mediante la prueba de consolidación unidimensional

Debido a la baja permeabilidad de los suelos utilizados, se utilizó la prueba de consolidación de anillo fijo para medir la permeabilidad de los suelos. La consolidación es el proceso de compresión del suelo por expulsión del agua y es un proceso dependiente del tiempo. En el ensayo se satura el suelo y se va aplicando presiones en forma incrementada y a su vez se va midiendo el cambio de altura de la muestra en el tiempo. El consolidómetro de anillo fijo consiste de una base de un hueco, dos piedras porosas, un anillo de acero que sostiene el suelo y un anillo de metal que puede ser sujeta a la base. En este tipo de consolidómetro, la compresión del suelo ocurre desde la parte superior hacia la parte inferior. El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D-2166 (Apéndice 18-22).

4.6.16 Análisis de granulometría

Se realizó el análisis de granulometría para determinar la distribución del tamaño de partículas en cada suelo. Con esta información se puede clasificar el suelo utilizando el sistema de clasificación unificado, comúnmente utilizado por ingenieros civiles. Este método es utilizado por los ingenieros con el propósito de poder ayudar a predecir las propiedades ingenierías del suelo como lo son la permeabilidad, la infiltración de agua, densidades de compactación esperadas, susceptibilidad de los suelos a congelarse, y otros (Chou, 1977). Se determinó la granulometría de los suelos mediante el uso de

tamices siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D- 422 (Apéndice 23).

4.6.17 Prueba de Compactación Proctor

Se realizó la prueba de compactación Proctor estándar para determinar la densidad óptima para cada suelo. La densidad óptima es el punto máximo en una curva de densidades secas del suelo contra el contenido de humedad del suelo compactado, realizado bajo esfuerzos de compactación estándar que simulan a los esfuerzos de compactación utilizados en el campo. Los ensayos se realizaron siguiendo las normas ASTM D-698 (Apéndice 24).

4.6.18 Demostración de la naturaleza de la porosidad de los suelos utilizados mediante la laminilla petrográfica

Se prepararon las laminillas petrográficas para estudiar posibles cambios en los espacios vanos o porosidad de los suelos, como consecuencia de los diferentes niveles de compactación (Apéndice 25). Se utilizó un microscopio electrónico Nikon Labophot.

4.6.19 Mineralogía de los suelos utilizados

Se determinó la mineralogía de los suelos mediante Difracción de Rayos- X (XRD), utilizando un difractómetro Siemens. El análisis se realizó en muestras en polvo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se encuentran los datos estadísticos que se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y se compararon con un nivel de confiabilidad (α) de 0.05. Aquellas fuentes de variación donde no hubo significado estadístico se le colocaron las letras NS, las que fueron significativas con ($\alpha =0.05$) se les colocó un asterisco (*) y las que tienen ($\alpha =0.01$) se le colocó doble asteriscos (**). Para el análisis estadístico se tuvo que eliminar al saúco amarillo sembrado en un suelo arcilloso compactado en siete capas a una densidad aparente de 1.4 g/cm^3 , ya que todos los árboles de esta especie sembrados a esta densidad murieron. Esto se hizo ya que al mantener estos datos al momento de analizar las muestras altera el significado físico y estadísticos de todas las medias.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de F en el análisis de varianza de las variables en estudio								
Fuente de variación	Grados de libertad	Diámetro del tallo	Altura	No. Hojas	Área Foliar	Peso Seco		
						Hojas	Tallo	Raíces
Especie	2	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Tratamiento	2	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Suelo	1	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Tiempo	2	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Repetición	1	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Especie * Tratamiento	4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Especie * Suelo	2	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
Especie * Tiempo	4	NS	*	**	**	**	NS	NS
Tratamiento * Suelo	2	NS	NS	NS	*	NS	*	*
Tratamiento * Tiempo	4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Especie * Tratamiento * Suelo	3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Especie * Tratamiento * Tiempo	8	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Tratamiento * Suelo * Tiempo	6	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS
Especie * Tratamiento * Suelo * Tiempo	10	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS- No hay diferencia significativa, * alfa < 0.05, ** alfa < 0.001.

5.1 Caracterización morfológica

5.1.1 Altura

Se pudo observar que para la variable altura solamente fue significativa la interacción especie por tiempo. El cepillo de botella, a los seis y cuatro meses y el saúco amarillo, especie, a los seis meses después del trasplante, obtuvieron la mayor altura. No se encontró diferencia entre el resto de saúco amarillo y roble venezolano a los diferentes tiempos de cosecha (Apéndice 26 y Tabla 2).

Tabla 2. Prueba de comparación de medias para la variable altura (especie*tiempo)

Especie	Tiempo	Medias (cm)
Cepillo botella	2 meses	77.34 c
Cepillo botella	4 meses	115.93 ab
Cepillo botella	6 meses	125.91 a
Saúco amarillo	2 meses	87.76 c
Saúco amarillo	4 meses	90.81 c
Saúco amarillo	6 meses	96.04 bc
Roble venezolano	2 meses	75.71 c
Roble venezolano	4 meses	83.91 c
Roble venezolano	6 meses	82.66 c

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 25 cm

Resultados similares fueron obtenidos por Smith *et.al.* (2001) donde no encontraron diferencia significativa en altura para las *Eucalyptus ficifolia* y *Corymbia maculata* pero si encontraron diferencia entre *Agonis flexuosa* y *Lophostemon confertus*. Small y McCarthy (2002) encontraron que el crecimiento en altura de *Eupatorium rugosum* se vio afectado por el nivel de compactación, mientras el *Elymus hystrix* creció en todos los niveles de compactación. Snider y Miller (1985) obtuvieron resultados similares en reducción en el crecimiento en altura y biomasa.

5.1.2 Número de hojas

Para la variable número de hojas fueron significativas las interacciones especie por tiempo y especie por suelo. El cepillo de botella obtuvo el mayor número de hojas entre las especies, en los tres tiempos después del trasplante. A los cuatro meses después del trasplante se observó el mayor número de hojas con un promedio de 1,301 hojas. No hubo diferencia significativa entre las especies saúco amarillo y roble venezolano en ninguno de los tres tiempos (Apéndice 27 y Tabla 3). A su vez, se puede observar que hubo una reducción en el número de hojas de las tres especies a los seis meses después del trasplante.

Tabla 3. Prueba de comparación de medias para la variable *número de hojas* (*especie *tiempo*)

Especie	Tiempo	Medias
Cepillo botella	2 meses	552 b
Cepillo botella	4 meses	1,301 a
Cepillo botella	6 meses	735 b
Saúco amarillo	2 meses	101 c
Saúco amarillo	4 meses	140 c
Saúco amarillo	6 meses	50 c
Roble venezolano	2 meses	13 c
Roble venezolano	4 meses	13 c
Roble venezolano	6 meses	7 c

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 377

A los seis meses después del trasplante hubo una reducción significativa en el número de hojas del cepillo de botella a pesar de que no hubo diferencia entre el saúco amarillo y roble venezolano en los tres tiempos de cosecha (Tabla 3). Esa reducción de hojas se debió posiblemente a: 1) estrés calórico, ya que los meses de enero y febrero del 2004, fueron más calientes y secos de lo usual, reduciendo el agua disponible en el suelo y aumentando la evapotranspiración, 2) el tipo de suelo en que fueron sembrados los árboles y 3) el roble venezolano también fue afectado por Lepidópteros que comen y

ovipositan en las hojas. Resultados similares fueron encontrados por Cregg y Dix (2001), en árboles sembrados en áreas urbanas, donde el *Pinus nigra* resulto ser mas tolerante a temperaturas altas y a la sequía que los árboles de madera dura *Quecus rubra* y *Fraxinus pennsylvanica*.

La especie cepillo de botella sembrado produjo el mayor número de hojas en ambos suelos, pero fue en el suelo franco arcilloso arenoso donde obtuvo el mayor número de hojas. No se observó diferencia significativa entre el saúco amarillo y el roble de sabana sembrado en ambos suelos. Además, se observó que el número de hojas es menor en los árboles sembrados en el suelo arcilloso (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba de comparación de medias para la variable *número de hojas* (*especie*suelo*)

Especie	Suelo	Medias
Cepillo botella	Franco arcillo arenoso	1,209 a
Cepillo botella	Arcilla	516 b
Saúco amarillo	Franco arcillo arenoso	115 c
Saúco amarillo	Arcilla	76 c
Roble venezolano	Franco arcillo arenoso	12 c
Roble venezolano	Arcilla	9 c

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 308

En la figura 1(a) se puede observar que el cepillo botella sembrado en el suelo franco arcillo arenoso posee mayor número de hojas con respecto a su misma especie sembrado en el suelo arcilloso y las demás especies en ambos suelos. Las tres especies produjeron un mayor número de hojas cuando crecieron en el suelo franco arcillo arenoso.

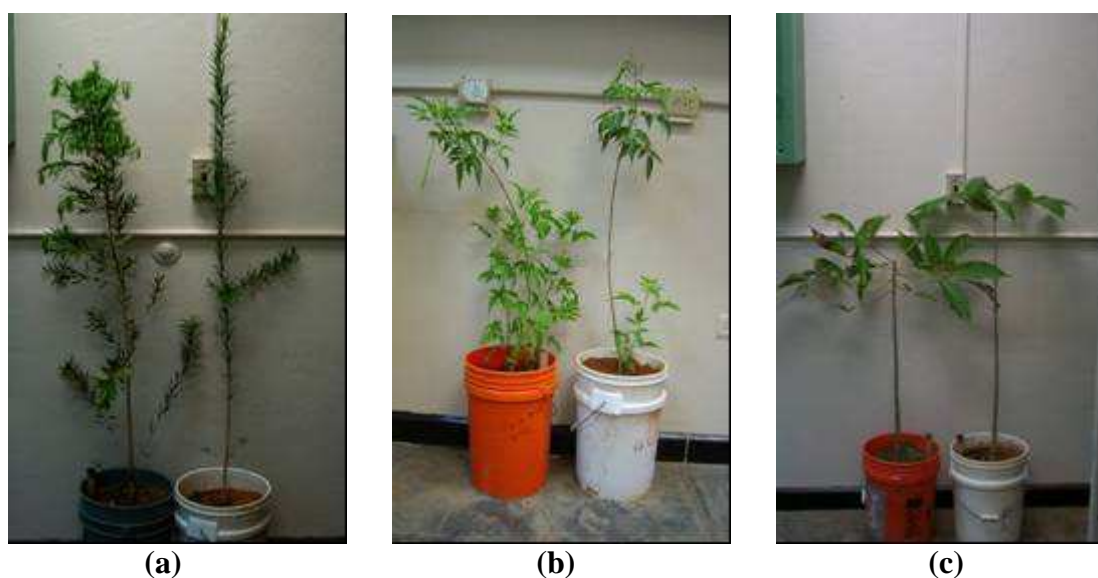


Figura 1. Comparación visual del número de hojas por especie y suelo (árboles en el lado izquierdo de la foto están sembrados en suelo franco arcillo arenoso y el del lado derecho están sembrados en el suelo arcilloso. a) cepillo de botella, b) saúco amarillo y c) roble venezolano

5.1.3 Diámetro del tallo

Los resultados de los datos tomados para la variable diámetro del tallo, fueron significativos los efectos principales: especies tratamientos, tiempos y suelos. Los árboles sembrados en el suelo franco arcilloso arenoso obtuvieron un diámetro del tallo mayor que los árboles sembrados en el suelo arcilloso (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba de comparación de medias del efecto principal *suelo*, para la variable *diámetro del tallo*

Suelo	Medias (cm)
Franco arcillo arenoso	6.09 a
Arcilloso	5.41b

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 0.48 cm

En la prueba de comparación de medias del efecto principal especie, el roble venezolano obtuvo el mayor diámetro del tallo, seguido por el saúco amarillo y cepillo de botella (Tabla 6).

Tabla 6. Prueba de comparación de medias del efecto principal especie para la variable diámetro del tallo

Especie	Medias (cm)
Roble venezolano	2.54 a
Saúco amarillo	1.59 b
Cepillo de botella	0.94 c

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 0.59 cm

En la prueba de comparación de medias del efecto principal tiempo, se obtuvo un mayor diámetro del tallo a los seis meses del trasplante, pero que no hubo diferencia en el diámetro del tallo entre los seis y cuatro meses después del trasplante y entre los cuatro y dos meses después del trasplante (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba de comparación de medias del efecto principal tiempo para la variable diámetro del tallo

Tiempo	Medias (cm)
2 meses	0.56 b
4 meses	1.05ab
6 meses	1.60 a

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 0.59 cm

En la prueba de comparación de medias del efecto principal tratamiento, no se observó una reducción significativa en el diámetro del tallo entre los tratamientos control y tres capas. Sin embargo, si hubo diferencia significativa entre el tratamiento de compactación siete capas con el control y tres capas (Tabla 8).

Tabla 8. Prueba de comparación de medias del efecto principal tratamiento para la variable diámetro del tallo

Tratamiento	Medias (cm)
Control	0.55 a
3 capas	0.86 a
7 capas	0.27 b

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05) = 0.59 cm

Pan y Bassuk (1985) encontraron resultados similares en donde la compactación del suelo afectó adversamente el crecimiento, el diámetro y el peso del tallo. Esto ocurre debido a la reducción del crecimiento radicular cuando crecen en volúmenes de suelo limitado, reduciendo la capacidad de almacenaje de agua. Mientras otros estudios enfatizan que la reducción en el diámetro del tallo es una respuesta a la impedancia mecánica y como resultado de una alteración en la producción de hormonas sintetizadoras de raíces como lo son la giberelina y citokininas (Krizek y Dubik, 1987). Gilman (2004) encontró que el *Quercus virginiana* sembrado en un suelo limo arcilloso a una densidad de 1.37 g/cm^3 y sin irrigación, hubo una reducción en el crecimiento en el diámetro del tallo.

5.1.4 *Peso Seco del tallo*

Para la variable peso seco del tallo fueron significativas las interacciones tratamiento por tiempo y tratamiento por suelo por tiempo. Los árboles sembrados en el suelo franco arcilloso arenoso mostraron un mayor peso seco del tallo que los árboles sembrados en el suelo arcilloso (Apéndice 28 y Tabla 9).

Tabla 9. Prueba de comparación de medias (*tratamiento * suelo*) para la variable *peso seco del tallo*

Tratamiento	Suelo	Medias (g)
Control	Franco arcillo arenoso	35.68 a
3 capas	Franco arcillo arenoso	34.06 ab
7 capas	Franco arcillo arenoso	28.22 abc
Control	Arcilla	18.50 c
3 capas	Arcilla	21.01 c
7 capas	Arcilla	18.05 c
Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente		11.91 g

La comparación de medias de la interacción tratamiento por suelo por tiempo, mostró que los árboles sembrados en el suelo franco arcilloso arenoso, obtuvieron el mayor peso seco del tallo a los seis meses después del transplante, aproximadamente duplicando el peso seco del tallo de los árboles sembrados en el suelo arcilloso. Mientras que a los dos meses después del transplante se obtuvo el menor peso seco del tallo para árboles sembrados en ambos suelos (Tabla 10). Small y McCarthy (2002) encontraron reducción en el peso seco del tallo en el *Eupatorium rugosum* en niveles altos de compactación. Mientras Kjelgren y Clark (1993) encontraron que el *Liquidambar styraciflua* obtuvo una reducción en el peso seco del tallo cuando fue sembrado en suelos franco arcillosos en volúmenes de suelo limitado.

