

INFLUENCIA DEL SISTEMA RADICAL DE *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.)
Benth. y *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby, EN LA ESTABILIZACIÓN DE
LOS SUELOS Y SU PREVENCIÓN A LOS MOVIMIENTOS MASALES, EN EL
MUNICIPIO DE BOLÍVAR, VALLE DEL CAUCA.

IVÁN DARÍO MELO CUÉLLAR

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
PASTO - COLOMBIA
2007

INFLUENCIA DEL SISTEMA RADICAL DE *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.)
Benth. y *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby, EN LA ESTABILIZACIÓN DE
LOS SUELOS Y SU PREVENCIÓN A LOS MOVIMIENTOS MASALES, EN EL
MUNICIPIO DE BOLÍVAR, VALLE DEL CAUCA.

IVÁN DARÍO MELO CUÉLLAR

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al Título de
INGENIERO AGROFORESTAL

Presidente:

HORACIO RIVERA POSADA, I.A. Ph.D.
Consultor de suelos y control de erosión, Fundación CIPAV

Copresidente:

JESÚS CASTILLO FRANCO, I.A. Ph.D.
Profesor investigador, Universidad de Nariño

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
PASTO - COLOMBIA
2007

Nota de aceptación:

Horacio Rivera Posada, I.A. Ph.D.
Presidente de tesis

Jesús Castillo Franco, I.A. Ph.D.
Copresidente de tesis

William Ballesteros Possú, I.AF. M.Sc.
Delegado asesor

Amanda Silva, I.A. M.Sc.
Jurado

Jorge Vélez Lozano, I.AF. M.Sc.
Jurado

San Juan de Pasto, 6 de Junio de 2007

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor”.

Artículo 1°. Del Acuerdo N° 324 del 11 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Dedico:

*...Al esfuerzo de Maria Luisa,
y porque cada día me demuestra
sú inmenso amor de Madre...*

AGRADECIMIENTOS.

Al colectivo de la Fundación CIPAV, bajo la dirección de Enrique Murgueitio Médico Veterinario Zootecnista; por financiar esta investigación y permitirme crecer profesional y personalmente.

A Juan Armando Sinisterra Reyes, Administrador de Empresas Agropecuarias, investigador y Coordinador de Proyectos de Restauración de Suelos de CIPAV; por abrirme las puertas en la red de restauradores y apoyar todas las etapas de este trabajo.

A Horacio Rivera Posada Ph.D., investigador de CIPAV, por compartir esta idea de investigación y dirigir este estudio.

Al profesor Jesús Castillo Franco Ph.D., por su asesoría en el transcurso de mi formación profesional.

A los docentes Amanda Silva M.Sc., Jorge Vélez Lozano M.Sc. y William Ballesteros M.Sc., jurados de esta investigación, y quienes con sus aportes hicieron de este un mejor trabajo.

A Cesar Cuartas Zootecnista, investigador de CIPAV; por su interés científico y sus valiosas contribuciones.

A Geovany López técnico de CIPAV, por su apoyo profesional y personal.

Al CIAT, en particular a Iddulupatti Rao Ph.D., Jaumer Ricaurte M.Sc. y Ramiro García I.A, del área de Fitonutrición, por compartir parte de su experiencia y conocimiento. A Edgar Amézquita Ph.D., Jesús Galvis M.Sc. y Arnulfo Rodríguez, por su colaboración en el laboratorio de Física de Suelos.

A los docentes Alberto Unigarro M.Sc., Diego Muñoz M.Sc. y Hernando Criollo M.Sc., por la colaboración y asesoría brindada.

Al profesor Phillip Silverstone Ph.D., por su ayuda en la identificación y clasificación taxonómica de las especies vegetales.

A la profesora Luz Amalia Forero M.Sc., por sus contribuciones académicas en la distancia.

A la familia Barbosa propietarios de la Hacienda Guacas, por permitir desarrollar esta investigación en su finca.

A Mariela, Andrés, Ancizar, Gloria y Martha, por soportar conmigo tan agotadoras jornadas de trabajo, sin su apoyo habría sido imposible culminar la fase de campo.

A Laureano, Ángela, Mónica, Andrés, Carmenza y María del CIAT, por su ayuda al medio día.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES	22
2.2 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES	22
2.2.1 Sistemas silvopastoriles	23
2.2.2 Árboles dispersos en potreros	23
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES VEGETALES ESTUDIADAS	24
2.3.1 <i>Acacia pennatula</i> (Schltdl. & Cham.) Benth	24
2.3.2 <i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby	24
2.4 DEGRADACION DEL SUELO	25
2.5 MOVIMIENTO MASAL	25
2.5.1 Factores desencadenantes y condicionantes	27
2.6 RESISTENCIA DEL SUELO A ESFUERZOS DE CORTANTE TANGENCIAL	28
2.6.1 Prueba “in situ” de la resistencia al esfuerzo cortante por medio de la veleta	29
2.7 RAÍCES	29
2.7.1 Comportamiento del sistema radical arbóreo en sistemas agroforestales y Forestales	31
2.7.2 Las raíces como elementos de estabilidad en laderas	32
2.8 EL CONCEPTO DE LA COHESIÓN RADICAL ADICIONAL (ΔC)	35
2.9 RESISTENCIA DEL SISTEMA SUELO-RAÍCES A ESFUERZOS	36

DE CORTANTES TANGENCIAL MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE EN CAMPO	
2.10 RESTAURACION ECOLÓGICA	39
2.10.1 BIOINGENIERÍA COMO HERRAMIENTA DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	39
	9
2.10.2 Desarrollo Histórico de la Bioingeniería	39
3. METODOLOGÍA	43
3.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	43
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.2.1 Fase de campo	45
3.2.2 Distribución de raíces primarias	45
3.2.3 Pruebas de resistencia del suelo al cortante tangencial e influencia de raíces gruesas	46
3.2.4 Propiedades físicas y químicas del suelo	48
3.3 FASE DE LABORATORIO	48
3.3.1 Densidad de longitud de raíces gruesas (DLR)	48
3.3.2 Muestras no disturbadas de suelo	52
3.3.3 Muestras disturbadas	54
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	55
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO	56
4.2 CARACTERIZACIÓN DASOMÉTRICA DE <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna Spectabilis</i>	57
4.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS RAÍCES DE <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna Spectabilis</i>	57

4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS RADICALES DE <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	58
4.4.1 Raíces primarias de <i>Acacia pennatula</i>	58
4.4.2 Raíces primarias de <i>Senna spectabilis</i>	61
4.4.3 Raíz pivotante de los sistemas radicales de <i>Acacia pennatula</i>	61
4.4.4 Raíz pivotante de los sistemas radicales de <i>Senna spectabilis</i>	64
4.4.5 Distribución lateral en raíces de <i>Acacia pennatula</i>	67
4.4.6 Distribución lateral en raíces de <i>Senna spectabilis</i>	66
4.5 INFLUENCIA DE LAS RAICES DE <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i> , EN LA RESISTENCIA AL CORTANTE TANGENCIAL	70
4.5.1 Resistencia al cortante tangencial (RCT) en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	70
4.5.2 Resistencia al cortante tangencial (RCT) en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	74
4.6. COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO LA INFLUENCIA DE <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	80
4.6.1 Densidad aparente	80
4.6.2 Densidad real	81
4.6.3 Porosidad total y distribución del tamaño de poros	83
4.6.4 Humedad volumétrica a 75 cm de succión	88
4.6.5 Humedad volumétrica a 15000 cm de succión	89
4.6.6 Agua aprovechable	91
5. CONCLUSIONES	93
6. RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFIA	95
ANEXOS	102

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Patrones de distribución de raíces en árboles de regiones tropicales	33
Tabla 2. Caracterización química del perfil de suelo, en Bolívar, Valle del Cauca	56
Tabla 3. Características dasométricas evaluadas en <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	57
Tabla 4. Raíces primarias de los sistemas radicales de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	60
Tabla 5. Características de crecimiento de la raíz pivotante en sistemas radicales de <i>Acacia pennatula</i>	62
Tabla 6. Porcentaje de arcillas, limos, arenas y clase textural en la zona de crecimiento de la raíz pivotante en <i>Acacia pennatula</i>	63
Tabla 7. Características de crecimiento de la raíz pivotante en sistemas radicales de <i>Senna spectabilis</i>	64
Tabla 8. Porcentaje de arcillas, limos, arenas y clase textural en la zona de crecimiento de la raíz pivotante en árboles de <i>Senna spectabilis</i>	65
Tabla 9. Diámetro, longitud, y extensión horizontal radical y características de la copa en <i>Acacia pennatula</i>	67
Tabla 10. Diámetro, longitud, y extensión horizontal radical y características de la copa en <i>Senna spectabilis</i>	69
Tabla 11. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 1,7 m de distancia del fuste de <i>Acacia pennatula</i>	72
Tabla 12. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 3,4 m de distancia del fuste de <i>Acacia pennatula</i>	73
Tabla 13. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 5,1 m de distancia del fuste de <i>Acacia pennatula</i>	74
Tabla 14. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 1,7 m de distancia	76

del fuste de *Senna spectabilis*.

Tabla 15. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 3,4 m de distancia del fuste de *Senna spectabilis*. 76

Tabla 16. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 5.1 m de distancia del fuste de *Senna spectabilis*. 77

Tabla 17. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg m^{-3}), densidad real (Mg m^{-3}), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos %, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por profundidad en *Acacia pennatula* 80

Tabla 18. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg m^{-3}), densidad real (Mg m^{-3}), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos %, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por distancias respecto *Acacia pennatula* 81

Tabla 19. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg m^{-3}), densidad real (Mg m^{-3}), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos %, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por profundidad en *Senna spectabilis* 82

Tabla 20. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg m^{-3}), densidad real (Mg m^{-3}), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos %, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por distancias respecto a *Senna spectabilis* 82

Tabla 21. Volumen de agua disponible y lámina de agua a través del perfil de suelo en *Acacia pennatula* 91

Tabla 22. Volumen de agua disponible y lámina de agua a través del perfil de suelo en *Senna spectabilis* 92

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Porcentaje de suelos degradados en Colombia	27
Figura 2. Localización de la zona de estudio	44
Figura 3. Secuencia de metodología empleada para conocer la distribución de raíces primarias en <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	47
Figura 4. Distribución de puntos de muestreo para evaluar la influencia de raíces en la resistencia al cortante tangencial en <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	49
Figura 5. Secuencia metodológica para la toma de muestras de suelo-raíz en <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	50
Figura 6. Separación de raíces gruesas de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	51
Figura 7. Selección de raíces gruesas y digitalización de muestras de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	53
Figura 8. Sistemas radicales de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	59
Figura 9. Raíz pivotante en árboles de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	62
Figura 10. Raíz lateral de <i>Acacia pennatula</i>	68
Figura 11. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la profundidad, en el área de influencia de <i>Acacia pennatula</i>	71
Figura 12. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la distancia de <i>Acacia pennatula</i>	71
Figura 13. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la profundidad, en el área de influencia de <i>Senna spectabilis</i>	74
Figura 14. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la distancia de <i>Senna spectabilis</i>	75
Figura 15. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad aparente y la profundidad del suelo en <i>A. pennatula</i> .	81

Figura 16. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad real y la profundidad del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	82
Figura 17. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad real y la profundidad del suelo en <i>Senna spectabilis</i>	83
Figura 18. Perfil comparativo del comportamiento de la porosidad total y distribución del tamaño de poros promedio del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	85
Figura 19. Regresión polinomial del comportamiento de los microporos y la profundidad del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	86
Figura 20. Perfil comparativo del comportamiento de la porosidad total y distribución del tamaño de poros promedio del suelo en <i>Senna spectabilis</i>	88
Figura 21. Regresión logarítmica de la humedad a capacidad de campo y la profundidad a través del perfil del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	89
Figura 22. Regresión polinomial de la humedad a capacidad de campo y distancia respecto a <i>Senna spectabilis</i>	89
Figura 23. Regresión lineal de la humedad a punto de marchitez permanente y la profundidad a través del perfil del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	90
Figura 24. Regresión polinomial de la humedad a punto de marchitez permanente y la distancia respecto a <i>Senna spectabilis</i>	90
Figura 25. Regresión lineal de la lamina de agua a través del perfil del suelo en <i>Acacia pennatula</i>	92

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Reconversión productiva y Restauración Ecológica, en fincas aledañas al Embalse BRUT, en el marco del Convenio 012 entre CVC y CIPAV, en Bolívar, Valle del Cauca	102
Anexo B. Digitalización de muestras de raíces y análisis de imágenes con el software WinRHIZO Pro®	103
Anexo C. Representación gráfica de longitud y extensión horizontal radical	104
Anexo D. Análisis de varianza para la resistencia al cortante tangencial, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	105
Anexo E. Análisis de varianza para la resistencia al cortante tangencial, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	106
Anexo F. Mediciones de la Resistencia al Cortante Tangencial (RCT) en <i>Acacia pennatula</i> y <i>Senna spectabilis</i>	107
Anexo G. Análisis de varianza para densidad aparente, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	108
Anexo H. Análisis de varianza para densidad aparente, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	109
Anexo I. Análisis de varianza para densidad real, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	110
Anexo J. Análisis de varianza para densidad real, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	111
Anexo K. Análisis de varianza para porosidad total, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	112
Anexo L. Análisis de varianza para macroporos, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	113
Anexo M. Análisis de varianza para mesoporos, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	114
Anexo N. Análisis de varianza para microporos, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	115

Anexo O. Análisis de varianza para porosidad total, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	116
Anexo P. Análisis de varianza para Macroporos, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	117
Anexo Q. Análisis de varianza para mesoporos, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	118
Anexo R. Análisis de varianza para microporos, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	119
Anexo S. Análisis de varianza para humedad a capacidad de campo, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	120
Anexo T. Análisis de varianza para humedad a capacidad de campo, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	121
Anexo U. Análisis de varianza para la humedad a punto de marchitez permanente, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	122
Anexo V. Análisis de varianza para humedad a punto de marchitez permanente, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	123
Anexo W. Análisis de varianza para lámina de agua, en el suelo de <i>Acacia pennatula</i>	124
Anexo X. Análisis de varianza para lámina de agua, en el suelo de <i>Senna spectabilis</i>	125

GLOSARIO

BIOINGENIERIA: se refiere a la prevención y control de la erosión, mediante la construcción de estructuras vivas, usando diferentes partes de las plantas, tales como: raíces y tallos principalmente. Estas estructuras, se convierten en refuerzo mecánico, drenaje hidráulico y barrera natural para contener la erosión y los movimientos masales.

DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES GRUESAS: relación entre la longitud radical y el volumen de suelo muestreado, expresa el largo total en cm de todas las raíces ≥ 2 mm de diámetro por cm^3 de suelo.

EROSIÓN: proceso superficial de separación, transporte y depósito de los materiales del suelo por los agentes causantes, tales como la lluvia, el viento y el hombre.

EXTENSIÓN HORIZONTAL RADICAL: distancia entre el fuste del árbol y el ápice de las raíces laterales, expresada en metros.

LADERA: cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hallan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, en forma natural.

LONGITUD RADICAL: longitud real que tendría la raíz si esta pudiera ser extendida, esta se obtiene siguiendo el recorrido real de la raíz con una cinta métrica flexible.

MOVIMIENTO MASAL: desplazamientos de masas de suelo o roca, causados por exceso de agua en el terreno y por efecto de la fuerza de gravedad, en ocasiones asociados al uso y manejo inadecuado del suelo

PENDIENTE: declive en la superficie de la tierra normalmente expresado en porcentaje de inclinación.

RAÍCES: órgano subterráneo de las plantas encargado de múltiples funciones, como adquisición de diferentes elementos y agua, anclaje, transporte, almacenaje y como material de intercambio con micorrizas y otros microorganismos del suelo.

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA: proceso de renovar y mantener la salud de un ecosistema. Ésta trata de controlar la dirección y la velocidad de la sucesión en un área degradada, con el fin de recuperar, hasta donde sea posible, un ecosistema similar al original.

RESUMEN

Se estudio la distribución de raíces para *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth. y *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby y su efecto en la resistencia al cortante tangencial (RCT), en un sistema silvopastoril de la cordillera occidental de Colombia (4° 20' 8.7" N y 76° 14' 22.7" O), en condiciones de Bosque seco tropical (bs-T). Las raíces primarias se excavaron en seco siguiendo la trayectoria de dos raíces laterales y la raíz pivotante. Se determinó la textura en el suelo adyacente a la raíz pivotante, los resultados sugieren que contenidos altos de arcillas limitan el crecimiento radical. Se determino el efecto de las raíces gruesas en la RCT a través de un muestreo sistemático en 45 sitios por árbol, a tres distancias del fuste (1,7; 3,4 y 5,1 m) a cinco profundidades (0–25, 25–50, 50–75, 75–100 y 100–25 cm) y en tres direcciones. Se hicieron pruebas en condiciones de campo con un equipo de torsión con cuchillas, en el área cercana a los árboles y en un sitio libre de raíces (testigo). Se tomaron muestras de suelo-raíz, para conocer la densidad de longitud de raíces gruesas (DLR) se utilizó un “scanner” EPSON-Expresión 1680 y el Software WinRHIZO Pro®. En cada sitio de medición, se colectó una muestra de suelo sin disturbar para determinar algunas propiedades físicas.

Los árboles de *A. pennatula* y *S. spectabilis* presentaron en promedio diez y siete raíces primarias, con profundidad máxima de enraizamiento entre 0,93 a 3,74 m y 0,66 a 1,98 m y extensión horizontal radical de 14,1 y 18,1 m, respectivamente. Los valores mas altos de la RCT en *A. pennatula*, se encontraron a 5,1 m de distancia del fuste para las profundidades de 0–25 cm (125,9 kPa), 25–50 cm (94,5 kPa) y 100–125 cm (138,1 kPa), con un incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión que fluctuó entre 6,6 y 37,6 kPa y DLR de 0,005 y 0,002 para las dos primeras profundidades. En *S. spectabilis* los valores mas altos de la RCT se encontraron a 5,1 m de distancia del fuste (79,3, 106,9, 118,4, 140 y 140 kPa) para las cinco profundidades estudiadas, con un incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión que fluctuó entre 9 y 45,4 kPa con DLR de 0,004 y 0,001, para la segunda y tercera profundidad. Los valores más bajos de la resistencia al cortante, correspondieron al testigo libre de raíces (Más del 90%). Sin embargo, no se encontró regresiones significativas ($R^2 > 0,7$) que explicaran el comportamiento de la RCT. Estos resultados al parecer se explican por la heterogeneidad en las características del suelo, además indican que el efecto de estabilidad mecánica suministrado por las raíces, varía alrededor del área de influencia del árbol, aunque su evaluación se efectúe a distancias iguales respecto al tallo. El incremento de la resistencia al cortante en el área de influencia de los árboles investigados, resalta la importancia en la implementación de Sistemas Agroforestales en zonas de ladera susceptibles a los movimientos masales. Además, la irregularidad en el crecimiento radical demuestra que para procesos de “Restauración Ecológica” en suelos degradados con tratamientos de “Bioingeniería”, es necesario contar con un conjunto poblacional, para que mediante el entrecruce de raíces el refuerzo mecánico y los procesos hidrológicos se realicen en profundidades y áreas diferentes.

Palabras claves: bioingeniería, estabilización de suelos, movimientos masales, raíces, restauración ecológica, suelos de ladera.

ABSTRACT

The *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth. and *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby root distribution were studied and their effect in the courting tangencial resistance (ICR), in a silvopastoral system, located in the western chain mountain of Colombia ($4^{\circ} 20' 8.7''$ N y $76^{\circ} 14' 22.7''$ W) in conditions of Tropical dry forest (bs-T). The primary roots were digged in dry enviroment following the trajectory by two lateral roots and the taproot. The texture in the adjacent ground to the taproot was determined; the results suggest high quantity of clays limiting the radical growth. The sampling to determine the effect by the thick roots in the ICR, consisted in the 45 systematic points distributed per tree, to three distances of stem (1,7, 3,4 y 5,1 m) to five depths (0–25, 25–50, 50–75, 75–100 y 100–25 cm) and in three directions. In field were made different proof using the torsion blades equipment in the near the trees and in a free site by roots (control test). Were taken root-soils, to know the length root thick density (LRD), the scanner EPSON-Expression 1680 and Software WinRHIZO Pro® were used. In each point test, a ground without disturb sample was collected to determine somethings physical properties.

The trees of *A. pennatula* and *S. spectabilis* presented in average ten and seven roots primary with depth of rooting between 0,93 to 3,74 m and 0,66 to 1,98 m and radical horizontal extension of 14,1 and 18,1 m, respectively. The high values but of the ICR in *A. pennatula*, was found to 5,1 m of distance of the stem for the depths of 0–25 cm (125,9 kPa), 25–50 cm (94,5 kPa) and 100–125 cm (138,1 kPa), with an increase of the resistance to the courting in terms of cohesion that fluctuated between 6,6 and 37, 6 kPa and LRD of 0,005 and 0,002 for the two first depths. In *S. spectabilis* high values was found but of the IRC were to 5,1 m of distance of stem (79,3, 106,9, 118,4, 140 y 140 kPa) for the five studied depths, with an increase if the resistance to the courting in terms of cohesion that fluctuated between 9 and 45,4 kPa with LRD of 0,004 and 0,001, for the second and third depth. The lowest values of the resistance to the courting, they correspond to the control test (More of 90 %). Nevertheless, not significant regressions was found ($R > 0,7$) that explained the behavior of the IRC. These results apparently are explained by the heterogeneity in the characteristics of the soil, in addition, indicates that the effect of mechanical stability provided by the roots, varies around the area of influence of the tree, although its evaluation takes place to equal distances with respect to the stem. The increase of the resistance to the court in the area of influenced of the investigated trees, emphasizes the importance in the implementation of agroforestry systems in susceptible zones of hillslope to the landslides. In addition, the irregularity in the radical growth indicates that for processes of ecological restoration in degraded soil with bioengineering treatments, it is necessary to count on a population set, so that by means of in intercrosses by roots the mechanical reinforcement and the hydrologic processes are made in depths and different areas.

Keywords: root, stability hillslope, erosion, bioengineering, ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos masales se han constituido en uno de los fenómenos naturales más destructivos que afectan a las poblaciones humanas alrededor del mundo, ocasionando grandes catástrofes, víctimas humanas y pérdidas por miles de millones de dólares cada año, tanto en zonas urbanas como rurales. Según Gray y Sotir¹, se estima que las pérdidas económicas, constituyen una cuarta parte de los egresos totales ocasionadas por desastres naturales, debido a que producen grandes daños a instalaciones, propiedades y vías de transporte y se pierden áreas extensas de suelos agrícolas y forestales.

En Colombia, Ojeda et al², afirman que los movimientos masales son una de las causas más frecuentes de desastres naturales, afectando continuamente poblaciones, vías, acueductos, oleoductos y otras importantes obras de infraestructura. A pesar del esfuerzo de algunas entidades por registrar los efectos más notables de estos fenómenos, los costos de los daños ocasionados por su ocurrencia sólo se han evaluado de forma parcial en algunos casos, pero en la mayoría de ellos se desconocen los valores reales. Sin embargo, la frecuencia de los fenómenos que se registran anualmente y la propia experiencia del INGEOMINAS con sus estudios y atenciones de emergencia, permiten suponer que esos costos representan una parte considerable del producto interno bruto del país.

Son numerosos los problemas de movimientos masales en la región andina y en la mayoría de las zonas montañosas del departamento del Valle del Cauca, siendo la región norte una de las más afectadas por estos procesos degradativos. Según Rivera y Sinisterra³ la causa principal para que se activen los movimientos masales en estas regiones, se fundamenta en el uso y manejo insostenible del suelo, sumado a la falta de prácticas preventivas de conservación y a la susceptibilidad natural que presentan estos territorios, por el material parental de esquistos muy meteorizados, pendientes fuertes y de longitudes largas y lluvias de intensidad alta. Estos procesos degradativos generan pobreza en las comunidades rurales

¹GRAY, D. H. and SOTIR, R. B. Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, A practical guide for erosion control. Nueva York: John Wiley and Sons, 1996. p. 18.

²OJEDA, J.; CASTRO, E.; VALENCIA, A. y FONSECA, S. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía Metodológica. Bogotá: INGEOMINAS-CVC-Escuela Colombiana de Ingeniería, 2001. p. 6.

³RIVERA P., J. H. y SINISTERRA R., J. A. Restauración social de suelos degradados por erosión y remociones masales en laderas andinas del Valle del Cauca Colombia con la utilización de obras de Bioingeniería. En: CONGRESO NACIONAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS. (5o.: 2005: Cali). Ponencia en Disco Compacto. 35 p.

y llevan al campesino, a emigrar a zonas generalmente vulnerables, donde los movimientos masales y la erosión severa son causales de grandes catástrofes.

Bajo este contexto, el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), en alianza con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), vienen trabajando en la recuperación de áreas degradadas por erosión severa y movimientos masales, en regiones montañosas del Valle del Cauca. Realizando inicialmente, un diagnóstico participativo integral de los problemas degradativos y planteando alternativas de restauración, entre los que se incluye la implementación de controles biomecánicos (Bioingeniería), el establecimiento de sistemas sostenibles de producción agropecuaria (Sistemas Agroforestales) y la promoción de prácticas culturales de manejo, a fin de favorecer la recuperación de los suelos y la vegetación.

Según Suárez⁴, el uso de la Bioingeniería, parte básicamente del efecto positivo que ejercen los sistemas radicales sobre el comportamiento mecánico del suelo y otros efectos hidrológicos de la vegetación arbórea como la interceptación de la lluvia, la retención y acumulación de agua, el goteo o flujo por el follaje y la evapotranspiración. De acuerdo a Krogstad⁵, a nivel mundial el efecto protector de la vegetación maderable en la estabilidad de los suelos a los movimientos masales, es un tema debatido y estudiado en los últimos años y ha ganado un reconocimiento considerable, especialmente en el reforzamiento dado por las raíces de los árboles en la resistencia a la ruptura del suelo. Sin embargo, existe en profesionales y comunidad en general del país, concepciones equivocadas sobre el valor verdadero de la vegetación en la estabilidad de los suelos en zonas de ladera. Al respecto Suárez⁶ plantea, que el efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes deja inquietudes y su cuantificación no ha tenido una explicación universalmente aceptada.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estudió el aporte del sistema radical de algunas especies arbóreas, en el refuerzo mecánico al suelo para contrarrestar los problemas de degradación de los suelos por movimientos masales. Evaluando específicamente algunas características radicales y dasométricas y el efecto de las raíces gruesas de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis* en la resistencia del suelo al cortante tangencial.

⁴SUAREZ, J. Deslizamiento y estabilización de laderas en zonas tropicales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998. p. 277-280

⁵KROGSTAD, F. A. Physiology and ecology based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes. Washington, 1995., 45 p. Thesis (Master of Science) [on line]. University of Washington. Available from internet
<URL<<http://www.students.washington.edu/fkrogstad/decision/roots/rootstab.pdf>

⁶SUÁREZ, Op. cit., p. 275.