Tabla 10. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo*tiempo) para la variable peso seco del tallo

Tratamiento	Suelo	Tiempo	Medias (g)
Control	Franco arcillo arenoso	2 meses	13.44 cd
3 capas	Franco arcillo arenoso	2 meses	16.93 cd
7 capas	Franco arcillo arenoso	2 meses	13.22 cd
Control	Franco arcillo arenoso	4 meses	36.90 ab
3 capas	Franco arcillo arenoso	4 meses	32.65 bc
7 capas	Franco arcillo arenoso	4 meses	32.82 b
Control	Franco arcillo arenoso	6 meses	56.70 a
3 capas	Franco arcillo arenoso	6 meses	56.28 a
7 capas	Franco arcillo arenoso	6 meses	41.51 ab
Control	Arcilla	2 meses	10.30 d
3 capas	Arcilla	2 meses	14.46 cd
7 capas	Arcilla	2 meses	17.78 cd
Control	Arcilla	4 meses	18.10 cd
3 capas	Arcilla	4 meses	21.30 cd
7 capas	Arcilla	4 meses	21.96 cd
Control	Arcilla	6 meses	27.09 c
3 capas	Arcilla	6 meses	27.27 bc
7 capas	Arcilla	6 meses	44.39 ab

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 20.64 g

5.1.5 *Peso Seco de Hojas*

Para la variable peso seco de hojas la interacción especie por tiempo fue significativa. Se obtuvo un mayor peso seco de las hojas en las especies saúco amarillo y roble venezolano a los cuatro meses después del trasplante. No hubo diferencia entre las tres especies a los dos y seis meses después del trasplante y cepillo de botella a los cuatro meses después del trasplante. A su vez, se puede observar que se obtuvo una reducción en el peso seco de las hojas para las especies saúco amarillo y roble venezolano a los seis meses después del trasplante, mientras hubo un aumento para la especie cepillo de botella (Apéndice 29 y Tabla 11).

Tabla 11. Prueba de comparación de medias (*especie*tiempo*) para la variable *peso seco de hojas*

Especie	Tiempo	Medias (g)
Cepillo de botella	2 meses	6.46 b
Cepillo de botella	4 meses	21.48 b
Cepillo de botella	6 meses	23.69 b
Saúco amarillo	2 meses	16.94 b
Saúco amarillo	4 meses	43.00 a
Saúco amarillo	6 meses	5.57 b
Roble venezolano	2 meses	21.60 b
Roble venezolano	4 meses	50.25 a
Roble venezolano	6 meses	10.64 b

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 18.23 g

5.1.6 *Peso Seco Radicular*

Para la variable peso seco radicular fue significativa la interacción tratamiento por suelo. Se obtuvo el mayor peso seco radicular en los árboles sembrados en el suelo franco arcilloso arenoso para los tratamientos control y compactado en tres capas. No hubo

diferencia entre los árboles sembrados en suelo arcilloso en los tres tratamientos y en el suelo franco arcilloso arenoso compactado en siete capas (Apéndice 30 y Tabla 12).

Tabla 12. Prueba de comparación de medias (*tratamiento* suelo*) para la variable *peso seco radicular*

Tratamiento	Suelo	Medias (g)
Control	Franco arcillo arenoso	34.16 a
3 capas	Franco arcillo arenoso	32.00 a
7 capas	Franco arcillo arenoso	19.88 b
Control	Arcilla	18.22 b
3 capas	Arcilla	21.30 b
7 capas	Arcilla	18.82 b

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 10.17 g

En las figuras 2, 3 y 4 se puede observar las características de los sistemas radiculares de las especies en estudio. En la figura 2, se pudo observar una mayor masa radicular del saúco amarillo sembrado en el suelo franco arcillo arenoso. La masa radicular disminuye al aumentar la compactación del suelo. El sistema radicular del saúco amarillo sembrado en el suelo arcillo en el control mostró (2-a) raíces más gruesas que el de tres capas (2-b). Los seis árboles de saúco amarillo sembrado en el suelo arcilloso y compactado en siete capas (2-c) murieron. Los árboles sembrados en el suelo franco arcillo arenoso compactado en siete capas, las raíces lucen más finas y cortas comparadas con los otros tratamientos del mismo suelo. Además, en general se puede observar que mientras más compacto está el suelo, más finas son las raíces, principalmente en los árboles sembrados en el suelo arcilloso.

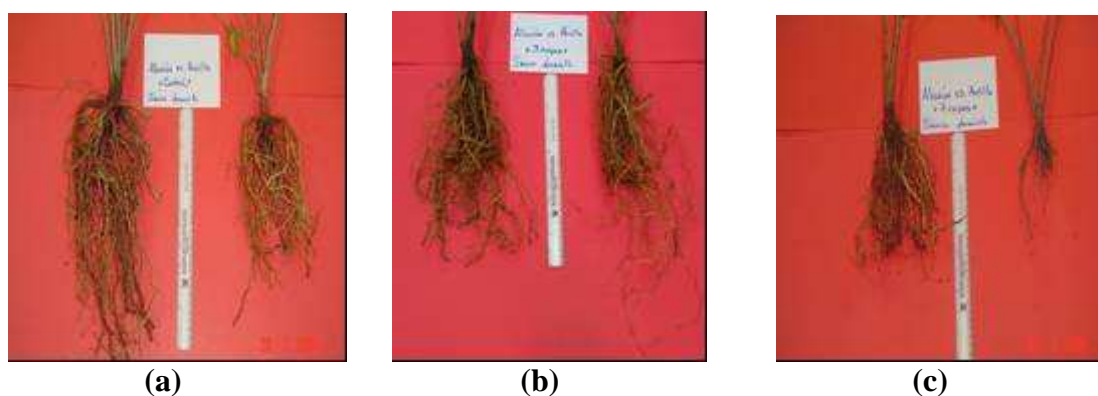


Figura 2. Sistema radicular del saúco amarillo (*Tecoma stans*) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). a) control, b) 3 capas y c) 7 capas

En la figura 3 se puede observar el sistema radicular del cepillo de botella. Los árboles sembrados en el suelo franco arcillo arenoso en todos los tratamientos lucen un sistema radicular superior que el del suelo arcilloso. Las raíces de los árboles sembrados en el suelo arcilloso lucen escasas y débiles comparado con las del suelo franco arcillo arenoso. En el tratamiento de tres capas (3-b), no se puede observar mucha diferencia mientras en el control y el tratamiento de siete capas se puede apreciar diferencia entre las raíces en ambos suelos.

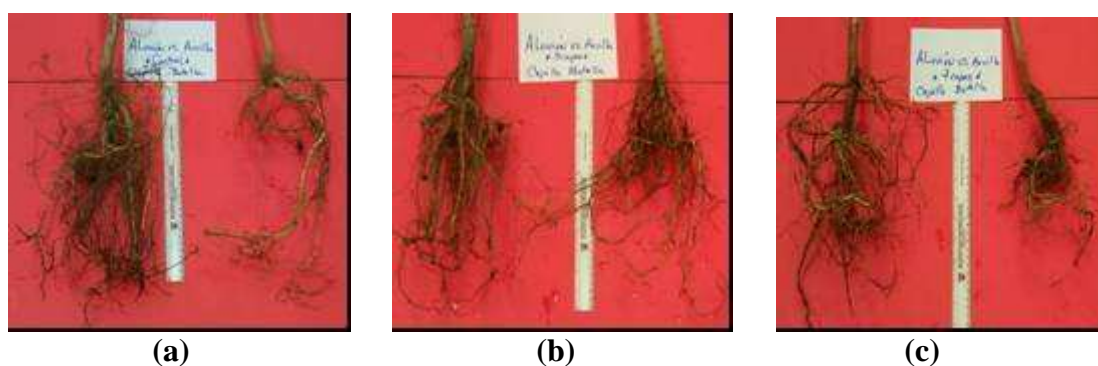


Figura 3. Sistema radicular del cepillo de botella (*Callistemon citrinus*) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). a) control, b) 3 capas y c) 7 capas

En la figura 4 se puede observar el sistema radicular del roble venezolano sembrado en ambos suelos. Solamente en esta especie se pudo observar el efecto de enroscamiento de las raíces, un efecto comúnmente encontrado en árboles sembrados en áreas restringidas. Este efecto está más marcado en el control (4-a) y tres capas (4-b) del suelo franco arcillo arenoso (lado izquierdo de la foto). También las raíces del control y tres capas en franco arcillo arenoso lucen más fuertes y gruesas que las raíces sembradas en el suelo arcilloso. Este enroscamiento radicular del roble de venezolano en nuestro estudio pudo haber sido causado por el tiesto en que fueron sembrados en el umbráculo del Departamento de Recursos Naturales Ambientales, Arecibo. Resultados similares han sido reportados en umbráculos donde los árboles han sido almacenados por largos periodos de tiempo (Watson *et.al.*, 1990).

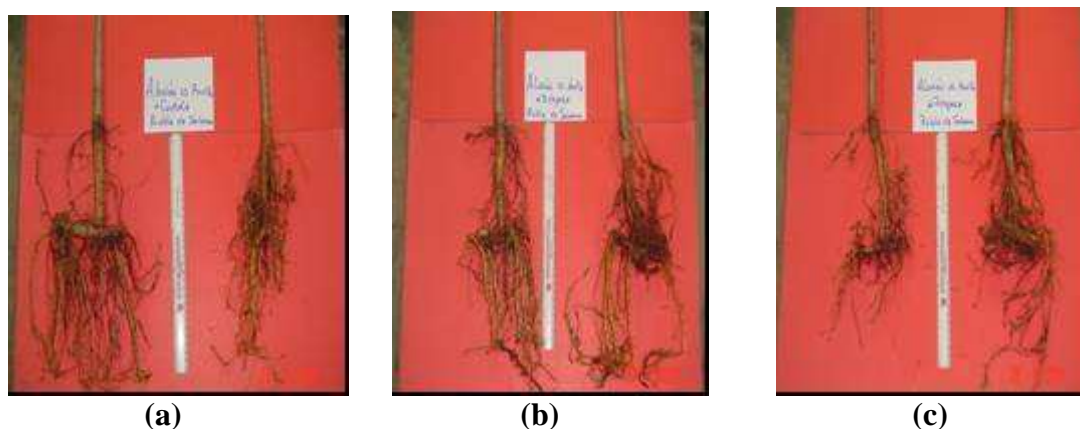


Figura 4. Sistema radicular del roble venezolano (*Tabebuia rosea*) en los tres tratamientos en ambos suelos. El sistema radicular en el lado izquierdo (franco arcilloso arenoso) y en el lado derecho (arcilloso). a) Control, b) 3 capas y c) 7 capas

Grabosky y Bassuk (1996), encontraron que la penetración de las raíces del *Quercus robur* sembrado en el suelo franco arcilloso disminuyó un 50%, al aumentar la densidad aparente de 1.24 g/cm^3 a 1.55 g/cm^3 . A su vez, se observó una reducción en el número

de raíces largas y gruesas en las densidades aparentes más altas. También se encontró que a densidades intermedias, se logró que el suelo retuviera y drenara agua adecuadamente, obteniéndose el mayor crecimiento de las raíces. Costello *et.al.* (1997), observaron que los árboles *Populus nigra* y el *Fraxinus oxycarpa* sembrados en sistemas de barreras circulares permeables poseían un menor número de raíces y distribución radicular al igual que los árboles sembrados en suelos compactados a altas densidades aparentes. Otros estudios han reportado resultados similares con respecto a las respuestas de la distribución de las raíces en condiciones limitantes del suelo (Eavis y Payne, 1968; Fernández *et.al.*, 1995; Gilman, 1996). Barker (1995) encontró que los árboles *Celtis australis* y *Prunus serotina* sembrados en suelos aluviales generaban sistemas de raíces profundas en suelos con barreras y densidades aparentes intermedias. Maupin y Struve (1997) encontraron que no se afectó la regeneración radicular del *Quercus rubra* transplantados en un suelo franco limoso a densidades aparentes entre 1.25g/cm^3 a 1.50 g/cm^3 , pero el crecimiento radicular fue inhibido a una densidad aparente de 1.75 g/cm^3 . Smith *et.al.* (2001) encontró una reducción de 60% en el crecimiento de las raíces de *Corymbia maculata*, *Lophostemon confertus*, *Agonis flexuosa* y *Eucalyptus ficifolia* sembrados en suelos compactados a unas densidades aparentes desde 1.4 g/cm^3 a 1.8 g/cm^3 . En otros estudios en donde los árboles fueron transplantados en suelos compactados, el efecto de la compactación del suelo fue mínimo en el primer año de crecimiento de los árboles (Arnold y Welsh, 1995; Corley, 1984; Gilman y Beeson, 1996, Wood *et.al.*, 1994).

5.1.7 Área Foliar

Para la variable área foliar fue significativa la interacción especie por tiempo y tratamiento por suelo. La especie saúco amarillo mostró el mayor área foliar a los cuatro meses después del trasplante con un promedio de 2,331.64 cm² (Tabla 13). No hubo diferencia significativa entre roble venezolano y cepillo de botella a los cuatro y seis meses después del trasplante y saúco amarillo a los dos meses después del trasplante. Se obtuvo menor área foliar en la especie cepillo de botella a los dos meses después del trasplante y en saúco amarillo a los seis meses después del trasplante (Apéndice 33 y Tabla 13).

Tabla 13. Prueba de comparación de medias (especie*tiempo) para la variable área foliar

Especie	Tiempo	Media (cm ²)
Cepillo de botella	2 meses	439.15 c
Cepillo de botella	4 meses	1009.69 bc
Cepillo de botella	6 meses	1353.99 b
Saúco amarillo	2 meses	1350.76 b
Saúco amarillo	4 meses	2331.64 a
Saúco amarillo	6 meses	306.33 c
Roble venezolano	2 meses	1447.61 b
Roble venezolano	4 meses	1560.00 b
Roble venezolano	6 meses	926.97 bc

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 768.34 cm²

Todos los árboles de las tres especies cosechados en febrero 2004 (seis meses después de trasplante) obtuvieron menor área foliar que los que los otros dos tiempos. Esto se debe a que finales de enero y febrero, ambos meses secos, se registraron temperaturas mayores de lo usual y hubo menos actividad de lluvia. Además, el mayor tamaño de los árboles contribuye a un mayor uso de agua y nutrimentos en un ambiente más restringido que a los dos y cuatro meses. Como respuesta a este estrés, la mayoría de las plantas sueltan sus hojas. Estudios realizados por Shvira *et.al.* (1996), observó que el

crecimiento del *Sequoia sempervirens* fue afectado por el estrés calórico. Los árboles presentaron síntomas como caída de las hojas, enroscamiento de las hojas y hasta la muerte en los casos más extremos.

Para la interacción tratamiento por suelo se obtuvo el mayor área foliar en el suelo franco arcillo arenoso en el control y el compactado en tres capas siendo significativamente mayor que el control y el suelo compactado en tres capas del suelo arcilloso. No hubo diferencia significativa entre el suelo franco arcillo arenoso y el arcilloso compactado en siete capas (Tabla 14).

Tabla 14. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo) para la variable área foliar

Tratamiento	Suelo	Medias (cm ²)
Control	Franco arcillo arenoso	1595.53 ab
3 capas	Franco arcillo arenoso	1828.69 a
7 capas	Franco arcillo arenoso	1238.25 abc
Control	Arcilla	856.886 c
3 capas	Arcilla	758.493 c
7 capas	Arcilla	999.996 bc

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 627.34 cm²

5.1.8 Color de la hoja

Se utilizó el “Munsell Chart” para evaluar el color de hojas de las tres especies de árboles sembrados en dos tipos de suelos a diferentes densidades aparente. El saúco amarillo no mostró cambio en la coloración de las hojas en ninguno de los suelos, tratamientos y tiempos. El saúco amarillo tenía un color verde amarilloso (5GY), un valor de 5 (v5) y un croma de 8 (c8). El cepillo de botella se obtuvo a los dos y cuatro meses después del transplante en ambos suelos un color de hojas verde amarilloso (7.5 GY), un valor de 4 (v4) y un croma de 4 (c4). A los seis meses después del transplante se obtuvo en ambos suelos un color de hojas verde amarilloso (5GY), un valor de 4 (v4)

y un cromax de 6 (c6). El roble venezolano sembrado en el suelo franco arcillo arenoso, no hubo diferencia en el color de hojas a los dos y cuatro meses después del trasplante (7.5GY/v4/c6), mientras a los seis meses después del trasplante se obtuvo una color de hojas (5GY/v4/c6). El roble venezolano sembrado en el control del suelo arcilloso a los dos y cuatro meses después del trasplante tuvo un color de hojas (7.5GY/c4/v4). Los árboles sembrados en el suelo compactado en tres y siete capas para los tres tiempos y el control en los seis meses después del trasplante tuvieron un color de hojas (5GY/v5/c8).