Contribuyendo al conocimiento científico, que permita explicar y sustentar la utilización de la vegetación, como un método técnico, ecológico y socialmente aceptable, para la reconversión de áreas degradadas por erosión severa en el país. Favoreciendo de esta manera la conservación de los recursos naturales, a partir de un manejo más integral y sustentable, mediante la utilización de herramientas de Restauración Ecológica como la Bioingeniería y la adopción de Sistemas Agroforestales como alternativas rentables y con beneficios ecológicos múltiples para los agricultores del país.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SISTEMAS AGROFORESTALES

Verchot et al define a los Sistemas Agroforestales, “como aquellas técnicas que incorporan un componente arbóreo en el sistema de producción. Se incluyen sistemas basados en el árbol y aquellos que combinan árboles con cultivos o ganado”⁷. Budowsky⁸ manifiesta que la Agroforestería se caracteriza por ser un sistema sustentable e interactivo y una opción económica accesible al campesino, es una disciplina relativamente nueva, sin embargo durante mucho tiempo se ha practicado por los campesinos en muchas modalidades agroforestales.

2.2 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES

De acuerdo a Montagnini et al⁹ los Sistemas Agroforestales se han clasificado de diferentes maneras: según la estructura, el diseño a través del tiempo, la importancia relativa y la función de los diferentes componentes, los objetivos de producción y las características sociales y económicas vigentes. Montagnini et al, categoriza a los Sistemas Agroforestales, en dos tipos:

- Sistemas agroforestales simultáneos: consisten en la asociación simultánea y continua de cultivos anuales o perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple, y/o ganadería. Estos sistemas incluyen asociaciones de árboles con cultivos anuales o perennes, huertos caseros mixtos y sistemas silvopastoriles.
- Sistemas agroforestales secuenciales: para este tipo de asociación, los componentes presentan una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos, es decir que los cultivos anuales y las plantaciones de árboles cumplen un ciclo en el

⁷VERCHOT, L. et al. Soil-Atmosphere Gas Exchange in Tropical Agriculture: Contributions to Climate Change. En: VAN NOORDWIJK, M.; CADISCH, G. and ONG, C. K. Bellow-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Nairobi: CAB International, 2004. p. 221.

⁸BUDOWSKY, G. Agroforestería una disciplina basada en el conocimiento tradicional. En: Revista Forestal Centroamericana. Turrialba: CATIE, 1993. p. 14.

⁹MONTAGNINI, F et al. Sistemas Agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos. 2a. Edición, San José de Costa Rica: Organización de Estudios Tropicales, 1992. p. 59.

tiempo. En esta clasificación se incluyen los sistemas taungya y la agricultura migratoria con intervención o manejo de barbechos¹⁰.

2.2.1 Sistemas silvopastoriles. Pezo e Ibrahim¹¹ manifiestan que los sistemas silvopastoriles son una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de las leñosas perennes (árboles, arbustos), e interactúan con los componentes tradicionales (forrajeras, herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral. De acuerdo a Russo y Botero¹², estas combinaciones pueden ser simultáneas o secuenciales, en un mismo sitio y tienen como objetivo optimizar la producción del sistema y procurar un rendimiento sostenido.

2.2.2 Árboles dispersos en potreros. El sistema silvopastoril de árboles dispersos en potreros puede ocurrir en forma natural como el resultado de procesos de sucesión vegetal tendientes a una flora que busca su equilibrio dinámico. Según, Pezo e Ibrahim¹³, también pueden ser el resultado de la intervención del hombre, a través del manejo selectivo de árboles y arbustos remanentes después de que el bosque fue transformado en pasturas o a través, de la introducción de árboles en praderas ya existentes. En estos casos las densidades y arreglos espaciales pueden ser regulados por el hombre, lo que significa que pueden mejorar las interacciones.

Al respecto Murgueitio e Ibrahim¹⁴ manifiestan que los sistemas silvopastoriles han probado ser una opción que brinda ventajas cuando se introducen en los sistemas ganaderos en diferentes pisos altitudinales, al mejorar las condiciones del suelo, las pasturas, el ganado y el entorno en general. Entre otros beneficios se obtiene producción de biomasa forrajera disponible por unidad de área, mejor y mayor ciclaje de elementos, se disminuye el requerimiento de fertilizantes para las gramíneas, se propicia un microclima benéfico porque el ganado dispone de un hábitat donde se desarrolla o produce mejor, al defenderse del exceso de calor o la lluvia. También se favorece la recuperación de la

¹⁰Ibid., p. 60-61.

¹¹PEZO, D. e IBRAHIM, M. Sistemas Silvopastoriles. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 1999 p. 4.

¹²RUSSO, R. y BOTERO, R. El componente arbóreo como recurso forrajero en los sistemas silvopastoriles. [en línea]. Escuela de agricultura de la región Tropical Húmeda EARTH San José, Costa Rica. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo1.htm>

¹³PEZO e IBRAHIM, Op. cit., p. 4.

¹⁴MURGUEITIO, E. e IBRAHIM, M. Agroforestería pecuaria para la reconversión de la ganadería en Latinoamérica. [en línea]. En: Livestock Research for Rural Development. Cali. Vol. 13, no. 3 (2001). Disponible en Internet: <http://www.cipav.org.co/Irrd/Irrd/13/3/murg133.htm>

entomofauna y la avifauna local y migratoria, se obtiene madera y frutos para diferentes usos en el mediano y largo plazo.

Galindo et al¹⁵, manifiesta, que gran parte de las fincas ganaderas presentan árboles dispersos en potreros para proveer sombra y alimentos a los animales y generar ingresos a partir de la venta de madera y frutales. En la región del Caribe de Colombia y Venezuela y valles de interior de varios países suramericanos son comunes todavía en sistemas ganaderos, encontrar grandes árboles de la selva original como la ceiba *Ceiba pentandra* y frutales tropicales naturalizados como el mango *Manguifera indica* que ofrecen beneficios múltiples.

En zonas de ladera reporta Calle et al¹⁶, los árboles asociados a las praderas ganaderas, ejercen un efecto protector adicional al retener el suelo en las pendientes. La variedad de especies arbóreas es importante porque se requieren raíces de diferentes profundidades para retener el suelo en forma efectiva, particularmente durante los aguaceros torrenciales.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES VEGETALES ESTUDIADAS

2.3.1 *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth. (FAMILIA: Fabaceae Subfamilia: Mimosoideae) Nombre común: trapichero. De acuerdo a Silverstone* es un árbol de 8 - 12 m de altura, DAP 30 cm; espinas estipulares presentes; hojas alternas, bipinnadas, pecíolos de 0,5 a 12 cm de largo, una glándula sobre la superficie adaxial; lámina de 3,8 – 14,5 cm de largo, 1,5 – 4,5 cm de ancho, pinnas 10 - 24, hasta 2,5 cm de largo, pínulas hasta 44 por pinna, hasta 2,8 mm de largo, venas secundarias no visibles en envés, cistolitos blancos abundantes visibles en envés, glabras excepto ciliadas en borde de la base. Pecíolo, raquis, y raquillas vilosos con tricomas blancos; inflorescencia en capítulo; corola amarilla; estambres más de 15, filamentos libres; fruto submaduro verde, hasta 9,5 cm de largo por 1,7 cm de ancho, ligeramente encorvado, comprimido, coriáceo, abriéndose tardíamente.

2.3.2 *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby (Familia: Fabaceae Subfamilia: Caesalpinoideae) Nombre común: vainillo. Según Tokura et al¹⁷ es un árbol de 8-12 m de

¹⁵GALINDO, W. et al. Manejo Sostenible de los Sistemas Ganaderos Andinos. Cali: CIPAV, 2003, p. 30-34.

¹⁶CALLE, Z; MURGUEITIO, E. y CALLE, N. Enfoques silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas. Ganadería Productiva y Sostenible. Cali: CIPAV, 2001, p. 25.

*ENTREVISTA con Phillip Silverstone, Director del Herbario CUVIC del Departamento de Biología de la Universidad del Valle, Cali, 15 de Febrero de 2007.

¹⁷TOKURA, Y.; RONDÓN, M.; VILLANUEVA, G. y BOTERO, L. Árboles nativos del Valle del Cauca. Cali: Lerner, 1996. p. 297

altura, copa aparasolada, follaje fino, verde claro, bien ramificado. Hojas compuestas alternas, paripinnadas de 26 – 30 folíolos, de aproximadamente 40 cm de largo, pecíolos de 2 a 3 cm acanalado igual que el raquis con un pubérulo amarillo por el haz, peciólulos de 2 a 3 cm y laminas lanceoladas, de 8 cm de largo por 2 a 3 cm de ancho, nervaduras amarillas por el haz y el envés blanquecino. Inflorescencias terminales en racimos de flores amarillas, con estambres de tecas amarillas. Fruto en forma de legumbre cilíndrica de 27 cm de longitud, con semillas redondas y aplanadas.

2.4 DEGRADACION DEL SUELO

Según Lal¹⁸, la degradación de los recursos suelo y agua y la contaminación ambiental, son percibidos como los mayores problemas en los trópicos. Áreas extensas de tierra, están sometidas a la degradación en forma irreversible, procesos degradativos como la erosión acelerada y la desertificación, compactación y endurecimiento, acidificación, disminución en el contenido de materia orgánica, disminución de la biodiversidad y agotamiento de la fertilidad natural del suelo. El área degradada en el trópico por diferentes procesos se estima en 915×10^6 de hectáreas por erosión hídrica, 474×10^6 de hectáreas, como erosión por el viento, 50×10^6 de hectáreas, por degradación física, y 213×10^6 de hectáreas, por degradación química.

Oldeman et al¹⁹ reporta que uno de los problemas graves de degradación que enfrenta la sociedad moderna a nivel global, es la pérdida de suelo por erosión hídrica; en Colombia, Mendivelso et al²⁰, señalan que el 83 % de la zona andina posee algún grado de erosión, manifestándose de esta manera la grave situación que al respecto se vive en el país. Según la FAO²¹, el proceso continúa y el principal problema que confronta a la comunidad

¹⁸LAL, R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Services USDA Soil Conservation Service and U.S. Agency for International Development. SMSS Technical Monograph no. 21. 1994. 78 p.

¹⁹OLDEMAN, L. R.; VAN ENGELN, V. W .P. and PULLES, J .H. M, The extent of human-induce soil degradation, citado por CASTILLO, J. A. Variación de la erodabilidad y aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en los andes Colombianos. Palmira, 2004., p. 1. Trabajo de grado (Doctor en Ciencias Agropecuarias). Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Postgrados.

²⁰MENDIVELSO, D.; RUBIANO, Y.; MALAGÓN, C. D. y LÓPEZ, L. D. Erosión de las tierras colombianas. En: CONGRESO COLOMBIANO DE LA CIENCIA DEL SUELO. (9o.: 1998: Paipa) Conferencias Magistrales IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: SCSC. P. 41–49.

²¹ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Mantengamos viva la tierra: Causas y Remedios de la Erosión del Suelo. En: Boletín de Suelo de la FAO. Roma, (1983); p. 50.

científica de suelos a nivel mundial, es el de encontrar prácticas que controlen o reduzcan la degradación de los suelos.

2.5 MOVIMIENTO MASAL

Gray y Sotir²² indican que los movimientos en masa son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior a la original sin que medie ostensiblemente medio de transporte alguno, siendo tan solo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras. Este tipo de procesos gravitatorios se interrelacionan mutuamente con las precipitaciones altas, de tal forma que frecuentemente las lluvias torrenciales son causantes y/o precursoras de los movimientos en masa, ya que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo al deslizamiento

En el Reino Unido reporta Bransby et al²³, solamente la reparación de daños causados por deslizamientos en la red vial representa de 40 a 50 millones de Euros por año. La OEA²⁴ manifiesta, que en Suramérica, entre 1960 y 1993 los movimientos masales dejaron 6.084 víctimas humanas, 4.117 damnificados y alrededor de siete millones de dólares en pérdidas económicas y se clasificaron como uno de los cinco fenómenos naturales más destructivos y que más pérdidas económicas y número de muertes causan al año.

En Colombia, de acuerdo al IDEAM²⁵ en el período invernal comprendido entre 1999 y 2000 los movimientos en masa ocasionaron daños en 24 departamentos y 301 municipios del país, provocando 296 muertos y 86.195 damnificados; averiando 4.870 edificaciones, 73 puentes y 46 centros educativos, y aceleraron la degradación de extensas áreas con actividades agropecuarias, de esparcimiento y áreas de interés ambiental. La anterior fuente, registra la existencia de 16'533.355 hectáreas con procesos de remoción en masa en el país

²²GRAY and SOTIR, Op cit., p. 20.

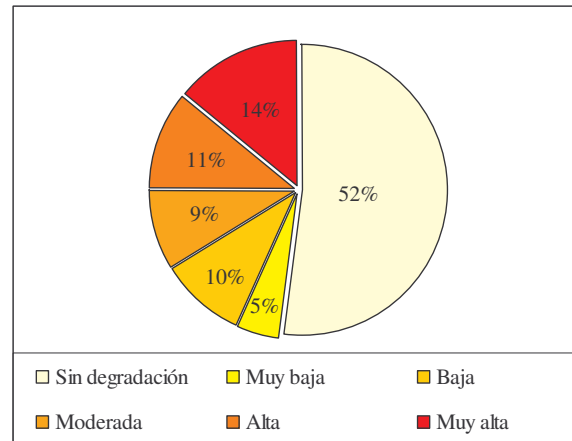
²³BRANSBY, M. et al. Stabilization of slopes by vegetation reinforcement. Proc. International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. [on line]. Hong Kong: 2006. Available from internet <URLhttp://www.dundee.ac.uk/civileng/geotechnics/staff/mfb/papers/6_2_text.pdf . p. 1

²⁴ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS. Taller sobre una agenda para reducción de vulnerabilidad a los peligros naturales: El desarrollo integral regional dentro de los países. En: Boletín de Vías Universidad Nacional (Manizales). OEA. Vol 12, no, 82, (1994); p. 131 – 189.

²⁵INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Condiciones e indicadores ambientales en Colombia, proyecciones en el corto mediano y largo plazo, [en línea] Informe mensual. 2001. Disponible en Internet: www.ideam.gov.co/

En un estudio de diagnóstico ambiental realizado por el IDEAM²⁶ sobre la degradación de suelos y tierras por erosión, remoción en masa y sedimentación en Colombia, se estimó que un 48% del territorio colombiano de su extensión continental presenta algún grado de degradación por los anteriores procesos, de los cuales el 14,2% presenta una degradación muy alta, el 10,8% alta, el 8,9% moderada, el 9,5% baja y el 4,6% muy baja (Figura 1).

Figura 1. Porcentaje de suelos degradados en Colombia.



Fuente: IDEAM, 2001

Ojeda et al²⁷ deducen que a raíz de los catástrofes causadas por fenómenos naturales, el tema de las amenazas ha venido cobrando un mayor interés en Colombia desde hace algunos años, gracias en parte a la preocupación existente a nivel internacional por reducir la magnitud de las pérdidas que éstos ocasionan. Los movimientos masales, comúnmente llamados deslizamientos o derrumbes, constituyen una de las causas mas frecuentes de desastres en Colombia y son por tanto una amenaza cuya distribución y magnitud se deben conocer para mejorar el manejo de las zonas propensas a ellos.

2.5.1 Factores desencadenantes y condicionantes. Según Tragsa y Tragsatec²⁸, para el estudio de los movimientos masales se debe tener un conocimiento de los factores que condicionan la estabilidad de laderas y de los que desencadenan tales movimientos. Los factores condicionantes son los que establecen las características de resistencia a una ladera

²⁶INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Terrenos afectados por movimientos en masa en Colombia, [en línea] 2000. Disponible en Internet: <http://www.ideam.gov.co>

²⁷OJEDA et al, Op. cit., p. 11

²⁸TRAGSA y TRAGSATEC. Restauración hidrológico – forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, 1994, p. 37.

frente a los esfuerzos que se generan en ella, mientras que los desencadenantes son los que producen variaciones en dichas características, rompiendo el equilibrio estático existente entre ellos.

La FAO²⁹, reporta que las pérdidas de suelo ocasionadas por remociones en masa están controladas por el equilibrio entre los factores estabilizadores o condicionantes (fuerza de las raíces, cohesión) y los factores desestabilizadores o desencadenantes (pendiente, fuerzas de infiltración, nivel freático). Otra forma para explicar esta relación es la magnitud relativa de la resistencia al cortante contra el esfuerzo cortante. Cuando el esfuerzo cortante es menor o igual que la resistencia al corte, el suelo se mantendrá estable; cuando el esfuerzo es mayor que la resistencia el suelo entonces fallará.

De acuerdo a Florez,³⁰ otra de las causas que conduce a los movimientos masales, es la construcción de obras de infraestructura, especialmente de vías por zonas de inestabilidad potencial, lo cual acelera los procesos degradativos y convierte los sitios en inestabilidad crónica, con reactivaciones en cada período lluvioso. Al respecto Krogstad³¹ plantea que la construcción de vías, puede socavar el talud en la parte de arriba y ladera abajo. Los caminos pueden también volver a dirigir el agua sobre secciones inestables del talud, aumentando la presión hidráulica en el suelo y reduciendo las fuerzas friccionales que lo sostienen en el lugar.

2.6 RESISTENCIA DEL SUELO A ESFUERZOS DE CORTANTE TANGENCIAL.

Berry y Reid³² indican que el conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelo. Gray y Sotir³³, plantean, que para el estudio de la estabilidad de una ladera se requiere estimar la resistencia del suelo ante la acción de esfuerzos de cortante tangencial, la cual

²⁹ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas: diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles. Roma: FAO, 1990. 234 p.

³⁰FLÓREZ, A. Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, Cordillera Central, Colombia. Ámsterdam, 1986., 159 p. Trabajo de grado (Philosophy Doctor) Universidad Van Ámsterdam.

³¹KROGSTAD, Op. cit., p. 1.

³²BERRY, P. y REID, D. Mecánica de Suelos. Traducido por Bernardo Caicedo. Bogotá: McGRAW-HILL, 1993. p. 181–204.

³³GRAY and SOTIR, Op. cit., p. 41

consiste en la modelación física del fenómeno de deslizamiento y establece la resistencia máxima del suelo al movimiento de sus partículas; es decir: la fuerza que se opone al deslizamiento del suelo sobre el suelo, la cual es impartida por las fuerzas cohesivas entre partículas y por la resistencia friccional entre estas cuando son forzadas a deslizarse.

Forsythe³⁴, manifiesta que la modelación o representación matemática del fenómeno de falla en un deslizamiento se hace mediante la utilización de las teorías de resistencia de materiales, debido a que las rocas y los suelos al fallar en corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, por lo tanto la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial se expresa empíricamente en términos de la cohesión y la fricción intergranular por medio de la ecuación de Mohr-Coulomb

La teoría del físico e ingeniero francés Coulomb (1776) establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección iguala la resistencia a la cizalladura en la misma dirección, lo cual depende de la cohesión y la fricción interna entre los granos, y esta dado por la ecuación de Mohr-Coulomb:

$$S = C + \sigma \tan \Phi$$

Donde, S, es la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial; C, es la cohesión del suelo; σ , es el esfuerzo normal; Φ , ángulo de fricción interna.

2.6.1 Prueba “in situ” de la resistencia al esfuerzo cortante por medio de la veleta. A propósito de las pruebas “in situ” Juárez y Rico dicen:

La prueba de la veleta es una contribución relativamente moderna al estudio de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos “cohesivos”. La prueba presenta en principio una ventaja considerable, al poder realizarse directamente sobre los suelos “in situ”, es decir no sobre muestras extraídas con mayor o menor grado de alterabilidad, sino sobre los materiales en el lugar en que se depositaron en la naturaleza. El aparato consta de un vástago, desmontable en piezas, a cuyo extremo inferior está ligada la veleta propiamente dicha, generalmente de cuatro aspas fijamente ligadas a un eje, que es prolongación del vástago. Para efectuar la prueba, una vez hincada la veleta a la profundidad deseada, se aplica gradualmente el vástago un momento en su extremo superior, en donde existe un mecanismo apropiado, que permite medirlo. Al ir aplicando el momento, la veleta tiende a girar tratando de

³⁴FORSYTHE, W. Física de suelos: manual de laboratorio. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1975. p. 82.

rebanar un cilindro de suelo, obteniendo de esta manera la resistencia del suelo al esfuerzo cortante³⁵.

2.7 RAÍCES.

Ryser³⁶, expone, que las raíces tienen múltiples funciones, como absorción de diferentes elementos y agua, anclaje, transporte, almacenaje y como material de intercambio con micorrizas y otros microorganismos del suelo. Cristancho³⁷, plantea que el sistema radical es el resultado de la interacción de muchos factores dentro de los cuales los que ejercen mayor influencia son los genéticos, los edáficos, la impedancia mecánica, la temperatura, la aireación y la disponibilidad de agua y sales minerales.

Krishnamurthy y Ávila³⁸ reportan que la importancia de las raíces en Agroforestería se esta reconociendo cada vez más actualmente, no obstante, debido al limitado conocimiento sobre las características y procesos radicales, las opciones disponibles para el manejo de la raíz en los Sistemas Agroforestales son deficientes. Para Toky y Bish³⁹, el conocimiento de la estructura desarrollada por los sistemas radicales es esencial para el entendimiento del nicho ecológico de una especie de árbol y manejo para la mayor optimización de la productividad de árboles en Sistemas Agroforestales y silvicultura, además, según Hossne⁴⁰, podría proveer resultados para evaluar la selección de plantas con sistemas radicales que mejor se adapten a condiciones particulares.

³⁵JUÁREZ, E. y RICO, A. Mecánica de suelos. Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa, 2006. P. 373-411.

³⁶RYSER, P. The mysterious root length. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 286, no. 1-2 (ago. 2006); p. 4.

³⁷CRISTANCHO, J. Variabilidad espacial de los parámetros fisicoquímicos y su relación con la distribución del sistema radical en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). Fusagasuga, 2002., p. 46. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Universidad de Cundinamarca. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

³⁸KRISHNAMURTHY, L. y ÁVILA, M. Agroforestería Básica. México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 1999. p. 226.

³⁹TOKY, O. P. and BISH, R. P. Observations on the rooting patterns of some agroforestry trees in an arid region of north-western India. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 18, no. 3 (jun. 1992); p. 245.

⁴⁰HOSSNE, A. Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. En: Revista Científica UDO Agrícola. Caracas. Vol. 4, no. 1 (2004); p. 42-52.

Ryser⁴¹ plantea que la determinación de la longitud de la raíz tiene cierto grado de misterio, reflejando la dificultad en las metodologías aplicadas para la extracción de raíces, proceso asociado, a la enorme longitud que las raíces pueden desarrollar; adicionalmente, Krogstad⁴², deduce que la extensión y distribución de las raíces, han sido equivocadamente entendidas. En este sentido, Bransby et al⁴³ manifiestan que los estudios que buscan evaluar el mecanismo de refuerzo del suelo por las raíces, en laderas, presentan como limitante de investigación, la complejidad de las pruebas de campo.

Sin embargo, a pesar de su importancia Groot y Soumaré⁴⁴, indican que las raíces tienden a no tenerse en cuenta en los estudios agroforestales por la simple razón de la dificultad que implica estudiarlas y medirlas; principalmente en regiones tropicales, reporta Magalhães et al⁴⁵, donde se desconoce la distribución radical de la mayoría de especies forestales. Bajo estas circunstancias, concluye Dhyani et al⁴⁶, los reportes de distribución de raíces para Agroforestería son escasos.

2.7.1 Comportamiento del sistema radical arbóreo en sistemas agroforestales y forestales. Barrera⁴⁷ afirma que es importante determinar la profundidad de penetración de las raíces de los árboles, cuando se hacen estudios del efecto de las raíces en la estabilidad de laderas, ya que en cuanto las raíces más penetren una zona potencial de corte, la posibilidad de que la vegetación pueda aumentar la estabilidad del suelo es mayor.

Chatuverdi y Das⁴⁸ examinaron la distribución de ocho especies de árboles multipropósitos de cinco años de sembrados, en el norte de la India (*Acacia lenticularis*, *Acacia nilotica*,

⁴¹RYSER, Op. cit., 6 p

⁴²KROGSTAD, Op. cit., P. 2-4.

⁴³BRANSBY et al, Op. cit., p. 2.

⁴⁴GROOT, J. J. R. and SOUMARÉ, A. The roots of the matter soil quality and tree roots in the Sahel. En: Agroforestry Today. Vol. 7, no 1. (jan.-march 1995); p. 9-11.

⁴⁵MAGALHÃES, L. M. S, y BLUM, W. E. H. Distribuição radicular de espécies florestais plantadas na região de Manaus, Amazônia. [en línea]. En: Floresta e Ambiente. Brasil. Vol. 7, no 1 (jan.-dez. 2000); p 93. Disponible en Internet: <http://www.ufrj.br/institutos/if/revista/pdf/p93.pdf>

⁴⁶DHYANI, S.K; NARAIN, P. and SINGH, R.K. Studies on root distribution of five multipurpose tree species in Doon Valley, India. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 12, no. 2. (nov. 1990); p. 149 – 161.

⁴⁷Ibid, p. 39.

⁴⁸CHATUVERDI, O.P. and DAS, D.K. Studies on rooting pattern of 5-year-old important agroforestry tree species grown in north Bihar, India., citados por AKINNIFESI, F.; et al. Tree root architecture. En: VAN

Albizia procera, *Dalbergia sissoo*, *Pithecelobium dulce*, *Sesbania grandiflora*, *Senna fistula* y *Syzygium cumini*). Entre las ocho especies estudiadas, la mayor profundidad de enraizamiento fue obtenida por *A. nilotica* (2,7 m) la menor profundidad de enraizamiento ocurrió en *A. lenticularis* (1,01m).

Barrera⁴⁹ estudiando los sistemas radicales de *Cordia alliodora*, *Inga codonantha*, *Trichanthera gigantea* y *Coffea arabica* en un sistema agroforestal a manera de árboles para sombrío de café, en la zona cafetera de Colombia, encontró que la distribución de raíces en el suelo fue muy similar para *C. alliodora* e *I. codonantha*, ambas especies se conformaban de una raíz principal y un conjunto de raíces laterales que se extendían hasta mas allá de la proyección de la copa. *C. arabica*, presentó una raíz principal que alcanzó 60 cm de profundidad y varias raíces laterales que se extendieron hasta 1,20 m a partir del eje. *T. gigantea* no presentó raíz principal si no una densa malla de raíces laterales de las cuales algunas penetraron en el suelo hasta llegar a 1,6 m de profundidad y otras se extendieron alcanzando longitudes superiores a los 4 m. Este estudio concluyó la importancia de implementar Sistemas Agroforestales en zonas de ladera susceptibles a movimientos masales, demostrando que las raíces de los árboles y arbustos son elementos estructurales muy importantes en la estabilidad del suelo.

Akinnifesi et al⁵⁰ realizaron una revisión de estudios desarrollados en sistemas radicales de árboles en Agroforestería para los trópicos (Tabla 1). Los estudios en Agroforestería rara vez muestran profundidades de enraizamiento mayores a 2 m, sin embargo en un estudio, se encontró que raíces de mataradón *Gliricidia sepium* alcanzaron una profundidad de 5,6 m en Malawi. En general las raíces de los árboles son poco profundas, (en suelos fuertemente ácidos); además, la poca profundidad de enraizamiento es a menudo producto, de la impedancia mecánica del suelo en suelos secos.

2.7.2 Las raíces como elementos de estabilidad en laderas. Respecto al efecto de las raíces como elementos de estabilidad en laderas, O'loughlin y Ziemer⁵¹, manifiestan, que el reforzamiento de las raíces es a menudo citado como la influencia más importante de los

NOORDWIJK, M.; CADISCH, G. and ONG, C. K. Bellow-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Nairobi: CAB International, 2004, p. 63.