Estudios realizados en el follaje de árboles sembrados en áreas urbanas aún sin ser fertilizados han demostrado que el color de las hojas permanece verde oscuro. Esto ocurre por que son capaces de adaptarse a limitaciones de nutrientes y mantener una apariencia saludable aunque haya niveles bajos de nutrientes, causando reducción en el crecimiento de las raíces y del tallo (Ericsson, 1981; Ericsson y Ingestad, 1988).

5.1.9 Relación raíz: vástago

Se determinó la relación raíz:vástago dividiendo el peso seco radicular entre el peso seco del vástago.

I. Cepillo de botella

Para la especie cepillo de botella sembrado en el suelo franco arcillo arenoso, la relación raíz:vástago en el control y tres capas fue 1:4 y siete capas 1:3. Los árboles sembrados en el suelo arcilloso fueron de 1:3 en los tres tratamientos.

II. Saúco amarillo

Los saúco amarillo sembrados en el control del suelo franco arcillo arenoso y en el suelo arcilloso a los dos y cuatro meses después del trasplante obtuvieron una relación raíz:vástago 1:2.5 pero a los seis meses después del trasplante obtuvo una relación 1:1. Mientras el saúco amarillo sembrado en el suelo franco arcillo arenoso compactado en tres y siete capas obtuvieron una relación a los dos y cuatro meses después del trasplante de 1:4 y a los seis meses del trasplante una relación de 1:1.5. Los árboles sembrados en el suelo arcilloso compactado en tres capas obtuvieron una relación 1:2 a los dos y cuatro meses después del trasplante y 1:1 a los seis meses después del trasplante. Los árboles sembrados en el suelo arcilloso compactado en siete capas murieron.

III. Roble venezolano

Los árboles de roble venezolano sembrados en los tres tratamientos del suelo franco arcillo arenoso y el suelo arcilloso obtuvieron una relación raíz:vástago de 1:2 a los 2 y 4 meses del trasplante y de 1:1 a los seis meses después del trasplante.

En general, se pudo observar una respuesta similar en la relación raíz:vástago de todos los árboles, donde hubo una reducción a los seis meses después del trasplante. Esa reducción en la relación raíz:vástago fue resultado del trasplante y la relación existente entre la reducción del número de hojas, tipo de suelo y nivel de compactación. Resultados similares fueron encontrados por Neal y Whitlow (1997), observando una reducción en crecimiento y relación raíz:vástago en los árboles que no fueron irrigados en periodos secos. Watson (1991) encontró que los *Ulmus pumila* sembrados en climas

áridos obtuvo un radio mayor en la relación raíz:vástago que los árboles sembrados en clima mésico bajo las mismas condiciones.

5.2 Caracterización del suelo

5.2.1 Propiedades químicas y físicas de los suelos

En la tabla 15 se presentan los resultados de los análisis principales para determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos franco arcillo arenoso (Entisol) y arcilloso (Ultisol).

Tabla 15. Análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos				
Análisis	Parámetro	Unidades	Franco Arcillo Arenoso	Arcilla
	pH (H ₂ O) 2:1	pH	7.1	4.7
	pH (KCl) 2:1	pH	6.3	3.7
Macronutrientes	K	Cmol/kg	0.45	0.39
	Mg	Cmol/kg	11.42	2.20
	Ca	Cmol/kg	12.08	4.35
Micronutrientes	Fe	mg/kg	14	29.81
	Mn	mg/kg	56	19.23
	Zn	mg/kg	4	1.31
Textura	Arena	%	45.34	2.08
	Limo	%	25.86	17.44
	Arcilla	%	28.80	80.48
Da		g/cm ³	1.23	1.29
Dp		g/cm ³	2.72	2.68
Gs			2.72	2.68
Porosidad		%	54.8	45.72
E.A		%	42.79	36.99
M.O.		%	1.52	2.24
Límite Líquido		%	35.61	34.50
Límite Plástico		%	26.40	17.78
Índice Plástico		%	9.21	16.72

5.2.2 Densidad Aparente (Da)

Se realizó una prueba de comparación de medias para la variable densidad aparente del suelo mediante el método del terrón, para determinar la interacción tratamiento por suelo (Tabla 16). Los resultados presentados en la tabla 16 demuestran que los suelos permanecieron en los niveles de compactación creados durante los seis meses de la investigación. Donde se obtuvo una mayor densidad aparente para ambos suelos compactados a una densidad de 1.4 g/cm³. En el suelo arcilloso se obtuvo una densidad aparente de 1.2 g/cm³, pero no hubo diferencia entre el suelo compactado a una densidad aparente de 1.1 g/cm³ y el control del suelo franco arcillo arenoso. Se obtuvo la menor densidad aparente para el control del suelo arcilloso de 1.04 g/cm³.

Tabla 16. Prueba de comparación de medias (tratamiento*suelo) para la densidad aparente mediante el procedimiento del terrón

Tratamiento	Suelo	N	Media (g/cm ³)
Control	Franco arcillo arenoso	18	1.07 c
3 capas	Franco arcillo arenoso	18	1.11 c
7 capas	Franco arcillo arenoso	18	1.42 a
Control	Arcilla	18	1.04 c
3 capas	Arcilla	18	1.22 b
7 capas	Arcilla	18	1.42 a

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)=0.098

5.2.3 Humedad Volumétrica determinada por humedad gravimétrica

Para la variable humedad volumétrica por humedad gravimétrica, fueron significativas las interacciones tratamiento por suelo, tratamiento por tiempo y tratamiento por suelo por tiempo. Para la interacción tratamiento por tiempo, se encontró el mayor porcentaje de humedad volumétrica a los dos y cuatro meses después del transplante en los tiestos compactados a una densidad aparente de 1.4 g/cm³. También se encontró el menor

porcentaje de humedad volumétrica en los controles a los dos y seis meses después del trasplante (Apéndice 34 y Tabla 17).

Tabla 17. Prueba de comparación de medias (*tratamiento*tiempo*) para *humedad volumétrica*

Tratamiento	Tiempo	Media (%)
control	2 meses	22.07 b
control	4 meses	24.68 ab
control	6 meses	19.18 b
3 capas	2 meses	30.31 ab
3 capas	4 meses	33.16 ab
3 capas	6 meses	25.54 ab
7 capas	2 meses	41.04 a
7 capas	4 meses	41.20 a
7 capas	6 meses	36.50 ab

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 18.15 %

Para la interacción tratamiento por suelo, se encontró que el suelo franco arcillo arenoso compactado a una densidad aparente de 1.4 g/cm³ tenía mayor por ciento de humedad, pero no hubo diferencia de este con el suelo arcilloso compactado en siete capas y tres capas de ambos suelos. Por otro lado, los controles de los dos tipos de suelos obtuvieron el menor por ciento de humedad (Tabla 18).

Tabla 18. Prueba de comparación de medias (*tratamiento*suelo*) para *humedad volumétrica*

Tratamiento	Suelo	Media (%)
Control	Franco arcillo arenoso	23.30 b
3 capas	Franco arcillo arenoso	29.04 ab
7 capas	Franco arcillo arenoso	43.71 a
Control	Arcilla	20.65 b
3 capas	Arcilla	30.30 ab
7 capas	Arcilla	35.46 ab

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 15.12 %

Para la interacción tratamiento por suelo por tiempo se obtuvo que el suelo franco arcillo arenoso compactado a una densidad aparente de 1.4 g/cm³ a los dos y cuatro meses después del trasplante poseía un mayor por ciento de humedad y el control del suelo

arcilloso a los seis meses y el control del suelo franco arcillo arenoso a los seis meses después del trasplante obtuvieron un menor por ciento de humedad (Tabla 19). Aunque no hay diferencia significativa, se puede observar que el por ciento de humedad es menor en los controles de ambos suelos a los tres tiempos después del trasplante. La humedad volumétrica en los controles en ambos fluctuó entre 17- 26 %. Mientras la humedad volumétrica del tratamiento tres capas en ambos suelos fluctuó entre 23- 34% y del tratamiento siete capas fluctuó entre 31-45 %.

Tabla 19. Prueba de comparación de medias (*tratamiento*suelo*tiempo*) para *humedad volumétrica*

Tratamiento	Suelo	Tiempo	Media (%)
Control	Franco arcillo arenoso	2 meses	21.04 a
Control	Franco arcillo arenoso	4 meses	26.43 ab
Control	Franco arcillo arenoso	6 meses	22.93 ab
3 capas	Franco arcillo arenoso	2 meses	30.37 ab
3 capas	Franco arcillo arenoso	4 meses	32.77 ab
3 capas	Franco arcillo arenoso	6 meses	23.97 ab
7 capas	Franco arcillo arenoso	2 meses	45.00 a
7 capas	Franco arcillo arenoso	4 meses	44.67 a
7 capas	Franco arcillo arenoso	6 meses	41.45 ab
Control	Arcilla	2 meses	22.93 ab
Control	Arcilla	4 meses	21.70 ab
Control	Arcilla	6 meses	17.33 b
3 capas	Arcilla	2 meses	30.25 ab
3 capas	Arcilla	4 meses	27.11 ab
3 capas	Arcilla	6 meses	33.54 ab
7 capas	Arcilla	2 meses	37.42 ab
7 capas	Arcilla	4 meses	37.41 ab
7 capas	Arcilla	6 meses	31.56 ab

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 24.97 %

5.2.4 *Humedad volumétrica determinada por el “soil profile probe” (PR-1)*

Los resultados obtenidos de humedad volumétrica determinada por humedad gravimétrica fue comparada con los resultados obtenidos con el “soil profile probe PR-1”. En la figura 5, se pueden observar los promedios de las lecturas de los tres

tratamientos tomadas durante los seis meses de experimentación. El experimento se estableció a finales de agosto del 2003 y finalizó a finales de febrero del 2004. En la figura 5, se puede observar que se obtuvo menor por ciento de humedad en los controles. La humedad volumétrica fluctuó entre 13-24 %. Para el suelo compactado en tres capas la humedad volumétrica fluctuó entre el 21-36 %. Mientras el suelo compactado en siete capas la humedad volumétrica fluctuó entre 20-35 %. Según Hansen (1980), la línea entrecortada superior representa la capacidad de campo promedio (humedades > 39%), mientras la línea entrecortada inferior representa el punto de marchitez permanente para ambos suelos (humedades < 19 %) y la zona entre las dos líneas entrecortadas representa la humedad volumétrica óptima (20-37 %) para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

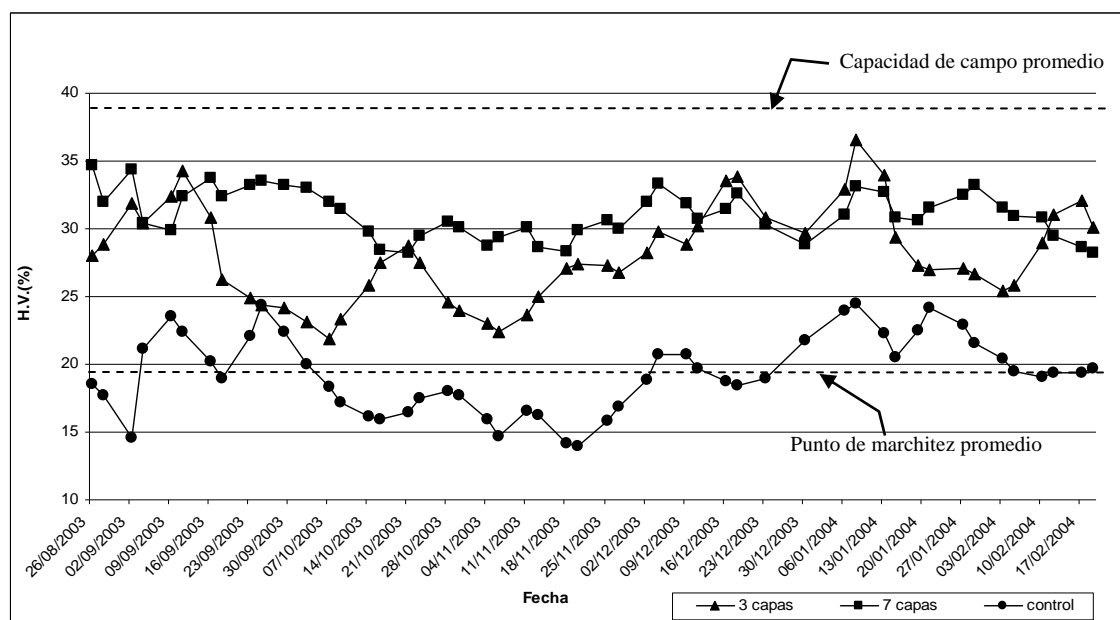
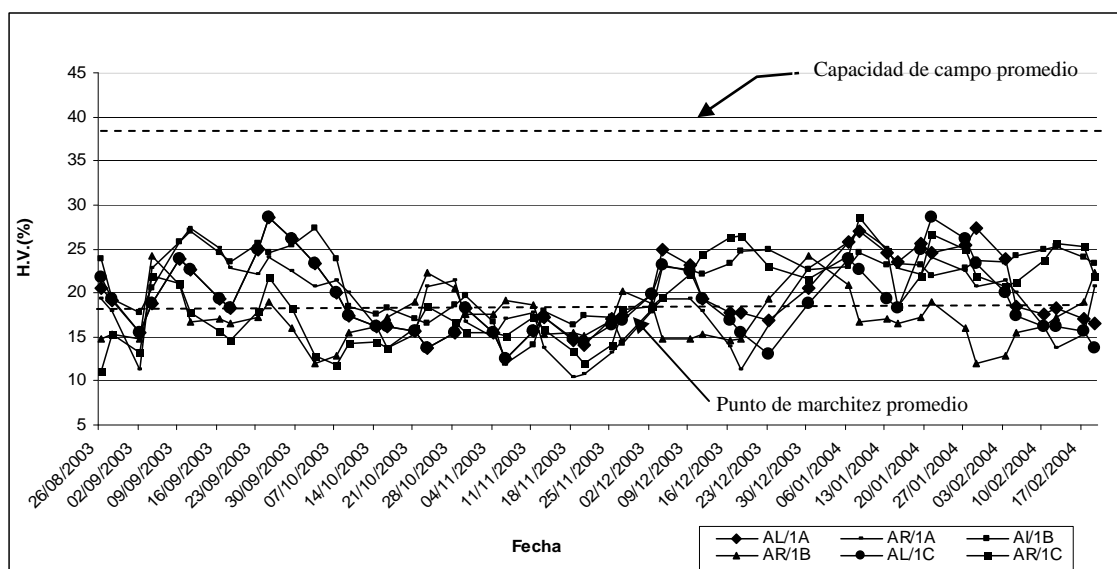


Figura 5. Humedad Volumétrica por nivel de compactación utilizando el PR-1 (agosto/03 - febrero/04)

En la figura 6 se puede observar la humedad volumétrica promedio (utilizando el PR-1) de los controles según la especie y el tipo de suelo, donde la humedad volumétrica

fluctuó entre 10-28 %. Se puede observar que las lecturas más bajas se obtuvieron desde mediados de noviembre y diciembre (10-22 % de humedad). Además, se puede observar que aproximadamente la mitad de las lecturas están debajo de la línea entrecortada que representa el punto de marchitez permanente para ambos suelos (Hansen *et. al.* 1980).