⁴⁹ BARRERA G., J. E. Evaluación del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas de la zona cafetera colombiana. Bogotá, 2003., 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

⁵⁰ AKINNIFESI, F., et al. Tree root architecture. En: VAN NOORDWIJK, M.; CADISCH, G. and ONG, C. K. Bellow-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Nairobi: CAB International, 2004. p. 62

⁵¹ O'LOUGHLIN, C. and ZIEMER, R. R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests, [on line] Corvallis: 1982. Available from internet <URL< <http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/Zierner82.PDF>. p 70-78.

Tabla 1. Patrones de distribución de raíces en árboles de regiones tropicales.

Especies	Edad árbol (años)	Época*	Altitud	Tipo de suelo	pH suelo	% C en la superficie 0-20 cm	Precipitación (mm)	Sistema de Producción/ Tratamiento	Manejo del árbol	Distancia de siembra (m x m)	Profundidad Máxima de raíz (m)	Capa de suelo con mas raíces (cm)
<i>Acacia catechu</i>	6	SR-U	n/a**	n/a	n/a	n/a	900	A	Sin podar	5 x 5	1,5	0-15
<i>Cajanus cajan</i>	4	LR-U	n/a	Podzol	4,6	1,42	1800	A+C	Podado	0,5 x 4	1,5	30-50
<i>Cajanus cajan</i>	4	LR-U	n/a	Podzol	4,6	1,42	1800	A+C	Podado	0,5 x 3	1,4	0-20
<i>Clitoria fairchildiana</i>	4	LR-U	n/a	Podzol	4,6	1,42	1800	A+C	Podado	0,5 x 4	1,4	15-30
<i>Dactyladenia barteri</i>	6	LR-U	150	Ultisol	4,0	1,49	2400	A+C	Podado	1 x 4,5	1,5	0-40
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	6	LR-B	n/a	n/a	n/a	n/a	900	A	Sin podar	5 x 5	2,0	15-30
<i>Gliricidia sepium</i>	9	LR-U	1030	Ferric Lixisols	5,4	0,76	850	A+C	Podado; No fert.	0,9 x 1,5	>3,0	40-50
<i>Gliricidia sepium</i>	9	LR-U	1030	Ferric Lixisols	5,4	0,76	850	A+C	Podado; fert.	0,9 x 1,5	>3,0	40-50
<i>Gliricidia sepium</i>	6	WS-U	1030	Ferric Lixisols	5,4	0,89	1045	A+C	Podado; No fert.	0,9 x 1,5	5,6	0-30
<i>Gliricidia sepium</i>	5	WS	100	Ultisol	4,8	n/a	2200	A+C	Podado	0,5 x 4	n/a	0-10
<i>Leucaena leucocephala</i>	4	LR-U	n/a	Podzol	4,6	1,42	1800	A+C	Podado	0,5 x 4	1,4	80-90
<i>Leucaena leucocephala</i>	6	LR-B	n/a	n/a	n/a	n/a	900	A	Sin podar	5 x 5	1,2	100-125
<i>Leucaena leucocephala</i>	2,4	LR-B	517	Udic Haplustalf	5,5	0,58	1700	A	Sin podar	3 x 3	>1,2	30-60
<i>Leucaena leucocephala</i>	10	LR-B	1200	Alfisol	6,0	1,41	1300	A+C	Podado	0,25 x 4	>2,0	0-15
<i>Peltophorum dasyrrachis</i>	5	WS	100	Ultisol	4,8	n/a	2200	A+C	Podado	0,5 x 4	n/a	0-10
<i>Pterocarpus mildbraedii</i>	4	LR-B	1200	Alfisol	6,2	1,24	1300	A+C	Podado	0,25 x 2	>2,0	0-20
<i>Nauclea latifolia</i>	4	LR-B	1200	Alfisol	6,2	1,24	1300	A+C	Podado	0,25 x 2	>2,0	60-90
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	4	LR-B	1200	Alfisol	6,2	1,24	1300	A+C	Podado	0,25 x 2	>2,0	10-30
<i>Prosopis cineraria</i>	6	LR-B	n/a	n/a	n/a	n/a	900	A	Sin podar	5 x 5	>2,0	15-30
<i>Senna siamea</i>	4	LR-U	n/a	Rhodic ferrasol	5,3	0,31	1289	A+C	Podado	0,5 x 4	>2,0	10-20
<i>Senna siamea</i>	6	LR-U	150	Ultisol	4,0	1,49	2400	A+C	Podado	1 x 4,5	1,5	0-20
<i>Senna siamea</i>	5	LR-B	n/a	Rhodic ferrasol	5,3	0,29	876	A+C	Podado	0,5 x 4	>2,0	10-20
<i>Senna siamea</i>	4	LR-U	n/a	Rhodic ferrasol	5,2	0,43	1250	A+C	Podado	0,5 x 4	>2,0	0-10

*SR, Lluvias cortas; LR, Lluvias de larga duración; U, Unimodal; B, Bimodal; WS, Estación húmeda; ** n/a, dato no disponible; A, árbol; A+C, árbol +cultivo. Fuente: Modificado de Akinnifesi, 2004

bosques en el mantenimiento de la estabilidad de los suelos, sin embargo el mecanismo de estabilización de pendientes por el sistema radical y la real importancia de las raíces de los árboles en la estabilidad de los suelos bajo diferentes condiciones de pendiente, clima, vegetación, y suelos, es escasamente estudiado.

En este sentido, Suárez⁵² opina: “un efecto positivo muy importante es el anclaje de masas de suelo por las raíces. Las características físicas de las raíces determinan el efecto de anclaje o refuerzo del suelo y la densidad del sistema radical mejora la retención de las partículas o masas de suelo, aumentando la resistencia a la erosión”.

Bischetti et al⁵³ reportan que la magnitud de tales efectos depende del desarrollo del sistema de la raíz, que alternadamente es una función de las características genéticas de la especie y las características del sitio (textura y estructura del suelo, aireación, humedad, temperatura y competencia con otras plantas). Debido a la variabilidad de tales características, observamos una variabilidad espacial grande en los patrones de la raíz y por lo tanto una gran heterogeneidad en el refuerzo del suelo.

De acuerdo a Bransby et al⁵⁴ la vegetación puede mejorar la estabilidad de la pendiente por influencia en la interacción de procesos hidrológicos y la estructura mecánica del suelo. La tala de los árboles reduce estos procesos, incrementando la saturación del suelo y los movimientos en masa, Ziemer⁵⁵, O’loughlin y Ziemer⁵⁶, Watson et al⁵⁷, Megahan et al⁵⁸ afirman que la causa principal para que se activen todo tipo de movimientos masales en

⁵²SUAREZ, Op. cit., p. 291.

⁵³BISCHETTI, G. et al. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy). En: Plant and Soil. Holanda. Vol. 278, no. 1-2 (dic. 2005); P. 11 – 22.

⁵⁴BRANSBY et al, Op. cit., p. 1

⁵⁵ZIEMER, R. R. The role of vegetation in the stability of forested slopes, [on line] Nueva Zelanda: 1981. Available from internet <URL<<http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/ZiemerIUFRO1981.PDF>. p. 297-308.

⁵⁶O’LOUGHLIN and ZIEMER, Op., cit. p. 70-78.

⁵⁷WATSON, A.; PHILLIPS, C. and MARDEN, M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species y their contribution to slope stability. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 217, no. 1-2 (dic. 1999); p. 39-47.

⁵⁸MEGAHAN, W. R.; DAY, N. F.; and BLISS, T. M. Landslide occurrence in the western and central Northern Rocky Mountain physiographic province in Idaho, citados por KROGSTAD, F. A. Physiology and ecology based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes. Washington, 1995., 45 p. Thesis (Master of Science) [on line]. University of Washington. Available from internet <URL<<http://www.students.washington.edu/fkrogsta/decision/roots/rootstab.pdf>. p. 1.

suelos de ladera, es el desmonte de las coberturas arbórea y arbustiva, ya que generalmente después de cortada la vegetación, entre 4 y 10 años se desencadena un gran número de derrumbes y deslizamientos, que van aumentando su número a medida que transcurre el tiempo, es decir a medida que las raíces se descomponen en el interior del suelo.

Según Barrera⁵⁹, una ventaja que ofrece la vegetación forestal, es su aporte positivo en la regulación del balance hídrico del suelo (sobre todo en Sistemas Agroforestales), ayudando así a disminuir los contenidos de humedad y las presiones de poros que reducen la resistencia del suelo al cortante tangencial.

2.8 EL CONCEPTO DE LA COHESIÓN RADICAL ADICIONAL (ΔC).

O'loughlin y Ziemer⁶⁰, manifiestan que los sistemas radicales de las plantas contribuyen a mejorar la resistencia del suelo por proveer una cohesión adicional ΔC y mejorar la cohesión total. Por lo tanto en un suelo penetrado por raíces, la ecuación de Mohr – Coulomb, se puede modificar agregando el factor de refuerzo; y de esta forma la ecuación original quedaría transformada en la siguiente expresión:

$$S = (C + \Delta C) + \sigma \tan \Phi$$

Donde, S, es la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial; C, es la cohesión del suelo; ΔC , es la cohesión adicional dada por las raíces al suelo; σ , es el esfuerzo normal; y Φ , ángulo de fricción interna.

Estudios de Endo y Tsuruta⁶¹, realizando pruebas de corte directo, empleando grandes cajas de corte metálicas para determinar el efecto de refuerzo dado a un suelo franco-arcilloso por el sistema radical de *Alnus glutinosa*; reportan que mediante una expresión matemática fue posible predecir el incremento dado por las raíces a la cohesión del suelo:

⁵⁹BARRERA, Op. cit., p. 41.

⁶⁰O'LOUGHLIN and ZIEMER, Op., cit. p. 70-78.

⁶¹ENDO, T. and TSURUTA, T, The effect of the tree's roots on the shear strength of soil, citados por GRAY and SOTIR, Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, A practical guide for erosion control. Nueva York: John Wiley and Sons, 1996. 378 p.

$$\Delta C = a(\rho_R + b)$$

Donde ΔC , es el aumento en la cohesión del suelo en kg cm^{-3} ; a , es la constante empírica que corresponde a $0,93 \times 10^{-5}$; ρ_R , es la biomasa de raíces por unidad de volumen de suelo en g m^{-3} ; y b , constante empírica que equivale a 53 g m^{-3}

2.9 RESISTENCIA DEL SISTEMA SUELO-RAÍCES A ESFUERZOS DE CORTANTES TANGENCIAL MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE EN CAMPO.

O'loughlin et al⁶² evaluaron la resistencia al corte *in situ* usando cajas de corte metálicas con los lados y la base abiertas para evaluar el aporte del sistema radical de *Nothofagus spp.* a la resistencia del suelo. Se hicieron 19 pruebas en plantaciones de esta especie y 17 pruebas en un sitio similar pero donde el bosque había sido talado y quemado 36 meses antes y las raíces de los árboles estaban en un grado alto de descomposición. Las gráficas de esfuerzo desplazamiento mostraron que las raíces le confirieron al suelo una resistencia pico considerable, como también una resistencia residual amplia después de que ocurrió un extenso desplazamiento de corte. Las curvas para suelos intactos mostraron únicamente pequeñas declinaciones en la resistencia al cortante después de alcanzar el punto máximo debido a que las raíces continuaron estirándose y reajustaron su posición.

Los ensayos anteriores se condujeron tanto para suelos con raíces como para suelos sin raíces. La envolvente de falla para el suelo sin raíces arrojó un valor de cohesión de 3,3 kPa, y para el suelo con raíces de 6,6 kPa. Esta investigación llevo a concluir que las raíces aumentan la cohesión del suelo.

En otro estudio, Ziemer⁶³ realizó pruebas de corte *in situ* sobre bloques de suelo con raíces de *Pinus contorta*. Las raíces se clasificaron en seis clases diamétricas, se secaron a 70°C y se pesaron. Al suelo se le calculó la humedad, la granulometría, la densidad aparente y la estabilidad de agregados. Se hicieron análisis múltiples de regresión, encontrándose que la mejor ecuación de regresión fue aquella que predecía la resistencia la cortante del suelo a partir de la biomasa de raíces menores de 17 mm, las cuales representaron el 64% ($1,77 \text{ kg m}^{-3}$) de la biomasa total. Esta ecuación demostró que la resistencia del suelo a esfuerzos

⁶²O'LOUGHLIN, C. L.; ROWE, L. K.; and PEARCE, A. J. Exceptional storm influences on slope erosion and sediment yields in small forest catchments, north westland, Nueva Zelanda, citados por O'LOUGHLIN, C. and ZIEMER, R. R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests, [on line] Corvallis: 1982. Available from internet <URL<<http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/Ziemer82.PDF>. p 72.

⁶³ZIEMER, R. R. Roots and the stability of forested slopes. In: Timothy, R. H. y Andrew, J. Pearce, Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steplands, proceedings of the Christchurch Symposium, [on line] Nueva Zelanda: 1981. Available from internet <URL<<http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/ZiemerIAHS.PDF>. p. 343 – 361.

cortantes tangenciales aumentó linealmente con la biomasa de raíces. La ecuación encontrada fue:

$$\text{Resistencia del suelo a esfuerzos cortantes (kPa)} = 3,13 + 3,31 \text{ Biomasa (kg m}^{-3}\text{)}$$

Ziemer y Swanston⁶⁴, midieron los cambios en la resistencia al corte de raíces individuales con diámetros entre 2 y 50 mm, durante un periodo de 10 años después de la tala de *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. y *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. Se extrajeron raíces vivas de un bosque intacto, y raíces en diferentes estados de descomposición después de cortar los árboles 10, 6, 4, y 2 años antes, para ser sometidas en el laboratorio a cargas de tracción. En general, las raíces vivas de *P. sitchensis* con diámetros entre 2 y 5 mm son 40% más débiles que las raíces de *T. heterophylla* con diámetros de 10 mm. Esta diferencia fue de solo un 18%. A medida que aumentó el diámetro de las raíces las diferencias fueron mucho menores. Dos años después de la tala, las raíces de *T. heterophylla* menores de 25 mm en diámetro perdieron cerca de 1/3 de su resistencia, mientras que las de *P. sitchensis* perdieron solo la mitad. A los 10 años no se encontraron raíces de 2 mm y solo se hallaron unas pocas de 5 mm. Entre los 6 y 10 años, las raíces con diámetros de 50 mm han perdido el 87% de su resistencia en *P. sitchensis* y el 50% *T. heterophylla*.