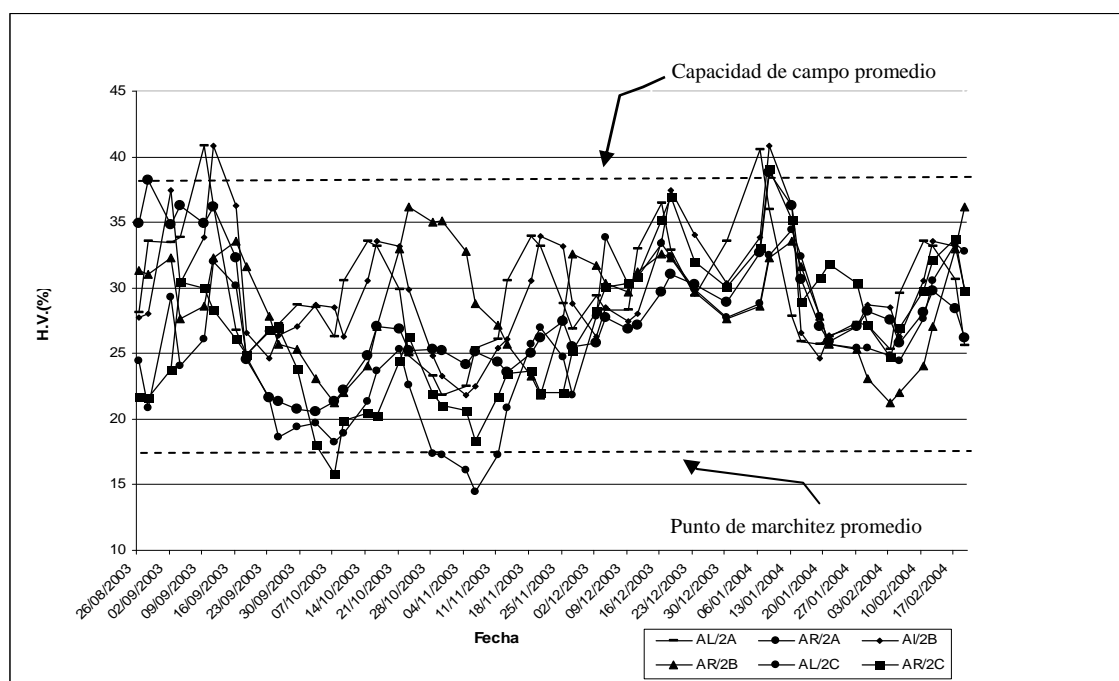


Leyenda de Controles: AL/1A- Cepillo Botella (CB) en suelo franco arcillo arenoso, AR/1A- C.B. en suelo arcilloso, AL/1B- Saúco amarillo (SA) en suelo F.A.A., AR/1B- S.A. en suelo arcilloso, AL/1C- Roble venezolano (RV) en suelo F.A.A y AR/1C- R.S. en suelo arcilloso.

Figura 6. Humedad volumétrica de los controles utilizando el PR-1 (agosto/03 - febrero/04)

En la figura 7 se puede observar la humedad volumétrica promedio del suelo compactado en tres capas según la especie y tipo de suelo, mediante el uso del PR-1. La humedad volumétrica fluctuó entre el 15-40 % y se registraron las lecturas más bajas a finales de octubre a mediados de noviembre. Se encontraron las humedades más altas (40 %) en el cepillo de botella y saúco amarillo sembrados en el suelo franco arcillo arenoso y la humedad más baja en el cepillo de botella sembrado en el suelo arcilloso. Además, se puede observar que la mayoría de las lecturas de humedad se encuentran

entre el 20 – 37 % de humedad volumétrica, considerado el rango de humedad óptimo para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Según Hansen (1980), la línea entrecortada superior representa la capacidad de campo (humedades > 39 %), mientras la línea entrecortada inferior representa el punto de marchitez permanente (humedades < 19 %) para ambos suelos.

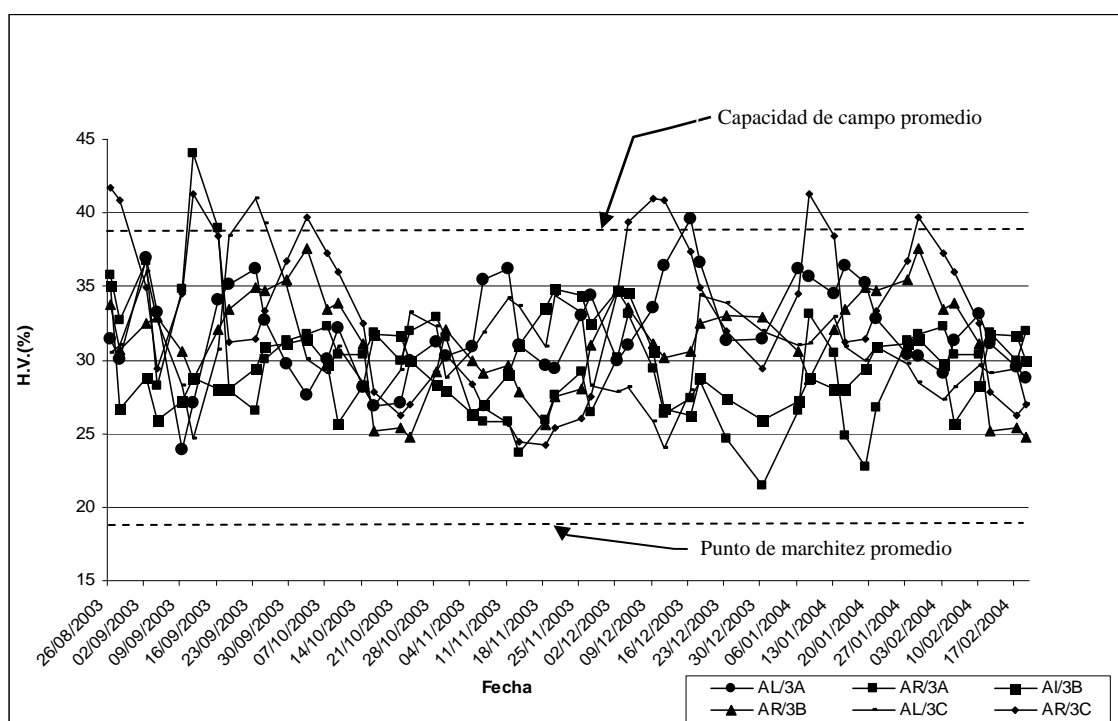


Leyenda de 3 capas: AI/2A- Cepillo Botella (CB) en suelo franco arcillo arenoso, AR/2A- C.B. en suelo arcilloso, AI/2B- Saúco amarillo (SA) en suelo F.A.A., AR/2B- S.A. en suelo arcilloso, AI/2C- Roble venezolano (RV) en suelo F.A.A y AR/2C- R.S. en suelo arcilloso.

Figura 7. Humedad volumétrica del suelo compactado en tres capas utilizando el PR-1 (agosto/03-febrero/04).

En la figura 8 se puede observar la humedad volumétrica promedio del suelo compactado en siete capas según la especie y tipo de suelo, mediante el uso del “soil profile probe” PR-1, donde la humedad volumétrica promedio fluctuó entre 22-45 %. Se pudo observar las lecturas más bajas a finales de diciembre y en enero. Se registró menor por ciento de humedad en el cepillo de botella sembrado en el suelo arcilloso.

Una posible razón puede ser que hubo mayor evapotranspiración. También se puede observar que para el tratamiento 7 capas, la mayoría de las humedades estuvieron dentro de la humedad óptima para el crecimiento (20- 38 % de humedad volumétrica) y desarrollo de las plantas pero se observaron valores de humedad volumétrica que representa capacidad de campo. Pudiendo ser un factor limitante en el crecimiento de las plantas.



Leyenda de 7 capas: AI/3A- Cepillo Botella (CB) en suelo franco arcillo arenoso, AR/3A- C.B. en suelo arcilloso, AI/3B- Saucó amarillo (SA) en suelo F.A.A., AR/3B- S.A. en suelo arcilloso, AI/3C- Roble venezolano (RV) en suelo F.A.A y AR/3C- R.S. en suelo arcilloso.

Figura 8. Humedad volumétrica del suelo compactado en siete capas utilizando el PR-1 (agosto/03-febrero/04)

5.2.5 Resistencia del suelo

Para la variable resistencia del suelo fueron significativas las interacciones especie por tratamiento, tratamiento por suelo y especie por tratamiento por suelo. En la interacción especie por tratamiento se pudo observar que las tres especies sembradas en el

tratamiento de siete capas (densidad 1.4 g/cm³) resultó ser mayor que el resto de las especies en los diferentes tratamientos (Apéndice 35 y Tabla 20). No hubo diferencia entre el tratamiento de tres capas y los controles.

Tabla 20. Prueba de comparación de medias (*especie*tratamiento*) para *resistencia del suelo*

Especie	Tratamiento	N	Media
Cepillo botella	Control	12	0.00 b
Cepillo botella	3 capas	12	0.31 b
Cepillo botella	7 capas	12	1.25 a
Sáuco amarillo	Control	12	0.17 b
Sáuco amarillo	3 capas	12	0.28 b
Sáuco amarillo	7 capas	12	1.30 a
Roble venezolano	Control	12	0.11 b
Roble venezolano	3 capas	12	0.93 ab
Roble venezolano	7 capas	12	1.46 a

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 0.57

En la interacción tratamiento por suelo se obtuvo una mayor lectura en el suelo arcilloso y franco arcillo arenoso compactado en siete capas a una densidad de 1.4 g/cm³ (Tabla 21). En la prueba de comparación de medias para el instrumento utilizado para medir la compactación del suelo, se obtuvo que la media del suelo arcilloso compactado a una densidad de 1.4 g/cm³ fue mayor con respecto al resto de los tratamientos y suelos.

Tabla 21. Prueba de comparación de medias (*tratamiento*suelo*) para *resistencia del suelo*

Tratamiento	Suelo	N	Media
Control	Franco arcillo arenoso	18	0.15 b
3 capas	Franco arcillo arenoso	18	0.54 b
7 capas	Franco arcillo arenoso	18	1.47 a
Control	Arcilla	18	0.12 b
3 capas	Arcilla	18	0.56 b
7 capas	Arcilla	18	1.52 a

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 0.47

Rolf (1991) encontró que el penetrómetro de bolsillo es un utensilio simple para determinar la condición mecánica del suelo, específicamente la resistencia del suelo. Se

pudo observar en el estudio de Rolf que a densidades mayores de compactación, mayor fue la lectura obtenida por el penetrómetro de bolsillo. Resultados similares se pueden observar en la tabla 21. A mayor densidad aparente en el suelo arcilloso, mayor la lectura obtenida del penetrómetro de bolsillo.

En la interacción especie por tratamiento por tiempo, las tres especies sembradas en un suelo arcilloso y suelo franco arcillo arenoso a una densidad aparente de 1.4 g/cm^3 obtuvieron una media mayor comparado con el resto de las especies sembrados en los dos suelos en los diferentes tratamientos. No hubo diferencia significativa entre el resto de las especies sembradas en ambos suelos y tratamientos (Tabla 22).

Tabla 22. Prueba de comparación de medias (*especie*tratamiento* suelo*) para *resistencia del suelo*

Especie	Tratamiento	Suelo	Media
Cepillo de botella	Control	Franco arcillo arenoso	0.00 b
Cepillo de botella	3 capas	Franco arcillo arenoso	0.13 b
Cepillo de botella	7 capas	Franco arcillo arenoso	1.43 a
Cepillo de botella	Control	Arcilla	0.00 b
Cepillo de botella	3 capas	Arcilla	0.20 b
Cepillo de botella	7 capas	Arcilla	1.58 a
Sáuco amarillo	Control	Franco arcillo arenoso	0.00 b
Sáuco amarillo	3 capas	Franco arcillo arenoso	0.41 b
Sáuco amarillo	7 capas	Franco arcillo arenoso	1.42 a
Sáuco amarillo	Control	Arcilla	0.19 b
Sáuco amarillo	3 capas	Arcilla	0.18 b
Sáuco amarillo	7 capas	Arcilla	1.48 a
Roble venezolano	Control	Franco arcillo arenoso	0.13 b
Roble venezolano	3 capas	Franco arcillo arenoso	0.40 b
Roble venezolano	7 capas	Franco arcillo arenoso	1.46 a
Roble venezolano	Control	Arcilla	0.10 b
Roble venezolano	3 capas	Arcilla	0.00 b
Roble venezolano	7 capas	Arcilla	1.97 a

Números seguidos por letras iguales no difieren significativamente para LSD Fisher (0.05)= 0.81

5.2.6 Determinación de la permeabilidad del suelo mediante la prueba de consolidación unidimensional

En la figura 9 y 10 se puede observar el rango en el coeficiente de permeabilidad para ambos suelos. Según el sistema de clasificación unificado para suelos de la ASTM, utilizado para propósitos de aplicaciones de ingeniería, ambos suelos son clasificados como arcillosos (CL). En la figura 9 se puede observar que la permeabilidad del suelo arcilloso clasificado por el USDA, fue desde 10^{-8} hasta 10^{-10} cm/seg, los cuales caen bajo la permeabilidad típica (bajo una gradiente unitario= 1) de un suelo arcilloso que es menor de 10^{-7} cm/seg. En la línea del control (símbolo-diamante), el peso unitario seco fluctuó entre 67.84 a 121.45 lb/pies³ que equivale una densidad aparente de 1.09 a 1.95 g/cm³, el tratamiento de tres capas (símbolo-cuadrado), el peso unitario fluctuó entre 87.65 a 120.71 lb/ft³ (Da= 1.40 a 1.93 g/cm³) y el tratamiento de 7 capas (símbolo-triángulo), el peso unitario fluctuó entre 87.33 a 121.43 lb/pies³ (Da= 1.40-1.95 g/cm³). Se puede observar que según aumenta el peso seco unitario o densidad aparente disminuye la permeabilidad en el suelo arcilloso.

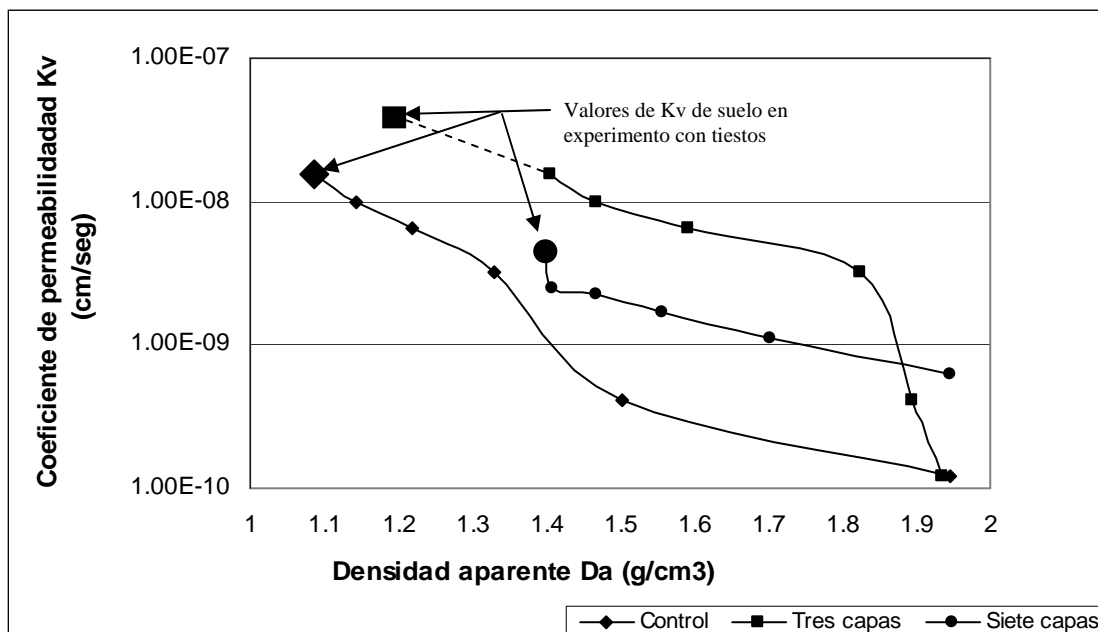


Figura 9. Variación en el coeficiente de permeabilidad (K_v) versus la densidad aparente (D_a) en el suelo arcilloso

En la figura 10 se puede observar que la permeabilidad del suelo franco arcillo arenoso clasificado por el USDA fue desde 10^{-9} a 10^{-10} cm/seg, los cuales caen bajo la velocidad de flujo a través del suelo (bajo una gradiente unitaria de 1) de un suelo arcilloso que es menor de 10^{-7} cm/seg. En el control (forma-diamante), el peso unitario seco fluctuó entre 65.8 a 92.9 lb/pies³ ($D_a = 1.05$ a 1.49 g/cm³), el tratamiento tres capas (forma-cuadrado), el peso unitario fluctuó entre 84.0 a 114.9 lb/pies³ ($D_a = 1.35$ a 1.84 g/cm³) y el tratamiento siete capas (forma-triángulo), el peso unitario fluctuó entre 89.5 a 126 lb/pies³ ($D_a = 1.43$ a 2.02 g/cm³).

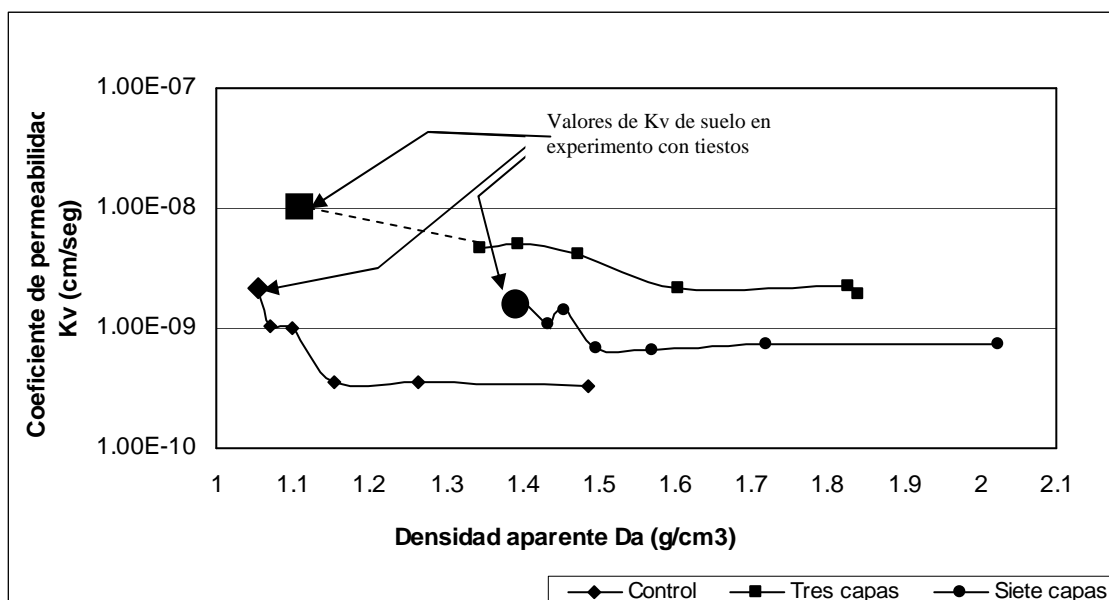


Figura 10. Variación en el coeficiente de permeabilidad (K_v) versus la densidad aparente (D_a) en el suelo franco arcilloso arenoso

En ambas gráficas se puede determinar que ambos suelos son clasificados como arcillosos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg. También se determinó que al aplicar más presión al suelo, aumenta la densidad aparente en ambos suelos, se redujo la porosidad o espacios vanos del suelo y por consiguiente, se redujo el movimiento del agua a través del suelo.

5.2.7 Demostración de la porosidad de los suelos utilizados mediante laminillas petrográficas

En la figura 11 y 12 se pueden observar en forma aproximada los cambios en la porosidad o espacios vanos de los suelos del estudio según aumenta la densidad aparente, mediante la utilización de las laminillas petrográficas. Los espacios vanos o porosidad aparecen en las fotos como espacios de color blanco o azul claro y un diámetro mayor de 5 mm. Las fotos fueron tomadas en un microscopio electrónico sin

polarizador con magnificencia de 20x. En la figura 11 se puede observar claramente que hay una disminución en la porosidad del suelo, donde la foto (a) corresponde a el control posee mayor cantidad de poros que los dos tratamientos de compactación. La foto (b) corresponde a tres capas ($D_a=1.1 \text{ g/cm}^3$) y la foto (c) corresponde a siete capas ($D_a=1.4 \text{ g/cm}^3$). La reducción en los espacios porosos es aproximadamente 50% a una densidad aparente de 1.1 g/cm^3 con respecto al control y más de 90 % a una densidad aparente de 1.4 g/cm^3 .

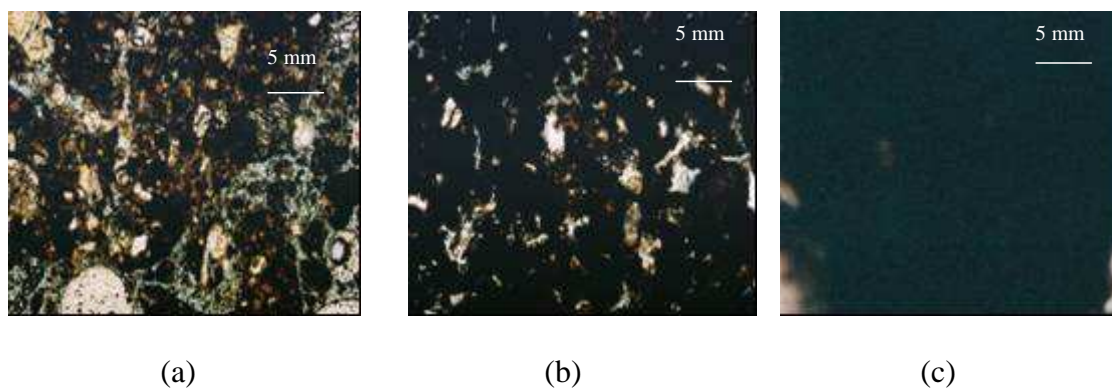


Figura 11. Laminillas petrográficas del suelo franco arcillo arenoso en los tratamientos: a) control ($D_a=1.07 \text{ g/cm}^3$), b) tres capas ($D_a=1.1 \text{ g/cm}^3$) y siete capas ($D_a=1.4 \text{ g/cm}^3$)

En la figura 12 se puede observar claramente la disminución en la porosidad para el suelo arcilloso. Nuevamente para este suelo, la foto (a) control, posee mayor cantidad de espacio de vanos que los dos tratamientos de compactación: (b) tres capas ($D_a= 1.2 \text{ g/cm}^3$) y (c) siete capas ($D_a= 1.4 \text{ g/cm}^3$). Se puede observar que el arreglo de las partículas cambia según el nivel de compactación. En la figura 11 al igual que la figura 12 se observa que los espacios vanos se han reducido entre un 30-45 % entre el control

y a una densidad aparente de 1.2 g/cm^3 y más de un 90 % a una densidad aparente de 1.4 g/cm^3 .

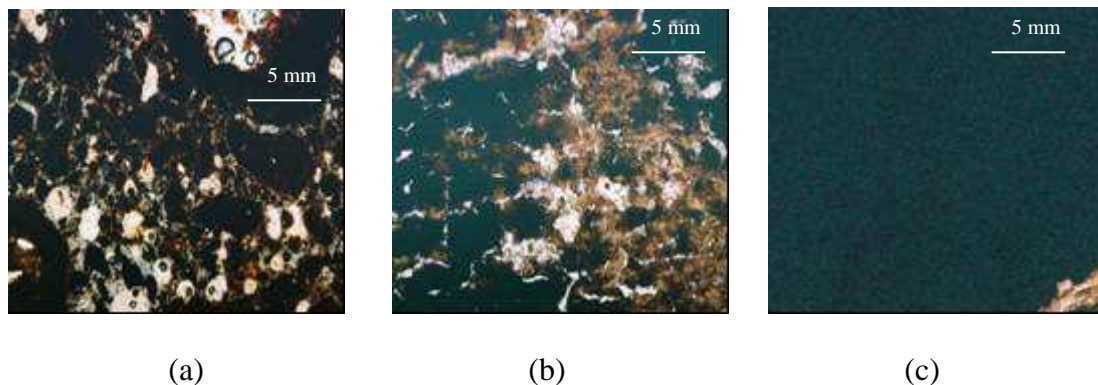


Figura 12. Laminillas petrográficas del suelo arcilloso en los tratamientos: a) control ($D_a=1.04 \text{ g/cm}^3$), b) 3 capas ($D_a=1.2 \text{ g/cm}^3$) y c) 7 capas ($D_a= 1.4 \text{ g/cm}^3$)

5.2.8 Mineralogía de los suelos utilizados

El análisis de difracción de rayos x (XRD), indicó que el suelo franco arcillo arenoso está compuesto principalmente de montmorilonita, caolinita, calcita, cuarzo y albita. Mientras los minerales predominantes en el suelo arcilloso fueron la caolinita, óxidos de hierro y aluminio, cuarzo, gibsita y goetita.

6. CONCLUSIONES

Es importante tener en cuenta que este experimento fue llevado a cabo bajo condiciones naturales ambientales en un área restringida al público en la Finca Alzamora, lo que limita y no necesariamente reflejan las condiciones reales. Teniendo esto en cuenta, esta investigación establece diferencias en las variables morfológicas entre las tres especies analizadas: cepillo de botella, roble venezolano y saúco amarillo en los primeros seis meses después del trasplante. Los factores que establecieron la mayor diferencia en las variables morfológicas fueron el tipo de suelo y el nivel de compactación. En general, se pudo observar que la especie exótica cepillo de botella, nativa de Australia, respondió mejor a los tres tratamientos en ambos suelos que el roble venezolano y el saúco amarillo, nativos de Centro América y el Caribe, respectivamente. A su vez, se pudo observar que los árboles respondieron mejor al tratamiento tres capas en el suelo franco arcillo arenoso que el resto de los tratamientos. Mientras sembrar al saúco amarillo en el suelo arcilloso a una densidad aparente de 1.4 g/cm^3 , es mortal para la especie. También se pudo observar que no hubo diferencia en la coloración de las hojas entre las tres especies y que hubo una reducción en la relación raíz:vástago en las tres especies a los seis meses después del trasplante.

Mediante el análisis estadístico de los resultados obtenidos del penetrómetro de bolsillo y la prueba del terrón, se determinó que la densidad aparente permaneció igual que al inicio de la investigación en todos los tratamientos en ambos suelos.

Además, se pudo comprobar que hay reducción en porosidad cuando se aumenta la densidad aparente: al realizarse laminillas petrográficas, utilizando la fórmula de porosidad y al ver las gráficas de los coeficientes de permeabilidad. Se pudo observar resultados similares en la humedad volumétrica al utilizarse el soil profile probe PR-1 y la conversión de la humedad gravimétrica a volumétrica. Para el tratamiento control, la humedad volumétrica obtenida utilizando el soil profile probe PR-1, no fue tan similar que los obtenidos a través de la conversión de la humedad volumétrica. Esto pudo haber sido causado por aire atrapado alrededor del tubo de acceso causando lecturas erróneas. Según los datos calculados por la humedad gravimétrica, el por ciento de humedad en los controles están por debajo del punto de marchitez permanente que para el suelo arcilloso es 21% de humedad y para el suelo franco arcillo arenoso un 19 % de humedad. Mientras para el tratamiento 3 capas la humedad volumétrica fluctuó en ambos suelos 24-34 % en ambos suelos. Resultados similares fueron obtenidos por el soil profile probe y esta humedad es óptima para el crecimiento de radicular de los árboles. Mientras para el tratamiento 7 capas la humedad volumétrica fluctuó entre 32-45 % de humedad en ambos suelos, lo cual nos indica que la humedad en el suelo estuvo en el punto de capacidad de campo o parcialmente saturados. El crecimiento de los árboles sembrados en el tratamiento de 7 capas pudo haber sido afectados por la saturación del suelo.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda la continuación de esta investigación por un período mínimo de un año en condiciones de laboratorio y bajo condiciones reales y que se realice este tipo de investigación con otras especies comúnmente utilizadas para la reforestación urbana en Puerto Rico como lo son: roble argentino (*Tabebuia argentea*), vomitel colorado (*Cordea sebestena*), maga (*Thespesia populnea*), malagueta (*Pimenta racemosa*) y violeta (*Polygata cowellia*) y otras. En la realización de esta investigación bajo condiciones reales, se debe tomar en cuenta el efecto del calor insular, tipo de suelo, nivel de compactación, volumen de suelo disponible para crecer las raíces, irrigación, tráfico vehicular y peatonal. Por último, como continuación a esta investigación, se deben realizar experimentos de campos con otras especies sembrados en diferentes tipos de suelos y en diferentes tipos de mezclas de estos.

Mientras se determina la tolerancia de todas las especies utilizadas para la reforestación urbana en Puerto Rico a diferentes niveles de compactación, existen varias técnicas para evitar o aliviar el estrés de los árboles producido por la compactación del suelo. Lo más importante es realizar análisis químicos y físicos al suelo donde se va a plantar y al tipo de relleno (mezcla de suelo) que se va a utilizar. Teniendo en cuenta los resultados de los análisis, se debe seleccionar una especie de árbol que posea un sistema radicular profundo de una altura pequeña o mediana, que crezca en áreas limitadas como lo son: las aceras, tiestos, áreas residenciales y carreteras. Estas especies seleccionadas deben aclimatarse a las condiciones climáticas de los lugares de establecimiento. Este

tipo de trabajo debe ser realizado entre el arboricultor y los ingenieros encargados de las construcciones cercanas.

En árboles ya establecidos existen dos tipos de tratamientos que ayudan a evitar y reducir el estrés, los cuales son: tratamientos remediativos alrededor de los árboles existentes y la remoción del suelo en el área entera de siembra. Ambos tratamientos van enfocados en disminuir la compactación del suelo y mejorar la aireación en el suelo. Existen varios equipos utilizados para mejorar la aireación del suelo como los inyectores de presión de aire al suelo creando fracturas en el suelo existente alrededor de los árboles y al remover el suelo del área de siembra, se mezcla ese suelo con otro material más aerado y gravilla, se aumenta la porosidad en el suelo permitiendo que haya más flujo de agua, aire y las raíces pueden penetrar el suelo.

8. LITERATURA CITADA

- Alberty, C.A., H.M. Pellet, y D.H. Taylor. 1984. Characterization of soil compaction at construction sites and woody plant response. *J. Environ. Hort.*2: 48-53.
- American Forests. 1997. The State of Our Urban Forest: Assessing Tree Cover and Developing Goals. American Forests. 27.
- American Society of Testing and Materials. 1995. Section 4, Construction. Annual Book of ASTM Standards vol 4.08. ASTM ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Arnold, M.A. y D.F.Welsh. 1995. Effects of planning hole configuration and soil type on transplant establishment of container- grown live oak. *J. Arboriculture.*21:213-218.
- Barker, P.A. 1995. Managed development of tree roots. I. Ultra-deep rootball and root barrier effects on European hackberry. *J. Arboriculture.*21(4):202-208.
- Barker, P.A. 1995. Managed development of tree roots.II. Ultra-deep rootball and root barrier effects on south western black cherry.*J.Arboriculture.*19:295-309.
- Bassuk, N. y T. Whitlow. 1985. Evaluating Street Tree Microclimates in New York City. In: Kuhns, L.G. and Patterson, J.C. eds. METRIA 5: Selecting and Preparing Sites for Urban Trees.US Forest Service, NE Area. 18-27.
- Bassuk, N. y T. Whitlow. 1988. Environmental stress in street trees. *Arboricultural J.*12:195-201.
- Beatty, R.A. y C. Heckman. 1981. Survey of municipal tree systems in the United States. *Urban Ecol.*, 5: 81-102.
- Berrang, P. y D.F. Karnosky. 1983. Street trees for metropolitan New York. New York Botanical Garden Institute of Urban Horticulture. Cary Arboretum, Millbrook, NY.
- Black, C. 1965. Particle density. University of Minnesota. In Black, C.A.(editor). *Methods of Soil Analysis*, pp. 371-373. American society of Agronomy, USA.
- Bradley, G.A. 1995. *Urban Forest Landscapes. Integrating Multidisciplinary Perspectives.* University of Washington Press, Seattle, United States of America.
- Brady, N. y R. Weil. 1996. *The Nature and Properties of Soils.* 11th ed. Prentice-Hall, NJ. Pp. 740.