En otra investigación Ziemer⁶⁵, reporta que a partir del estudio de tres sistemas de aprovechamiento forestal, planteó un modelo para predecir el cambio en la estabilidad del suelo, durante un periodo de 30 años después del aprovechamiento forestal en cada sistema. En el primer sistema, se practicó tala total, en el segundo se extrajo el 70 % de la plantación original y a los 10 años el otro 30 %, y en el último sistema se extraería el 20 % de la masa forestal cada 10 años. De acuerdo al tiempo que demorara la regeneración natural en establecerse y colonizar con sus raíces el área deforestada, se podía predecir el periodo durante el cual el suelo permanecería inestable. Se encontró que los suelos sobre los que se practicaron los dos primeros sistemas eran los más susceptibles a fallar, durante un periodo que oscilaría entre 2 –17 años y 12 – 17 años respectivamente; por el contrario si se practica el sistema de cortas de selección, el suelo siempre se mantendrá estable, ya que las raíces del 80% de la población sin eliminar, colonizarían rápidamente el suelo del 20% de árboles extraídos.

⁶⁴ZIEMER, R. R. and SWANSTON, D. N. Root strength changes after logging in Southeast Alaska. [on line] Oregon: 1977. Available from internet <URL<<http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer77.PDF>. 10 p.

⁶⁵ZIEMER, Roots and the stability of forested slopes, Op. cit., p. 343-361.

Ekanayake et al⁶⁶, mediante pruebas de corte directo en el campo para el suelo con raíces de *Pinus radiata*, idearon una ecuación que permitía predecir la resistencia del suelo a esfuerzos cortantes tangenciales con raíces, de acuerdo a la densidad de raíces por unidad de área de suelo. La ecuación hallada fue la siguiente:

$$I_{RP} = \frac{0,32 A_R + 24,34}{A_S}$$

Donde, I_{RP} , es la resistencia a esfuerzos cortantes para el suelo con raíces de *P. radiata*; A_R , es el área ocupada por las raíces en el plano de falla; A_S , es el área ocupada por el suelo en el plano de falla.

En otra investigación, Watson et al⁶⁷ encontraron que aquellas laderas susceptibles a movimientos masales y que han sido desprovistas totalmente de su cobertura vegetal, si se les interviene un año después con plantaciones de pino *Pinus radiata* D. Don, a densidades de 1.250, 800 y 400 árboles ha⁻¹, serían ocupados por las raíces a los 4,7, 5,6 y 7,5 años respectivamente, tiempo durante el cual existe una posibilidad de ocurrencia de un evento extremo que podría causar un deslizamiento; de 80%, 85% y 90% respectivamente. Cuando el área es colonizada por una regeneración natural muy densa (16.000 plántulas ha⁻¹) de kanuka *Kunzea ericoides* el tiempo que tardarían las raíces en colonizar el área sería de 2,8 años, y la posibilidad de ocurrencia de un evento extremo es de 60%. El estudio concluye que *K. ericoides* es la especie que más rápido estabiliza el suelo, ya que el tiempo que tarda su sistema radical en ocupar el sitio es mucho menor que el empleado por las raíces de *P. radiata*.

En un estudio realizado por Barrera⁶⁸, evaluando el aporte del sistema radical de *Cordia alliodora*, *Inga codonantha*, *Trichanthera gigantea* y *Coffea arabica* en la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en laderas de la zona cafetera Colombiana, encontró que a 20 cm de profundidad, la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial promedio fue mejor en aquellos sitios con raíces de *C. Alliodora* (55,66 kPa) y *T. gigantea* (52,63 kPa). A 80 cm, fue mayor en el suelo con raíces de *T. gigantea* (70 kPa). A 120 cm, fue mayor en el suelo con raíces de *C. alliodora* (76 kPa) e *I. codonantha* (76 kPa). En todos los casos se encontró que en aquellos sitios con raíces de *C. arabica* la resistencia promedio del suelo a esfuerzos de cortante tangencial fue inferior respecto a las demás especies. Así

⁶⁶EKANAYAKE, J. C. et al. Tree roots and slope stability: A comparison between *Pinus radiata* and *Kanuka* En: Journal of Forestry Science. Nueva Zelanda. Vol. 27, no. 2 (1997); P. 216-233

⁶⁷WATSON et al, Op. cit., p. 39-47.

⁶⁸BARRERA, Op. cit., 140 p.

mismo los valores más bajos se encontraron en el testigo libre de raíces. *C. alliodora* incrementó la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial en todo el perfil en 21,82 kPa con un índice de ocupación de raíces de 0,0022, el cual se considera bajo respecto a las especies *C. arábica* y *T. gigantea*, que tienen índices de ocupación mayores de 0,0059 y 0,0049 respectivamente e incrementaron la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial en 16,51 kPa y 0,46 kPa respectivamente. Este estudio llegó a la conclusión, que para estabilizar un terreno susceptible a movimientos masales, es necesario contar con una población multistrata de especies, con sistemas radicales contrastantes, para dar así estabilidad a diferentes profundidades dentro del perfil del suelo.

2.10 RESTAURACION ECOLÓGICA

Según Higgs⁶⁹, la Society for Ecological Restoration (SER), define la Restauración Ecológica como el proceso de renovar y mantener la salud de un ecosistema. Calle⁷⁰ afirma, que el propósito es simular un sistema natural funcional y autorregulado, que se integre al paisaje. La Restauración Ecológica trata de controlar la dirección y la velocidad de la sucesión en un área degradada con el fin de recuperar, hasta donde sea posible, un ecosistema similar al original.

2.10.1 Bioingeniería como herramienta de restauración ecológica. De acuerdo a Rivera y Sinisterra⁷¹, la Restauración Ecológica y la Bioingeniería son elementos de un manejo integral de carácter preventivo y correctivo respectivamente de los procesos erosivos severos y movimientos masales. Para Rivera⁷² la Bioingeniería se refiere a la prevención y control de erosión, protección y estabilización de taludes, y problemas de movimientos masales con base en los parámetros de la Ecuación Universal de Erosión y de la Resistencia al Cortante Tangencial, que tienen en cuenta los Procesos Físicos, Químicos y Biológicos de los fenómenos degradativos. Esto permite la construcción de estructuras totalmente vivas, usando diferentes partes de las plantas, tales como: raíces y tallos principalmente. La

⁶⁹HIGGS, E. 1997. What is Good Ecological Restoration?, citado por MURGUEITIO, M. M. Recuperación de áreas degradadas por erosión en cárcavas profundas, mediante prácticas biológicas y de bioingeniería. Cali, 2005., 116 p. Trabajo de grado (Ecóloga). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.

⁷⁰CALLE, Z. Restauración de suelos y vegetación nativa: Ideas para una ganadería andina sostenible. Cali: Fundación CIPAV. 2003. p. 30.

⁷¹RIVERA, J. H. y SINISTERRA, J. A. Uso social de la Bioingeniería para el control de la erosión severa. Cali: CIPAV, 2006. 110 p.

⁷²ENTREVISTA con Horacio Rivera Posada, Investigador y Consultor de suelos, Fundación CIPAV. Cali, 3 Abril de 2007.

bioingeniería es considerada como algo único en el sentido que las mismas partes de las plantas sirven como elementos mecánicos a la estructura principal en los sistemas de protección de laderas y se transforman a través del tiempo en obras vivas que cada día son más fuertes. Estas estructuras, se convierten en refuerzo mecánico, drenaje hidráulico y barrera natural para contener la erosión y los movimientos masales.

La Bioingeniería se constituye en una herramienta de la Restauración Ecológica, ejerciendo un efecto positivo en aquellas zonas de inestabilidad y degradación; permitiendo que la restauración de áreas degradadas se acelere y que el paisaje se transforme de manera positiva. Bransby et al⁷³ indican que una alternativa sustentable para la disminución en la probabilidad de falla de una pendiente, es el uso de la vegetación.

2.10.2 Desarrollo histórico de la bioingeniería. Mattia et al⁷⁴, manifiesta que el efecto de la vegetación en el control de la erosión hídrica y en la estabilización de laderas, ha sido un efecto, reconocido siglos atrás. Franti⁷⁵ manifiesta que el uso de los métodos bioingenieriles data de antes del siglo XII, cuando fueron utilizados para estabilizar laderas en China. Técnicas similares seguían siendo aplicadas a comienzos del siglo XX para controlar inundaciones y erosión a lo largo del Río Amarillo.

En los Estados Unidos, manifiestan Gray y Sotir⁷⁶, el empleo de la Bioingeniería data de las décadas de 1920 y 1930. Las aplicaciones más comunes fueron la estabilización de orillas de arroyos, caminos y carreteras y la restauración de taludes. Europa experimentó una tendencia similar. Sin embargo, unos pocos practicantes continuaron aplicando y mejorando los métodos vivos en combinación con los de construcción. En el año de 1930 un número de profesionales en varias disciplinas técnicas tuvieron éxito empleando los conceptos básicos de la Bioingeniería. Estas técnicas combinaron el uso de estructuras vivas de sauce *Salix* spp. con la construcción de muros de piedra con recortes de madera y la instalación de muros con incrustaciones de vegetación.

⁷³BRANSBY et al, Op. cit., p. 1

⁷⁴MATTIA, C.; BISCHETTI, G.B.; and GENTILE; F. 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical mediterranean species. En: Plant and Soil. Holanda. Vol. 278, no. 1-2 (dic. 2005); p. 23 – 32.

⁷⁵FRANTI, T. Bioengineering for hillslope, streambank and lakeshore erosion control. [on line]. Nebraska: 1997. Available from internet URL< <http://www.icecubetopper.com>. p. 1-2.

⁷⁶GRAY and SOTIR, Op. cit., p. 41

Al respecto, Rivera y Sinisterra⁷⁷ plantean que los árboles y las plantas de diferentes hábitos de crecimiento han sido usados por siglos para controlar los problemas de erosión en suelos de ladera y en la estabilización de las orillas de los ríos. En las plantas vivas opera una serie de mecanismos que estimulan el reciclaje biológico y la conservación de los elementos, por lo cual desempeñan un papel fundamental en la recuperación de los recursos naturales degradados.

De acuerdo con Watson et al⁷⁸, para la selección de especies en la estabilización de laderas, se debe hacer una valoración detallada de sus cualidades específicas bajo el suelo y que puedan ser usados en el control de los movimientos masales, ya que en la mayoría de los casos estas especies se seleccionan al azar o teniendo en cuenta solo características como su disponibilidad, tolerancia a la sequía, rango altitudinal, o simplemente por observaciones bajo el suelo, basado en características de su crecimiento en la superficie, antes que en sus atributos en términos de estabilización.

Rivera⁷⁹ reporta, que el control de los problemas avanzados de erosión y movimientos masales en el país y en el trópico, han estado enfocados hacia las soluciones convencionales de la Ingeniería Civil, la cual genera soluciones temporales y muy costosas. Es por tanto, conveniente a nivel de enseñanza universitaria y técnicos de extensión, difundir nuevas alternativas que tengan en cuenta la relación causa–efecto de los procesos degradativos, tal como lo hacen los procesos bioingenieriles y los biotecnológicos (obras civiles convencionales complementadas con las estructuras bioingenieriles), las cuales dan soluciones definitivas y de costo bajo a los problemas degradativos. Es preferible ejecutar soluciones mediante obras de drenaje, complementadas con la siembra de vegetación con sistemas radicales agresivos, que mediante muros en concreto, ya que se busca es disminuir la presión de poros del terreno y aumentar la cohesión y el coeficiente de fricción entre partículas del suelo.

En la zona cafetera colombiana Rivera ha realizado varios trabajos exitosos en la recuperación de áreas degradadas por movimientos masales, mediante la utilización de la vegetación, con tratamientos bioingenieriles (Rivera, 1998⁸⁰, 1999⁸¹, 2001⁸², 2002⁸³, 2002⁸⁴).

⁷⁷RIVERA y SINISTERRA, Op. cit., 110 p

⁷⁸WATSON, et al, Op. cit., p. 46.

⁷⁹ RIVERA P., J. H. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín, 1999., 525 p. Trabajo de grado. (Doctor en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. (Premio Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2001).

En la actualidad la Fundación CIPAV con el apoyo de la CVC, lidera en el Valle del Cauca, La Red Social para la Restauración de Suelos y la Prevención de Desastres, un proceso social ejemplar en el que participan comunidades de diversos municipios del departamento (Argelia, Bolívar, Cali, Dagua, Guadalajara de Buga, El Cairo, Felidia, La Cumbre, Palmira, Restrepo). Según Murgueitio⁸⁵, la propuesta de restauración de suelos se centra en el desarrollo de un *proceso formativo* para las comunidades afectadas, posibilitando su participación directa en los procesos de Restauración Ecológica, mediante la implementación de los controles bioingenieriles y buscando adicionalmente estimular la reconversión de los modelos productivos que atentan contra los recursos naturales, con una propuesta encaminada hacia la utilización sostenible de los suelos. El trabajo de este centro de investigación en el país, es una experiencia exitosa en la restauración de suelos degradados por movimientos masales mediante tratamientos de Bioingeniería.

⁸⁰RIVERA P. J. H. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No 256 (1998); 8 p.

⁸¹RIVERA P., J. H. Control de derrumbes y negativos en carreteras, mediante tratamientos de tipo biológico. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No. 264 (1999); 8p.

⁸²RIVERA P., J. H. Manejo y Estabilización de Taludes en Zonas de Ladera mediante Tratamientos de Bioingeniería. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No. 291 (2001); 8 p.