- Burg, J. 1985. "Foliar analysis for determination of tree nutrient status- a compilation of literature data". Report. No. 414. De Dorschkamp, Wageningen. 615 pp.
- Chiapperini, G. y J.R. Donnelly. 1978. Growth of sugar maple seedlings in compacted soil. In Proc. Fifth North Amer. For. Biol. Workshop. 196-200.
- Chou, Y.T. 1977. Engineering behaviour of pavement materials state of the art. Technical report s-77-9 of the US Army Engineer waterways experiment station ed. United States Government Printing Office. Washington. 409.
- Clark. 1997. Conceptual and management considerations for the development of urban tree plantings. J. Arboriculture. 15:229-236.
- Corley, W.L. 1984. Soil amendments at planting. J. Environ. Hort.2:27-30.
- Costello, L., C.L. Elmore y S. Steinmaus. 1997. Tree Root Response to Circling Root Barriers. J. Arboriculture. 23(6):211-218.
- Craul, P. 1992. Urban Soil Landscape Design. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Cregg, B. y M.E. Dix. 2001. Tree moisture stress and insect damage in urban areas in relation to heat island effects. J. Arboriculture. 27(1): 8-17.
- Day, S.D., N.L. Bassuk y H.van Es. Effects of Tour Compaction Remediation Methods for Landscape Trees on Soil Aeration, Mechanical Impedance and Tree Establishment. J. Environ. Hort. 13(2):64-71.
- Eavis, B.W. y D. Payne. 1968. Soil Physical conditions and root growth. p.256-269. In W.J.Whittigton (Ed.) Root Growth.Butterworths. London.
- Environmental Protection Agency. 1992. Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. Office of Policy Analysis, Climate Change Division, Washington, D.C.
- Ericsson, T. 1981. Effects of varied nitrogen stress on growth and nutrition in three *Salix clones*. Physiologia Plantarum.51:423-429.
- Ericsson,T. y T. Ingestad. 1988. Nutrition and growth birch seedlings at varied relative phosphorous addition rates.Physiologia Plantarum. 72:227-235.
- Fernández, T.R., R.L. Perry y D.C. Ferree. 1995. Root distribution patterns of nine apple rootstocks in two contrasting soil types. J. Amer. Soc. Hort. Sci.120(1):6-13.
- Foster, R. y J. Blaine. 1978. Urban tree survival: Trees in the sidewalk. J. Arboriculture 4:14-17.

- Francis, J. K. 1999. *Especies Forestales para Plantar en Area Forestales, Rurales y Urbanas de Puerto Rico*. International Institute of Tropical Forestry. Rio Piedras, P.R.
- Gilman, E.F. 2004. Effects of amendments, soil additives, and irrigation on tree survival and growth. *J. Arboriculture*.30 (5):301-310.
- Gilman, E.F., I.A. Leone y F.B. Flower. 1987. Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution. *J. Environ. Hort.*5:33-36.
- Gilman, E.F. y R.C. Beeson, Jr. 1996. Production method affects tree establishment in the landscape. *J. Environ. Hort.* 8:220-227.
- Grabosky, J. y N. Bassuk. 1995. A new urban tree soil to safely increase rooting volumes under sidewalks. *J. Arboriculture*. 21(4): 187-201.
- Grabosky, J. y N. Bassuk. 1996. Testing of structural urban tree soil materials for the use under pavement to increase street tree rooting volumes. *J. Arboriculture*. 22(6):255-263.
- Grimes, D.W., R.J. Miller y V.H. Schweers. 1972. Soil strength-modification of root development and soil water extraction. *Cal. Ag.* 26(11):12-14.
- Handreck, K.A. y N.D. Black. 1994. *Growing Media for Ornamental Plants and Turf* (2d rev.ed.) NSW University Press, Kensington, Australia.
- Harris, J.R. y E.F. Gilman. 1993. Production method affects growth and post-transplant establishment of 'East Palatka' holly. *J. Amer. Soc. Hort. Science* 118(2): 194-200.
- Harris, J.R., P.K.Knight. P.K. y J.Fanelli. 1996. Fall transplanting improves establishment of balled and burlapped fringe tree (*Chionanthus virginicus* L.) *Hort. Science* 31:1143-1145.
- Heisler, G. 1974. *How Trees Modify Metropolitan Climate and Noise*. Forestry Issues in Urban America: Proceedings. New York City: Society of American Foresters. pp 103-112.
- Howard A.K. 1987. The Revised ASTM Standard on the Description and Identification of Soils (Visual- Manual Procedure). *Geotechnical Testing Journal*. GTJODJ Vol.10. No.4.
- Jackson, M.L. 1975. *Soil chemical analysis- advanced course*. 2nd Edition. Published by author, Madison, Wisconsin. P.29-37, 100-141.
- Kelsey, P. y R. Hootman. 1990. Soil resource evaluation for a group of sidewalk street tree planters. *J. Arboriculture* 16: 113-117.

- Kemper, W.D. y Roseanu, R.C. 1986. Aggregate Stability and size Distribution, pp. 425-442. In Klute , A.(editor). Methods of Soil Analysis, Part 1.2 ed. American Society of Agronomy, USA.
- Kielbaso, J.J. 1990. Trends and issues in city forests. J. Arboriculture. 3: 69-76.
- Kjelgren, R. y J. Clark. 1992. Microclimates and tree growth in three urban spaces. J. Environ. Hort. 10:139-145.
- Kjelgren, R. y J.Clark. 1993. Growth and water relations of *Lyquimdambar styraciflua L.* in an urban park and plaza. Trees. 7:195-201.
- Kjell N. y T. B. Randrup. 1997. XI WORLD FORESTRY CONGRESS Antalya, Turkey, 13 to 22 October. Volumen 1, Topic 3.
- Klute, A. y C. Dirksen. 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. Pp. 687-734. In: Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition).
- Kozlowski, T. 1985. Soil aeration, flooding, and tree growth. J. Arboriculture 3: 161-167.
- Kramer, P.J. 1969. Plant and Soil Water Relationships: A modern Synthesis. New York: McGraw Hill.
- Krizek, D.T. y S.P. Dubik. 1987. Influence of water stresses and restricted root volume on growth and development of urban trees. J. Arboriculture.13: 47-55.
- Lawrence, H.W. 1993. The neoclassical origins of modern urban forests. Forest and Conservation History 37(1):26-36.
- Lindsey, P y N. Bassuk. 1991. Specifying soil volumes to meet the water needs of mature urban trees in containers. J. Arboriculture 17:141-149.
- Lindsey, P. y N. Bassuk. 1998. Redesigning the Urban Forest from the Ground Below: A New Approach to Specifying Adequate Soil Volumes for Street Trees. J. Arboriculture. 24 (3): 121-126.
- Liu, I.W. y L.J.Waldron. 1988. Root growth in coarse-textured soil under controlled confining pressure and matrix potential. Annl. Mtg. SSSA.
- Materechera, S.A., A.R. Dexter, y A.M. Alston. 1991. Penetration of very strong soils by seedlings roots of different plant species. Plant and Soil 135: 31-41.
- Maupin, C. y D.Struve. 1997. Red oak transplanted to different bulk density soils has similar water use characteristics. J. Arboriculture. 23(6):233-237.

- McPherson, E., D. Nowark y R. Rowtree. 1994. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA Forest Service N.E. General Tech. report NE-186.
- Moil, Gary. 1989. The State of Our Urban Forest. *American Forests*. 61-64.
- Moll, G. y C. Kollin. 1993. A new way to see our city forests. *American Forests*. 29-31.
- Morris, L.A. y R.F. Lowery. 1988. Influence of Site Preparation on Soil Conditions Affecting Stand Establishment and Tree Growth. *Southern Journal of Applied Forestry*. 12 (3): 170-178.
- Munsell® Color Charts for Plant Tissues. 1977. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, Baltimore, Maryland.
- Neal, B. y T. Whitlow. 1997. Using Tree Growth Rates to Evaluate Urban Tree Planting Specifications. *J. Environ. Hort.* 15(2):115-118.
- Nelson D. W. y L. E. Sommers. 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter pp.538 – 579. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties- Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition)*.
- Nowak, David J., Joe R. McBride y Russell A. Baetty. 1990. Newly Planted Street Tree Growth and Mortality. *J. Arboriculture* 16:124-129.
- Pan, E. y N. Bassuk. 1985. Effects of soil type and compaction on the growth of *Ailanthus altissima* seedlings. *J. Environ. Hortic.* 3:158-162.
- Patterson, J. 1977. Soil compaction-effects on urban vegetation. *J.Arboriculture* 3:161-167.
- Patterson, J., J. Murray y J. Short. 1980. The Impact of Urban Soils on Vegetation. Proceedings of the third conference of the Metropolitan Tree improvement Alliance (METRIA). 3: 33-56.
- Patterson, J., Ruark, G.A., D.L. Mader, P.L.M. Veneman y T.A. Tattar. 1977. Soil factors related to urban sugar maple decline. *J. Arboriculture*. 9:1-6.
- Perry, T.O. 1982. The ecology of tree roots and the practical significance thereof. *J. Arboriculture* 8: 197- 211.
- Pittenger, D.R. y T. Stamen. 1990. Effectiveness of Methods used to Reduce Harmful Effects of Compacted Soil around Landscape Trees. *J. Arboriculture*. 16(3): 54-57.

- Rolf, K. 1991. Soil Improvement and Increased Growth Response from subsoil cultivation. *J. Arboriculture*. 17(17): 200- 204.
- Ruark, G.A., D.L.Mader, P.L.M.Veneman y T.A. Tattar. 1983. Soil factors related to urban sugar maple decline. *J. Arboriculture*. 9:1-6.
- Sands, R., E.L. Greacen y C.J. Gerard. 1979 Compaction of sandy soils in radiate pine forests. A penetrometer study. *Aust J. Soil Res.* 17:101-113.
- SAS Institute Inc. 2001. SAS System for Windows v.8. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Sims, J.T. 1996. Hydrogen-ion activity. *Method of Soil Analysis. Part 3 Chemical Method-SSSA Book Series no.5.* Segeo R.d., Madison WI, USA. 677p.
- Scott-Russell, R. 1977. *Plant Root Systems: Their Function and Interaction With the Soil.* McGraw-Hill (UK) Limited, London England.
- Sheldrick, B.H. y C. Wang. 1987. Particle Size Distribution. Pp. 500-511 In: *Soil Sampling and Methods Analysis.* M. R. Carter, Ed. Can. Soc. Soil. Sci. Ottawa, Ont.
- Svihra, P., D.W. Burger y R.W. Harris. 1993. Treeshelters for nursery plants can increase growth, be cost effective. *Calif. Agric.* 47(4):13-16.
- Small, C.J. y B.C. McCarthy. 2002. Effects of simulated post-harvest light availability and soil compaction on deciduous forest herbs. *Can. J. For. Res.* 1753-1762.
- Smith, K.D., P.B. May y G. Moore. 2001. The influence of Compaction and Soil Strength on the Establishment of Four Australian Landscape Trees. *J. Arboriculture*. 27(1): 1-7.
- Snider, M.D. y R.F. Miller. 1985. Effects of tractor logging on soils and vegetation in eastern Oregon USA. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* (49): 1280-1282.
- Struve, D.K. y W.T. Rhodus. 1988. *Phenyl idole-3 thiobutyrate increases growth of transplanted 1-0 red oak.* *Can J. For. Res.* 18:131-134.
- Sutton, R.F. y R.W. Tinus. 1983. Root and root system terminology. *Forest Sci. Monograph* 24.
- Wargo, P.M. 1983. Effects and consequences of stress on root physiology. *J. Arboriculture*. 9(7): 173-177.
- Waring, R.H. y W.H. Schlesinger. 1985. *Forest Ecosystems: Concepts and Management.* Academic Press, Inc., Orlando, Fl.
- Watson, G.W. 1988. Organic mulch and grass competition influence tree root development. *J. Arboriculture*. 14:200-203.

- Watson, G.W., E.B. Himelick y E.T. Smiley. 1986. Twig growth of eight species shade trees following transplanting. *J. Arboriculture*. 12:241-245.
- Watson, G.W., S. Clark y K. Johnson. 1990. Formation of girdling roots. *J. Arboriculture*.16:197-202.
- Watson, G.W. y T.D. Sydnor. 1987. The effect of root pruning on the root system of nursery trees. *J. Arboriculture*. 13:126-130.
- White, R.E. 1979. Effects of poor soil aeration on root and microbial activity. Pp 104-106. In introduction to the Principles and Practice of Soil Science. Blackwell Scientific Publication.
- Wieland, W.F. y R.L. Wample. 1985. Rooth growth, water relations and mineral uptake of young Delicious apple trees treated with soil- and stem-applied *paclobutrazol*. *Scientia Horticulture* 26: 129-137.
- Wood, C.B., T.J. Smalley, M.Rieger y D.E. Radcliffe. 1994. Growth and drought tolerance of *Viburnum plicatum* var. *tomentosum* 'Mariesii' in pine bark-amended soil. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*119:687-692.
- Zisa, R.P., H.G. Halverson y B.B. Stout. 1980. Establishment and early growth of conifers on compact soils in urban areas. U.S. Forest Serv. Paper NE-451.

9. APÉNDICES

Apéndice 1. Inflorescencia de Cepillo de botella (*Callistemon citrinus*).



Apéndice 2. Inflorescencia del Saúco amarillo (*Tecoma stans*).



Apéndice 3. Inflorescencia del Roble venezolano (*Tabebuia rosea*)



Apéndice 4. Tiesto construido con tela metálica de 1.27 cm x 2.54 cm, a) altura de 15.2 cm y b) diámetro interno de 15.9 cm.



(a)



(b)

Apéndice 5. Compactación del suelo arcilloso en el campo con un martillo caída libre de 5.5 lbs y una altura de caída libre de 1 pie para obtener una densidad aparente de 1.4 g/cm³.



Apéndice 6. Cepillo de botella sembrado en los dos tipos diferentes de suelo compactado a) una densidad de 1.2 g/cm^3 para el ultisol (arcilloso) y b) 1.1 g/cm^3 para el aluvión (franco arcilloso arenoso).



(a)



(b)

Apéndice 7. Tiesto con a) suelo arcilloso y b) suelo franco arcilloso arenoso, ambos compactado a una densidad de 1.4 g/cm^3 con tela metálica y el tubo de acceso ya colocados.



(a)



(b)

Apéndice 8. Medidor del área foliar



Apéndice 9. Potenciómetro de pH.



Apéndice 10. Procedimiento utilizado para determinar la distribución de tamaño de partículas del suelo.

A. Procedimiento para la remoción de carbonatos y materia orgánica.

1. Pese aproximadamente 40 gramos de suelo. Anote el peso y transfíralos al “beaker” de 1,000 ml.
2. Humedezca el suelo con Acetato de sodio hasta formar una pasta fina. Si la reacción del suelo es violenta espere hasta que ésta disminuya. Siga añadiendo acetato en incrementos de 5 ml hasta que los carbonatos se hayan disuelto completamente.