⁸⁴RIVERA P., J. H. Construcción de trinchos vivos para la conducción de aguas de escorrentía en zonas tropicales de ladera. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No 296 (2002); 8 p

⁸⁴RIVERA P, J. H. Protección y recuperación de bordes de ríos y cañadas en zonas de ladera tropicales con tratamientos bioingenieriles y biotecnológicos. Chinchiná: Cenicafé. 2002. 8 p.

⁸⁵MURGUEITIO, M. M. Recuperación de áreas degradadas por erosión en cárcavas profundas, mediante prácticas biológicas y de bioingeniería. Cali, 2005., 116 p. Trabajo de grado (Ecóloga). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.

3. METODOLÓGIA.

La presente investigación se desarrolló de forma paralela al proyecto denominado “Restauración de coberturas en fincas ganaderas vecinas al embalse SARA BRUT”, desarrollado por la Fundación CIPAV y la CVC. Ésta iniciativa se planteó como una estrategia de reconversión en los sistemas de producción cercanos al embalse; con el propósito de iniciar un proceso de cambio en el uso y manejo del suelo para revertir la problemática ambiental en la que se encuentra inmersa la región (Anexo A).

3.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El trabajo de campo se realizó en la Hacienda “Guacas” a 4° 20’ 8.7” de latitud norte y 76° 14’ 22.7” de longitud oeste, a 1442 m de altitud, localizada en el corregimiento de Primavera, Municipio de Bolívar, Valle del Cauca, en la cordillera occidental de Colombia (Figura 2). De acuerdo a la Federación Nacional de Cafeteros⁸⁶ los suelos se clasifican como Unidad Dovio (Typic eutropepts) derivados de diabasa biotítica horblendica. La región corresponde según la clasificación de Holdridge⁸⁷ a la zona de vida Bosque seco tropical (bs-T) con una precipitación promedio anual de 1.565 mm⁸⁸. La fase de laboratorio se desarrolló en el Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, ubicado en el Municipio de Palmira, a 965 m de altitud.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

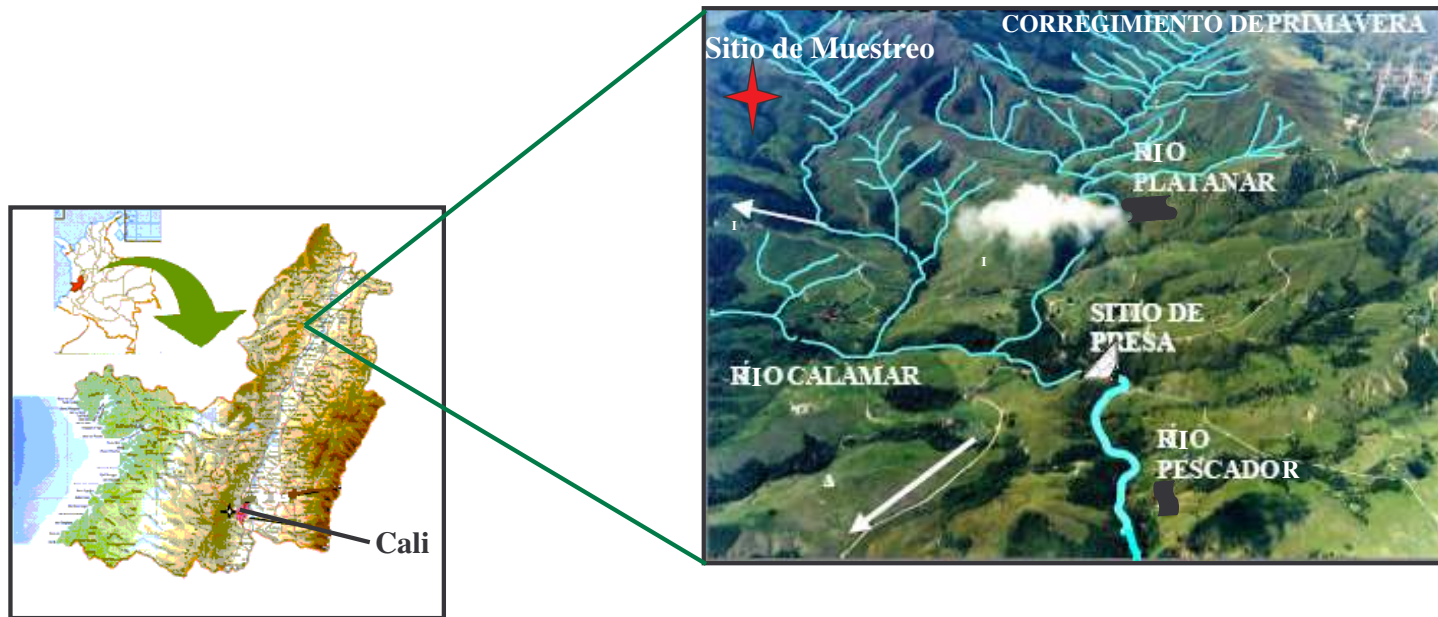
Se evaluaron tres árboles adultos de Trapichero *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth. y tres árboles adultos de Vainillo *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby, con edad superior a 15 años, que se encontraban como árboles dispersos en potreros de pasto estrella *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilger, en pendientes de 30° a 40°. En los seis árboles se determinó la distribución de raíces primarias, extensión y longitud de raíces laterales y profundidad máxima de raíces pivotantes y en tres árboles (uno de *Senna*

⁸⁶FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Zonificación y uso potencial del suelo de la zona cafetera del Departamento del Valle del Cauca. Manizales: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2001. p 42.

⁸⁷HOLDRIDGE, L. Ecología basada en zonas de vida. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 1996. 216 p.

⁸⁸CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. Datos de precipitación; estación pluviométrica El Retiro, período 1971 a 2006, Bolívar, Valle del Cauca. 2006. p 1.

Figura 2. Localización de la zona de estudio.



Fuente: CVC, 2005.

spectabilis y dos de *Acacia pennatula*) se determinó la influencia de raíces gruesas en la resistencia al cortante tangencial.

La selección de los árboles se realizó, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- a. Fuste recto y crecimiento “normal”, sin muestras de daño en su tronco principal por plagas, enfermedades o daños mecánicos.
- b. Diámetro a 30 cm de altura de la superficie entre 0,3 a 0,35 m, el cual se tomó con la ayuda de una forcípula.
- c. Distancia mayor a 10 m, en relación con el árbol vecino.

Morales⁸⁹, afirma que: “La decisión de muestrear una variable de crecimiento subterráneo (raíces) teniendo en cuenta un parámetro de la parte aérea (diámetro) está asociado al supuesto de que existe una relación directamente proporcional entre ambas variables”

3.2.1 Fase de campo. Los seis árboles seleccionados fueron caracterizados dasométricamente, utilizando una vara graduada, forcípula y cinta métrica para determinar altura, diámetro del fuste y radio de copa, respectivamente. Para mantener el suelo libre de arvenses, dos semanas antes del inicio de los muestreos y a lo largo de los mismos, se realizaron desyerbas en el área aledaña a los árboles, disminuyendo la presencia de raíces que pudieran interferir en los resultados.

3.2.2 Distribución de raíces primarias. Para conocer la distribución radical de los árboles seleccionados; estos fueron excavados en seco con el método “skeleton”⁹⁰, el cual consiste básicamente en excavar el suelo iniciando desde la base del fuste de los árboles y siguiendo el curso de las raíces en las masas de suelo en un semicírculo de 2 metros de radio y hasta una profundidad aproximada de 1 m. Para excavar el suelo se usaron: palas, palínes y herramientas pequeñas como cuchillos.

De esta manera se ubicó el sistema de raíces. Con un pie de rey se tomó el diámetro inicial y con una cinta métrica se registró la profundidad respecto a la superficie del suelo, basado

⁸⁹MORALES E. Arquitectura y distribución espacial de raíces de *Eucalyptus deglupta* dentro de un sistema agroforestal simultáneo con *Coffea arabica*. Turrialba, 1997, 122 p. Trabajo de grado (Master of Science) [en línea]. CATIE. Disponible en Internet: <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/>

⁹⁰BÖHM, W. Methods of studying root systems. Berlín: Springer-Verlag, 1979. p. 14.

en métodos para muestreo de raíces, realizados por Barrera⁹¹, Dhyani et al⁹² y Groot y Soumaré⁹³ (Figura 3).

Para conocer la profundidad alcanzada por la raíz pivotante se excavó siguiendo su curso hasta su profundidad máxima. Para conocer el crecimiento y desarrollo se realizaron mediciones del diámetro de la misma cada 10 cm de longitud, basado en Vanlauwe et al⁹⁴. Para medir la extensión y longitud (Anexo C) de las raíces laterales primarias, se seleccionaron dos raíces por árbol, estas se excavaron siguiendo su trayectoria desde su ramificación en el tallo hasta el ápice de la raíz, basado en Groot y Soumaré⁹⁵. Una vez descubiertas las raíces se determinó el diámetro cada 20 cm con la ayuda de un pie de rey y se registro la longitud y extensión de las mismas, con la ayuda de una cinta métrica flexible.

3.2.3 Pruebas de resistencia del suelo al cortante tangencial (RCT) e influencia de raíces gruesas. Con el objeto de evaluar el efecto de las raíces gruesas en la resistencia del suelo al cortante tangencial, esta propiedad (variable) se midió en condiciones de campo en el área de influencia de dos árboles de *A. pennatula* y en un árbol de *S. spectabilis*. Se utilizó un aparato de torsión con cuchillas (Torvane metálico Pilkon®) de 19 mm de diámetro y 33 mm de largo con registro máximo de 140 kPa.

➤ **Determinación de puntos de muestreo.** Se tomaron 45 sitios por árbol, para analizar dos factores: distancia del fuste (1,7; 3,4 y 5,1 m) y profundidad en el perfil (0-25, 25-50, 50-75, 75-100 y 100-125 cm), tomando tres direcciones como réplicas, teniendo en cuenta la pendiente (eje A, arriba de la pendiente; eje B, abajo de la pendiente y eje C, perpendicular a la pendiente); basado en metodología para muestreo de raíces descrita por Donoso et al⁹⁶ (Figura 4 a). Las tres distancias y las cinco profundidades se constituye en los factores a evaluar en este estudio.

⁹¹BARRERA, Op. cit., p. 52.

⁹²DHYANI, NARAIN, and SINGH, Op. cit., p. 149 – 161.

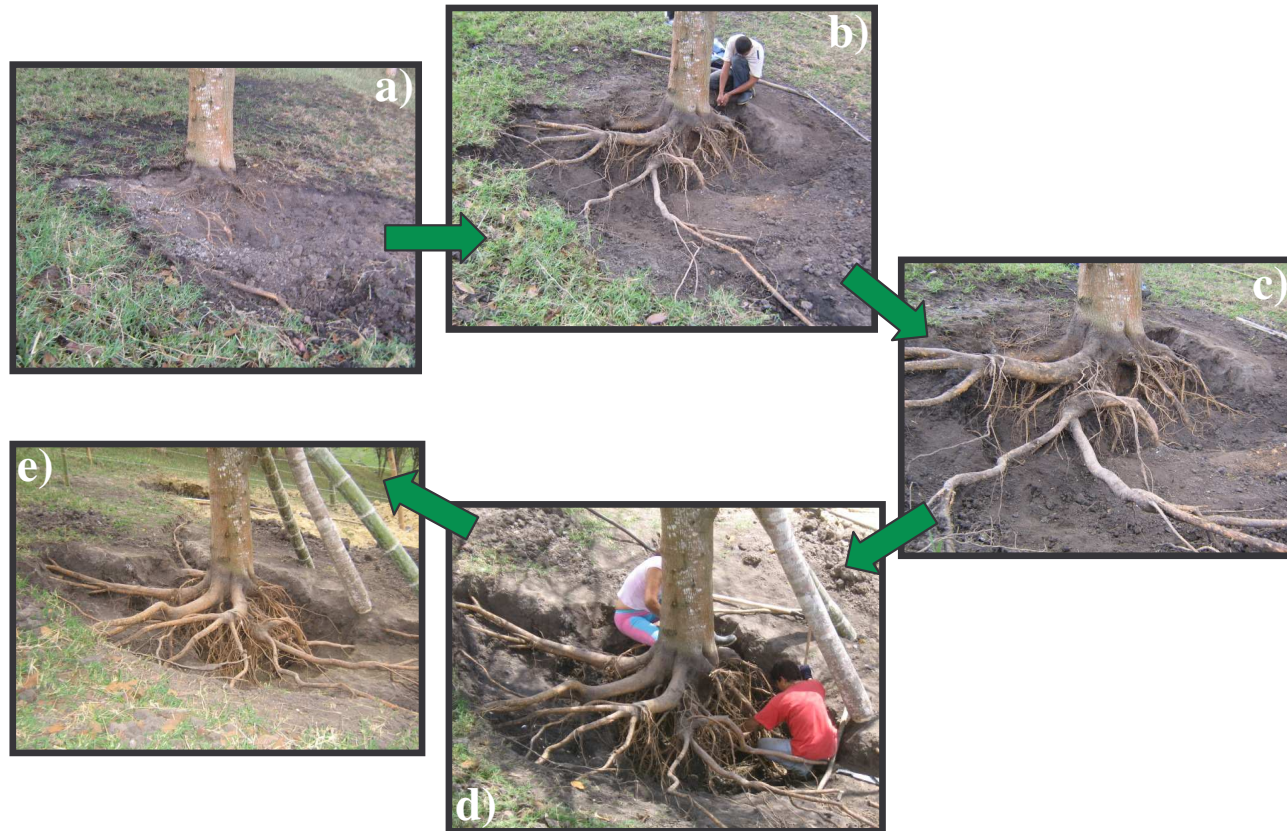
⁹³GROOT and SOUMARE, Op. cit., p. 9.

⁹⁴VANLAUWE, B. et al. Root distribution of *Senna siamea* grown on a series of derived savana zone soils in Togo, West Africa. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 54, no. 1 (ene. 2002); p. 3.