3. Cuidadosamente añada peróxido de hidrógeno al 30 % y agite la muestra.
4. Espere hasta que la reacción disminuya en intensidad y coloque al “beaker” en el baño de María a 80 °C. Siga añadiendo peróxido de hidrógeno hasta que la materia orgánica se haya destruido en su totalidad. Permita que el volumen del líquido disminuya mediante la evaporación de la muestra, pero no permita que se seque completamente. (Aproximadamente de 2 a 4 horas).
5. Lave el material de suelo de los lados del “beaker”, cúbralo y colóquelo en un lugar seguro.

B. Separación de arena, limo y arcilla

1. Identifique dos tubos de centrifuga de 100 ml, péselos y anote el peso.
2. Transfiera el suelo a uno de los tubos, añada 50 ml de la solución 0.25 M NaCl, centrifugue por 5 minutos y decante el sobrenadante.
3. Use 150 ml de la solución de carbonato de sodio para transferir el suelo del tubo al vaso de la licuadora.
4. Procese la muestra por 15 minutos y transfírala a dos tubos de centrifuga, dividiendo la muestra en dos partes aproximadamente iguales. Use un poco de la solución dispersadora para hacer transferencias cuantitativamente.
5. Llene los tubos hasta dos cm del borde con la solución dispersora, tápelos y mezcle para dispersar uniformemente.
6. Centrifugue a 750 rpm por 3 minutos, deteniendo la centrifuga con el freno para que pare lo más pronto posible.
7. Decante el sobrenadante con las arcillas dispersas en un vaso grande. Repita el paso 5 al 7 hasta que no salga más arcilla.

8. Rotule y pese cuatro tubos de centrífuga de 100 ml y apunte el peso.
9. Mezcle la suspensión de arcillas y transfiera 50 ml a cada uno de dos tubos de centrífuga. Añada 20 ml de la solución 0.0025 M de CaCl_2 y 1 ml de la solución 1 M HCl. Mezcle bien el contenido de los tubos. Centrifugue a alta velocidad (1,500 rpm) y descarte el sobrenadante. Si el sobrenadante está turbio centrifugue por más tiempo y aumente la velocidad.
10. Pese dos gramos de suelo en los otros dos tubos de centrífuga y añada 30 ml de la solución 0.0025 M CaCl_2 .
11. Mezcle bien el contenido de los tubos y centrifugue a alta velocidad (1,500 rpm) por 5 minutos. Decante el sobrenadante. Añada 30 ml adicionales de la solución 0.0025 M CaCl_2 a los cuatro tubos, mezcle bien y centrifugue. Descarte el sobrenadante.
12. Pese y apunte el peso de los cuatro tubos. Ponga los tubos con arcilla y suelo a secar en el horno a 70 °C.
13. Llene los dos tubos originales conteniendo arena y limo hasta la mitad con agua destilada. Disperse el material de suelo utilizando un “Vortex”.
14. Pese un cedazo de malla 300 y apunte.
15. Utilizando agua destilada transfiera el material de suelo a ambos tubos al cedazo, recolectando la suspensión de limo en un vaso grande.
16. Lave cuidadosamente el material de suelo en el cedazo, recolectando la suspensión, hasta que salga casi libre de partículas.
17. Deje sedimentar el limo en el vaso y remueva la solución con un sifón. Seque los limos en el horno a 105 °C por 24 horas.

18. Seque las arenas recolectadas en el cedazo a 105 °C.
19. Pese las arenas y el limo cuando estén secos y calcule la fracción arcillosa basado en el peso original de la muestra.

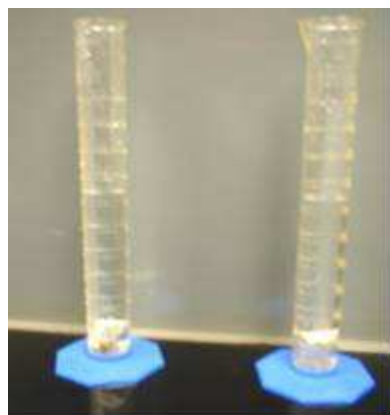
Apéndice 11. Fotos del procedimiento de la determinación de la densidad aparente de un suelo perturbado mediante el método del terrón. a) Muestra de suelo sacado con el barrenador de suelo b) Terrón envuelto con papel de parafina c) Terrón dentro de la probeta d) Terrones listos para llevar al horno para determinar el porcentaje de humedad en el suelo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Apéndice 12. Foto del sistema de agitación con los tamices No.10 y 20 montados.



Apéndice 13. Procedimiento para la determinación de la materia orgánica mediante la oxidación húmeda de Walkey y Black .

1. Pese 0.5 g de suelo seco al horno y póngalo en una matraz Erlenmeyer de 500 ml.
2. Con una pipeta añada 10 ml de una solución 1 N de $K_2Cr_2O_7$ sobre el suelo.
3. Agite suavemente de forma de que el suelo se mezclara bien con el dicromato, tratando de evitar que el suelo se pegara en las paredes.
4. Con una probeta añada rápidamente y con mucho cuidado, H_2SO_4 concentrado al suelo.
5. Agite la mezcla suavemente con movimientos rotativos, evitando que el suelo se adhiera a las paredes del matraz.
6. Luego deje reposar por 30 minutos y añada 200 ml de agua destilada, 10 ml de H_3PO_4 concentrado, 0.2g de NaF y 5 gotas del indicador ferroína.
7. Luego titule con una solución de 0.5N de sulfato amónico ferroso.

8. El indicador irá adquiriendo gradualmente un color verde intenso y cambiará repentinamente a un color terracota.
9. Con el volumen (ml) de sulfato amónico ferroso utilizado, se calculará el porcentaje de carbono orgánico y con este porcentaje se pudo calcular el porcentaje de materia orgánica. Mediante el uso de las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ C.O.} = [\text{meq } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - \text{meq } \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_3 / \text{Peso del suelo en g}] [0.003 \text{g de C/ meq}] * 100$$

$$\% \text{ M.O.} = (\% \text{ C.O.}) * (2.24)$$

Apéndice 14. Procedimiento utilizado para determinar el límite líquido del suelo.

I. Procedimiento

1. Determinar el peso de tres envases de humedad (W_1).
2. Obtén 150 gramos de suelo secado al aire y que haya pasado a través del Tamiz No. 40, en un plato de evaporación. Añada agua y mezcle el suelo uniformemente hasta formar una pasta uniforme con una consistencia de plasticina.
3. Verificar que la altura de caída de la copa del aparato Casagrande sea de 1 cm. Ponga una porción de la pasta dentro de la copa de cobre del aparato “Casagrande” (Apéndice 15). Usando una espátula allane la superficie del suelo en la copa de cobre hasta alcanzar una profundidad máxima de 8 mm.
4. Usando una herramienta de cortadura, haga una canal a lo largo de la línea del centro del suelo en la copa.
5. Rote la manecilla del equipo a una velocidad de 2 revoluciones por segundo. Por este, el casagrande se alzaré y caerá hacia a una distancia vertical de 10 mm para cada revolución. El suelo de los dos lados de la copa comenzarán a fluir hacia el centro. Cuente el número de golpes, N, para que la hendidura en el suelo cierre a una distancia de ½ pulgada. Si el número de golpes fluctúa entre los 25 a 35 golpes, tome una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad. Si el suelo está muy seco, el número de golpes será

mayor de 35. Y si está muy húmedo será menor de 25 golpes. Repita el procedimiento hasta tener 3 lecturas para poder calcular un promedio.

Apéndice 15. Equipo utilizado para determinar el límite líquido del suelo.



Apéndice 16. Procedimiento utilizado para determinar el límite plástico del suelo.

I. Procedimiento

1. Tome aproximadamente 25 gramos de suelo secado al aire libre y pasado por el tamiz No.40.
2. Mezcle el suelo para formar una pasta con consistencia suave.
3. De la mezcla preparada en el paso 2, separe una pequeña cantidad y moldéala sobre la superficie del cristal en forma de hilo. En el proceso de moldeado, utilice la palma de la mano poniendo una leve presión sobre el hilo.
4. Cuando el hilo llegue a un diámetro de 1/8 pulgada, (asumiendo que no se ha roto) divídelo en varias masas esféricas o con forma elipsoidal. Guarde todas las bolas menos una, en un envase cerrado para minimizar la evaporación.
5. Con una de las masas, continúa el proceso de amasado hasta que llegues a un punto en el cual el hilo está justo a romperse cuando alcanza un tamaño de 1/8 pulgada (Apéndice 17). En ese momento se ha llegado al límite plástico. Coja ese material y guárdelo en un envase metálico con tapa. Proceda entonces a coger otra de las muestras y repita el

procedimiento de amasado.

6. Al material que ya se obtuvo el límite plástico, póngalo en el horno para determinar el contenido de humedad.

Apéndice 17. Realización del hilo para determinar el límite plástico del suelo.



II. Ejemplo de cálculos del contenido de humedad

1. Contenido de humedad (W)

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100$$

donde:

W_1 = Peso del envase metálico (g)

W_2 = Peso del envase y suelo húmedo

W_3 = Peso del envase y suelo seco al horno a 105°C por 24 horas.

Apéndice 18. Procedimiento para realizar la prueba de Consolidación.

Procedimiento

1. Se preparó las muestras de suelo que van a ser utilizada en el ensayo. Ambos suelos fueron previamente tamizados en el tamiz no. 4. Luego se humedecieron hasta alcanzar un 20 % de humedad.
2. Se tomó un poco de la muestra de suelo para determinar exactamente el contenido de humedad.
3. Se determinó el peso del anillo de consolidación (W_1).

4. Se colocó la anilla de consolidación encima de un plato redondo de acrílico y se montó dentro de la celda de consolidación para evitar que se rodara la anilla al momento de compactar el suelo.
5. Se añadió suelo y se compactó el suelo dentro de la anilla en tres capas y a cada capa se le añadió 10 golpes con un martillo de goma (Apéndice 19).
6. Luego de compactar, se desmontó el equipo y la muestra de suelo fue reducida hasta la altura de la anilla (Apéndice 20).
7. Se determinó el peso del anillo de consolidación y el suelo (W_2).
8. La anilla con el suelo fue colocada encima de una piedra porosa anteriormente saturada en agua.
9. Se montó el resto del equipo dentro de la anilla de plástico y se colocó la tapa con la piedra porosa (Apéndice 21).
10. Luego el sistema se dejó saturando por 48 horas para evitar la posibilidad de que quedara aire dentro del sistema que pudiera afectar las lecturas del consolidómetro.
11. Se colocó el consolidómetro en el aparato de carga, aplicando una pequeña carga sobre la muestra para contrarrestar cualquier tendencia de expansión que pudiera exhibir el suelo (Apéndice 22).
12. Se unió el reloj para medir la deformación del suelo. El reloj está calibrado para hacer lecturas de 0.0001 in. (0.00254 mm).
13. Después de las 48 horas se le comenzó a aplicar peso al suelo como para obtener una presión inicial de $0.5\text{ton}/\text{ft}^2$. Se tomó lecturas del reloj que mide la deformación a los siguientes tiempos para cada aplicación de carga: 0 min., 0.25 min., 1 min., 2.25 min., 4min., 8 min., 15 min., 30 min., 60 min., 120 min., 240 min., 480 min., 960 min. y 1440 min. (24 hrs.).
14. Se repitió el mismo procedimiento que el paso 13 para el resto de las diferentes presiones.

15. Al finalizar el ensayo se removió la muestra de suelo para determinar el contenido de humedad.

Apéndice 19. Foto a) establecimiento del suelo y b) proceso de compactación del suelo dentro de la anilla en tres capas donde a cada capa se le añadió 10 golpes con un martillo de goma.



(a)

(b)

Apéndice 20. Foto a) Nivelación del suelo con una segueta y b) resultado de la reducción del suelo hasta llevarlo a la altura de la anilla.



(a)

(b)

Apéndice 21. Celda de consolidación



(a)



(b)

Apéndice 22. Consolidómetro tipo Bishop. a) reloj que mide la deformación del suelo y muestra saturándose y en b) brazo mecánico donde se va a colocar la carga para obtener las diferentes presiones.



(a)



(b)

Apéndice 23. Procedimiento utilizado para el análisis de granulometría mediante el método del juego de tamices.

I. Procedimiento

16. Se tomó una muestra representativa de suelo secado al horno (500 gramos, aproximadamente).
17. Se estableció el juego de tamices, previamente pesados y colocados en orden. El tamiz con las aperturas más grandes fue colocado en el tope y el de la apertura más pequeña fue colocado en la base del juego de tamices.

18. Normalmente, los números de tamices utilizados son: No. 4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200.
19. Luego se colocó la muestra de suelo en el tope del juego de los tamices y se tapó para evitar que el suelo se saliera.
20. Luego el juego de tamices se colocó en un agitador de tamices por 15 minutos.
21. Luego se pesó cada tamiz con la cantidad de suelo retenida.
22. Si en el tamiz no. 200 se retuvo una cantidad considerable de la muestra con fracciones de limo y arcilla, debe ser lavado y transferido a un plato de porcelana y secado al horno.
23. Se determinó la cantidad de suelo retenida en cada tamiz por la diferencia del peso de después y antes de tamizar.

II. Ejemplo de cálculos

1. Porcentaje de suelo retenido en cada tamiz.

$$R_n = \frac{\text{Peso Retenido}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

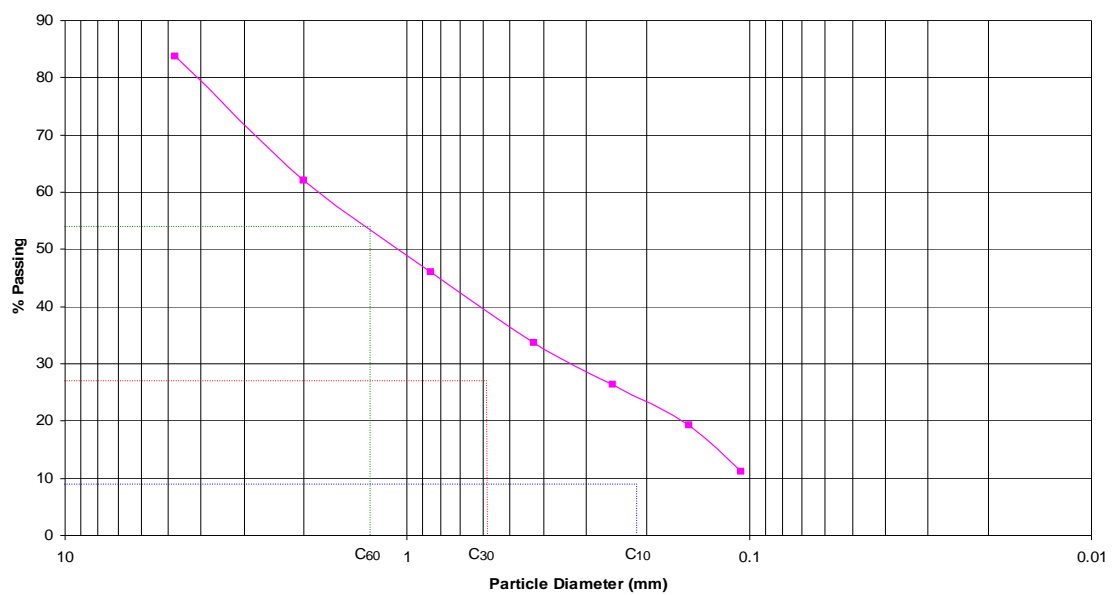
2. Porcentaje acumulativo del suelo retenido en el tamiz.

$$= \sum_{i=1}^{i=n} R_n$$

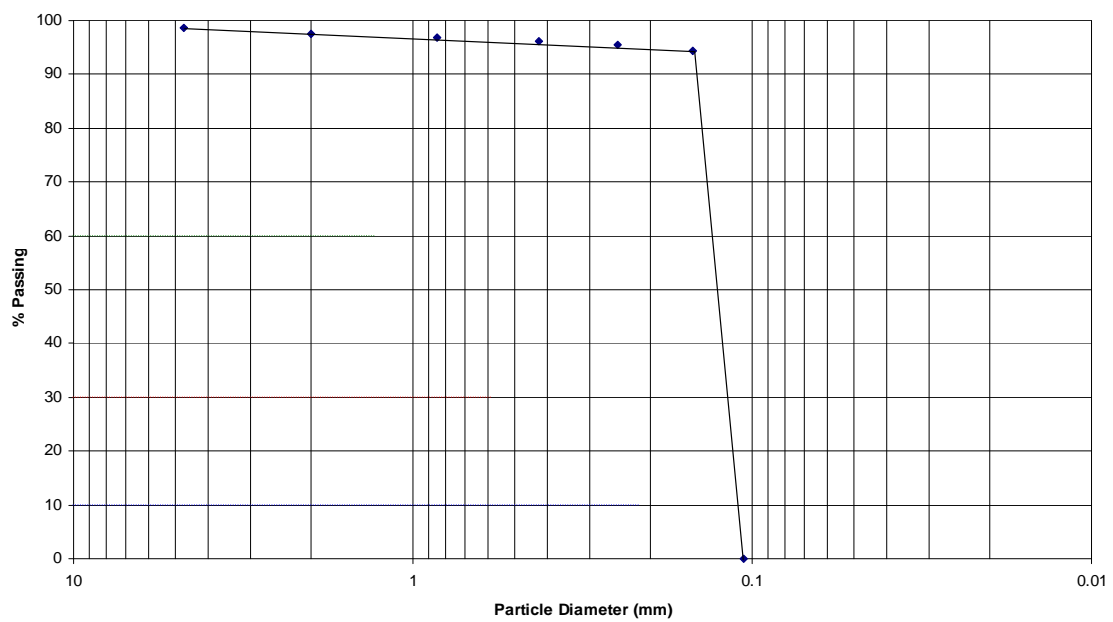
3. Porcentaje acumulativo del suelo que pasa a través del tamiz.

$$\text{Porcentaje de finos} = 100 - \sum_{i=1}^{i=n} R_n$$

Granulometría- Franco Arcillo Arenoso



Granulometría- Arcilloso



Apéndice 24. Procedimiento de la prueba de compactación Proctor estándar.

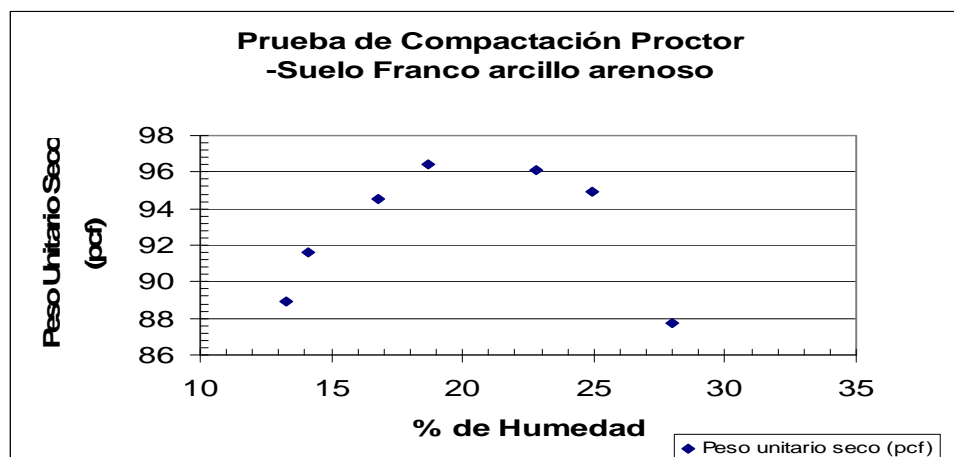
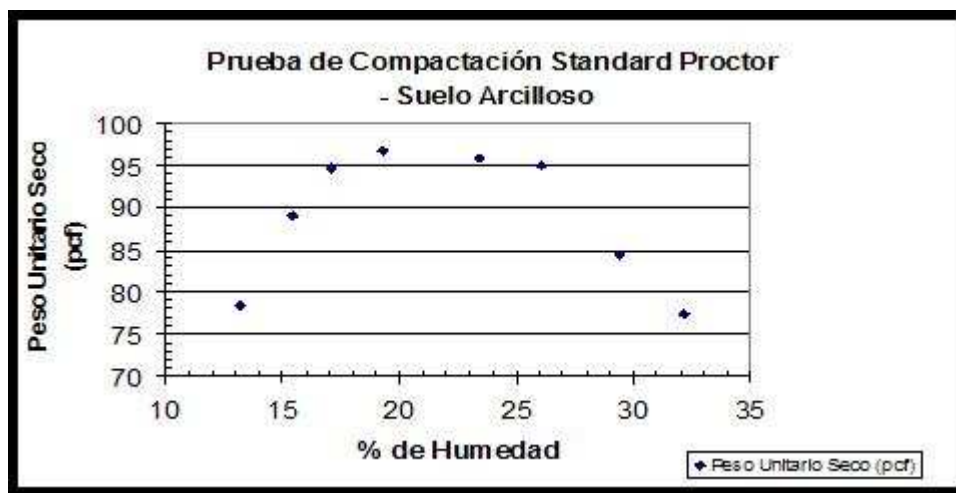
I. Procedimiento

1. Obtenga 6 lbs de suelo secado al aire, que pase por el tamiz No.4 y Colócalas en la bandeja. El contenido de humedad inicial de este material lo denominaremos W_i .
2. Añádale la cantidad de agua indicada en el laboratorio, teniendo el cuidado de mezclarlo con paciencia para que la humedad se distribuya uniformemente en el suelo. Al cabo de la operación el contenido de humedad del suelo habrá incrementado un $(\Delta W = \Delta W_w / W_s)$.
3. Obtenga el peso del molde de compactación y coloque el mismo sobre la base.
4. Vierta el suelo húmedo en el molde de compactación en tres capas de aproximadamente el mismo espesor. Cada capa deberá ser compactada mediante la aplicación de 25 golpes del martillo distribuidos sobre toda el área de la base. Al finalizar de compactar las tres capas, el tope del suelo compactado deberá estar levemente sobre el borde superior del molde de compactación. Este es un aspecto crítico pues si el suelo compactado no rebasa el tope del molde, no tendremos un volumen de suelo compactado que corresponda el volumen del molde.
5. Remueva el collar del molde de compactación y remueva el exceso de suelo compactado. Luego despegue la base del molde. El molde de compactación estará completamente lleno de suelo compactado. Proceda a pesarlo (peso molde + suelo compactado).
6. Remueva el suelo compactado del molde y tome una porción del mismo para determinar su contenido de humedad.
7. Proceda a repetir el paso 2 pero con más cantidad de agua para poder obtener diferentes contenido de humedad y realizar de nuevo la compactación para cada contenido de humedad.
6. Prepare una gráfica de peso unitario seco (γ_d) vs. por ciento de contenido de humedad (w).

II. Cálculos

$$(1) \text{ Peso unitario } \gamma = \frac{(\text{Peso molde} + \text{suelo compactado}) - (\text{peso molde})}{\text{Húmedo} \quad \text{Volumen del molde}}$$

$$(2) \text{ Peso Unitario } \gamma_d = \frac{(\text{Peso unitario húmedo})}{\text{Seco} \quad (1 + w)}$$



Apéndice 25. Procedimiento de la preparación de las laminillas petrográficas

1. Enumere e identifique las muestras.
2. Corte la muestras con un espesor de aproximadamente 1-2 cm y un área de 1"x 1.5".
3. Coloque las muestras dentro de un envase identificado y añada el Epoxy (100 partes de resina en 85 partes de endurecedor, en

- gramos).
4. Añada epoxy sobre la muestra hasta que la cubra por completo y pongala dentro de un sistema de vacío por lo menos de 15 a 30 minutos, para asegurarse que el aire y humedad hayan sido removidas del espacio poroso.
 5. Poner a secar la muestra en el horno por 1-2 horas a 80 °C.
 6. Se seccionó la muestra reduciendo el tamaño del mismo con una lija de corte de diamante.
 7. Limpie la muestra rápidamente con un limpiador ultrasónico, removiendo completamente las partículas sueltas.
 8. En una lija rotatoria, se aplana todas las superficies asperas.
 9. Se monta la muestra alisada en una laminilla con un cemento termo-plástico. Luego de secada la resina, se reduce el espesor de la muestra y se monta en el microscopio.

Apéndice 26. Análisis de varianza para la variable altura de las especies en estudio			
Effecto	Grados de Libertad	F	Pr > F
Especie	2	12.82	<0.0001
Tratamiento	2	1.23	0.3017
Suelo	1	0.31	0.5809
Tiempo	2	8.45	0.0007
Repetición	1	0.06	0.8006
Especie *Trata	4	2.48	0.0570
Especie* Suelo	2	0.35	0.7095
Especie* Tiempo	4	3.91	0.0082 *
Trata*Suelo	2	0.12	0.8865
Trata* Tiempo	4	0.53	0.7135
Especie* Trata* Suelo	3	0.34	0.7947
Especie *Trata* Tiempo	8	0.96	0.4810
Trata * Suelo * Tiempo	6	1.22	0.3115
Especie* Trata* Suelo * Tiempo	10	0.84	0.5943

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 27. Análisis de varianza para la variable número de hojas de las especies en estudio			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr > F
Especie	2	71.35	<0.0001
Tratamiento	2	0.54	0.5850
Suelo	1	13.99	0.0005
Tiempo	2	4.71	0.0138
Repetición	1	0.05	0.8211
Especie *Trata	4	0.55	0.6984
Especie* Suelo	2	11.80	<0.0001*
Especie* Tiempo	4	5.63	0.0009*
Trata*Suelo	2	0.13	0.8776
Trata* Tiempo	4	0.33	0.8530
Especie* Trata* Suelo	3	0.11	0.9519
Especie *Trata* Tiempo	8	0.45	0.8836
Trata * Suelo * Tiempo	6	2.12	0.0687
Especie* Trata* Suelo * Tiempo	10	1.49	0.1751

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 28. Análisis de varianza para las variables peso seco del tallo de las especies en estudio			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr>F
Especie	2	3.62	0.0346
Tratamiento	2	0.07	0.9302
Suelo	1	17.87	0.0001
Tiempo	2	35.04	<0.0001
Repetición	1	0.29	0.5955
Especie *Trata	4	1.58	0.1942
Especie*Suelo	2	0.37	0.6959
Especie*Tiempo	4	0.79	0.5349
Trata*Suelo	2	3.37	0.0428*
Trata*Tiempo	4	0.19	0.9419
Especie*Trata*Suelo	3	0.29	0.8307
Especie*Trata*Tiempo	8	1.13	0.3610
Trata*Suelo*Tiempo	6	2.39	0.0429 *
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	10	0.73	0.6884

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias.

Apéndice 29. Análisis de varianza para la variable peso seco de hojas de las especies en estudio.

Efecto	Grados de Libertad	F	Pr>F
Especie	2	3.44	0.0405
Tratamiento	2	1.68	0.1980
Suelo	1	13.18	0.0007
Tiempo	2	18.29	<0.0001
Repetición	1	0.46	0.5026
Especie*Trata	4	2.01	0.1080
Especie*Suelo	2	0.32	0.7313
Especie*Tiempo	4	7.98	<0.0001*
Trata*Suelo	2	1.63	0.2069
Trata*Tiempo	4	1.95	0.1170
Especie*Trata*Suelo	3	0.46	0.7138
Especie*Trata*Tiempo	8	0.82	0.5929
Trata*Suelo*Tiempo	6	1.73	0.1354
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	10	0.69	0.7255

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 30. Análisis de varianza para la variable peso seco radicular de las especies en estudio

Efecto	Grados de Libertad	F	Pr>F
Especie	2	24.88	< 0.0001
Tratamiento	2	2.87	0.0665
Suelo	1	13.47	0.0006
Tiempo	2	22.96	<0.0001
Repetición	1	0.23	0.9915
Especie*Trata	4	1.06	0.3859
Especie*Suelo	2	0.16	0.8518
Especie*Tiempo	4	0.21	0.9334
Trata*Suelo	2	3.52	0.0378*
Trata*Tiempo	4	0.92	0.4600
Especie*Trata*Suelo	3	0.37	0.7731
Especie*Trata*Tiempo	8	1.28	0.2749
Trata*Suelo*Tiempo	6	2.08	0.0732
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	10	0.23	0.9915

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de media

Apéndice 31. Análisis de varianza para la variable área foliar de las especies de estudio			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr>F
Especie	2	5.33	0.0082
Tratamiento	2	0.03	0.9709
Suelo	1	19.48	<0.0001
Tiempo	2	13.70	<0.0001
Repetición	1	5.19	0.0273
Especie*Trata	4	2.29	0.0734
Especie*Suelo	2	0.34	0.7124
Especie*Tiempo	4	8.92	<0.0001 *
Trata*Suelo	2	3.70	0.0321 *
Trata*Tiempo	4	0.27	0.8964
Especie*Trata*Suelo	3	0.40	0.7542
Especie*Trata*Tiempo	8	0.74	0.6541
Trata*Suelo*Tiempo	6	1.62	0.1632
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	10	0.71	0.7108

* α = de 0.05. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 32. Análisis de varianza para la variable humedad volumétrica de las especies de estudio			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr>F
Especie	2	13.38	< 0.0001
Tratamiento	2	18.78	< 0.0001
Suelo	1	18.14	< 0.0001
Tiempo	2	21.63	< 0.0001
Repetición	1	1.50	0.2268
Especie*Trata	4	24.58	< 0.0001*
Especie*Suelo	2	33.81	< 0.0001*
Especie*Tiempo	4	2.81	0.0345
Trata*Suelo	2	13.39	<0.0001
Trata*Tiempo	4	0.72	0.5797
Especie*Trata*Suelo	4	16.74	< 0.0001*
Especie*Trata*Tiempo	8	1.73	0.1129
Trata*Suelo*Tiempo	6	0.50	0.8067
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	12	1.17	0.3286

* α = 0.05. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 33. Análisis de varianza para la variable reistencia del suelo			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr >F
Especie	2	3.02	0.0571
Tratamiento	2	221.42	< 0.0001
Suelo	1	0.34	0.5606
Tiempo	2	0.68	0.5122
Repetición	1	1.14	0.2904
Especie*Trata	4	3.68	0.0102
Especie*Suelo	2	0.82	0.4475
Especie*Tiempo	4	1.03	0.3987
Trata*Suelo	2	6.38	0.0033
Trata*Tiempo	4	1.09	0.3708
Especie*Trata*Suelo	4	3.01	0.0261
Especie*Trata*Tiempo	8	0.53	0.8301
Trata*Suelo*Tiempo	6	0.50	0.8041
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	12	0.38	0.9660

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias

Apéndice 34. Análisis de varianza para la variable densidad aparente de las especies de estudio mediante el procedimiento del terrón			
Efecto	Grados de Libertad	F	Pr >F
Especie	2	0.64	0.5327
Tratamiento	2	63.58	0.0001
Suelo	1	2.14	0.1492
Tiempo	2	2.13	0.1288
Repetición	1	1.88	0.1759
Especie*Trata	4	1.27	0.2933
Especie*Suelo	2	1.62	0.2071
Especie*Tiempo	4	0.52	0.7198
Trata*Suelo	2	4.85	0.0116
Trata*Tiempo	4	0.74	0.5660
Especie*Trata*Suelo	4	0.82	0.5188
Especie*Trata*Tiempo	8	1.30	0.2658
Trata*Suelo*Tiempo	6	1.10	0.3721
Especie*Trata*Suelo*Tiempo	12	1.05	0.4199

* $\alpha = 0.05$. Estos serán analizados mediante una comparación de medias