⁹⁵GROOT and SOUMARE, Op. cit., p. 9.

⁹⁶DONOSO, S.; RUIZ, F. y HERRERA, M. Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus globulus*. [en línea]. En: Revista de Ciencias Forestales Universidad de Chile. Santiago. Vol. 16, no. 1–2 (2001); p. 6.
Disponible en Internet: <http://revistacienciasforestales.uchile.cl/>

Figura 3. Secuencia de metodología empleada para conocer la distribución de raíces primarias en *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a) Plateo en el área cercana al fuste; b, c y d) proceso de excavación, e) finalización de excavación y medición de diámetro y número de raíces primarias.



Fuente: este estudio.

En los tres ejes y distancias, se excavaron calicatas de 70 x 90 cm y 125 cm de profundidad (nueve calicatas por árbol). En cada una de las calicatas se tomó la resistencia al cortante tangencial, a las cinco profundidades y efectuando tres lecturas a 5, 10 y 15 cm de profundidad por sitio de medición; para un total de 405 mediciones por árbol (Figura 4). Adicionalmente se ubicó un sitio cercano, fuera de la influencia del sistema radical arbóreo y se tomó la resistencia al cortante tangencial en cada una de las profundidades objeto de estudio con tres repeticiones y constituyéndose en el testigo del experimento.

Para determinar la influencia de raíces gruesas $\geq$ a 2 mm de diámetro en la resistencia al cortante, en cada uno de los sitios de medición (Figura 4), se tomaron muestras de suelo-raíz con cilindros metálicos de 8,45 cm de diámetro por 25 cm de largo, obteniendo una muestra de 1401,98 cm³. Los cilindros fueron introducidos en el suelo con la ayuda de un mazo de metal y tacos de madera. Las muestras tomadas se empacaron cuidadosamente en bolsas plásticas con su identificación respectiva y se transportaron al CIAT donde fueron guardadas en el cuarto frío a 7 °C (Figura 5)

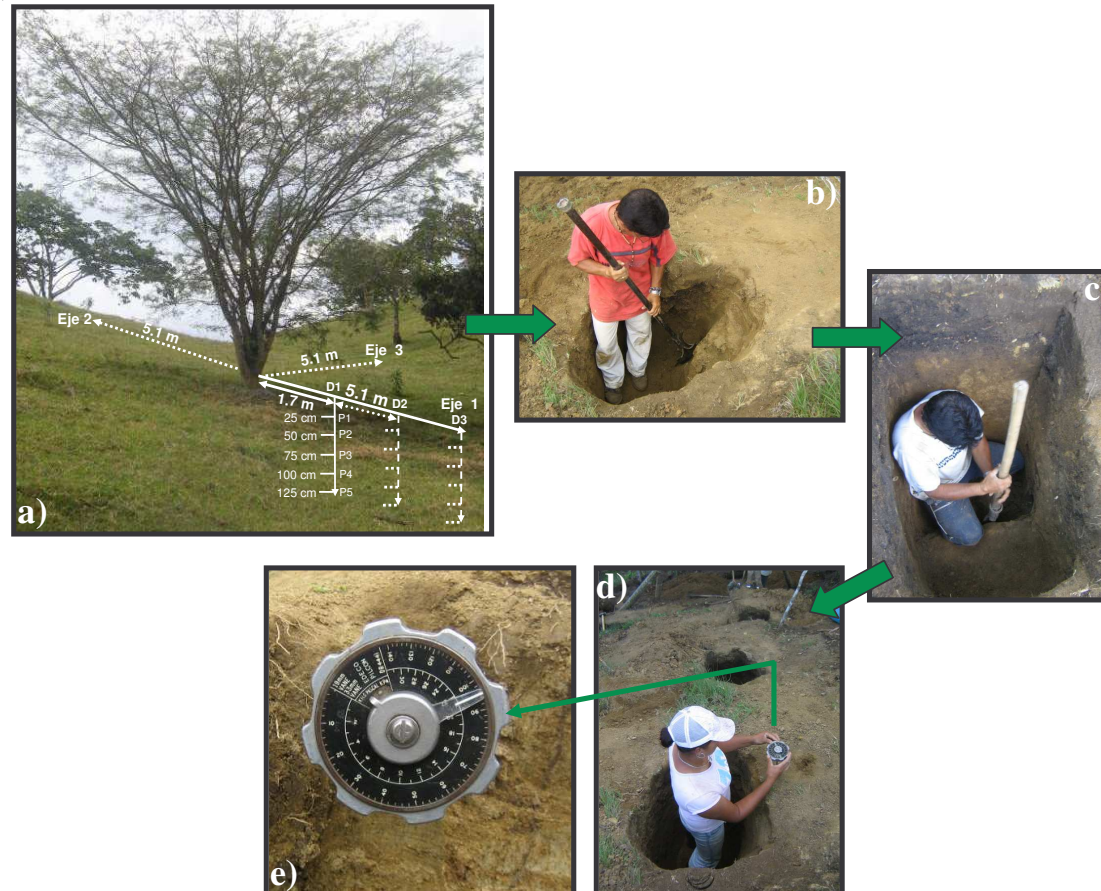
3.2.4 Propiedades físicas y químicas del suelo. Con el objeto de observar el comportamiento de algunas condiciones físicas del suelo que pudieran influir en la distribución del sistema radical de las especies arbóreas evaluadas y en la Resistencia al Cortante Tangencial en cada sitio de medición de la resistencia al cortante, se tomó una muestra de suelo sin disturbar en cilindros de 5 cm de diámetro x 2,5 cm de altura, para determinar las variables: densidad aparente, densidad real, porosidad total, retención de humedad, tamaño de poros y agua aprovechable. Para calcular la textura, en cada árbol a 30 cm del fuste y a las cinco profundidades estudiadas se tomaron muestras de suelo. Para la caracterización química del área de estudio, en uno de los árboles se tomaron muestras de suelo de 0 - 25; 25 - 50; 50 - 75; 75 - 100 y 100 - 125 cm de profundidad (sin repeticiones). Las respectivas metodologías se describen más adelante.

3.3 FASE DE LABORATORIO

3.3.1 Densidad de longitud de raíces gruesas (DLR). Para la evaluación de esta variable se siguió la metodología descrita por Morales⁹⁷, la cual consiste en lavar las muestras de suelo-raíz obtenidas con el cilindro, con abundante agua corriente. Las muestras fueron inicialmente sumergidas en agua durante 16 horas, luego se decantaron por un juego de tamices de diámetro de malla de 1,5; 1,0 y 0,5 mm. Este proceso se repitió hasta no encontrar más raíces en el suelo. Las raíces resultantes se empacaron en bolsas plásticas debidamente marcadas y fueron almacenadas en la nevera a 5 °C, para su posterior separación (Figura 6).

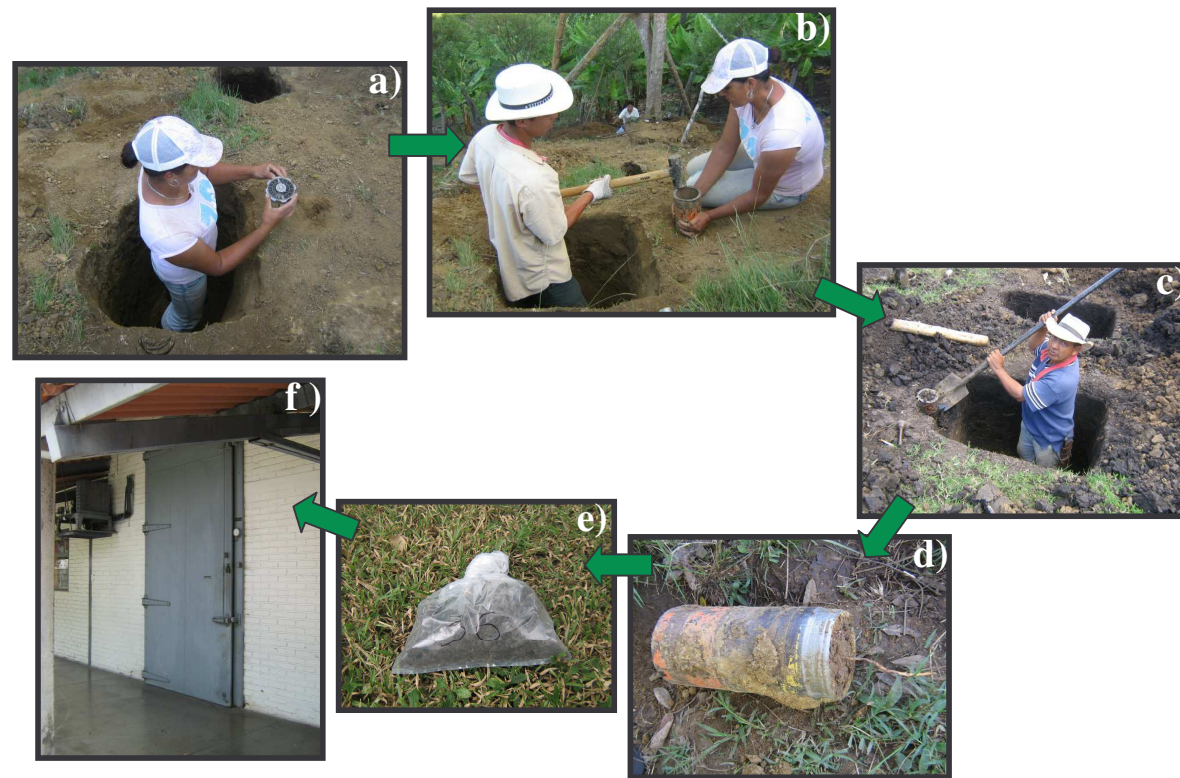
⁹⁷MORALES, Op. cit., p. 33-36.

Figura 4. Distribución de puntos de muestreo para evaluar la influencia de raíces en la resistencia al cortante tangencial en *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a) Diseño de muestreo, b y c) excavación de calicatas, d) Registro de la resistencia al cortante tangencial e) Torvane



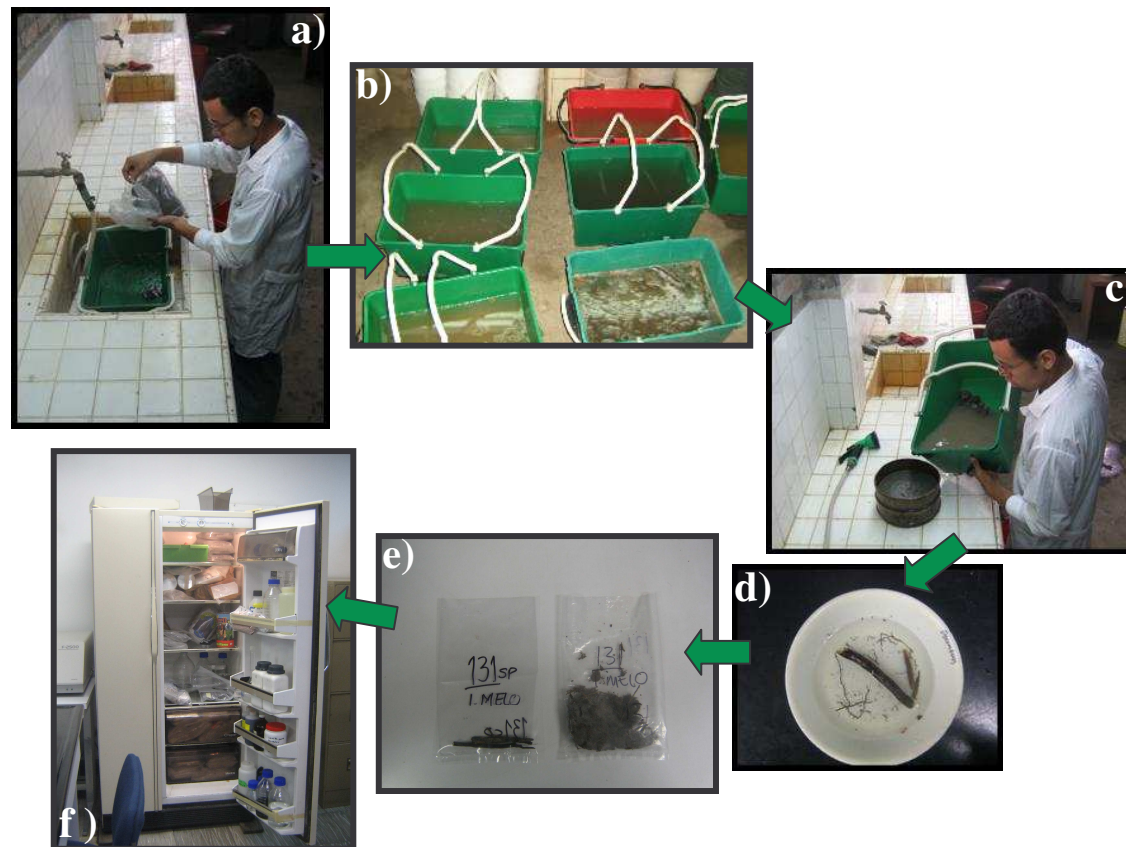
Fuente: este estudio.

Figura 5. Secuencia metodológica para la toma de muestras de suelo-raíz en *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a) Registro de la RCT, b) toma de muestras con el cilindro metálico, c) extracción del cilindro, d) cilindro con muestra de suelo-raíz, e) muestra empacada, f) almacenaje en muestras en cuarto frío del CIAT.



Fuente: este estudio.

Figura 6. Separación de raíces gruesas de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a y b) muestras de suelo-raíz sumergidas en agua, c) decantación de las muestras por juego de tamices, d) separación de las raíces, e) empaque de las muestras de raíces recolectadas, f) almacenaje de las raíces para su posterior cuantificación.



Fuente: este estudio.

Para la separación de las raíces gruesas, de impurezas, materia orgánica y otras raíces; se utilizaron pinzas y se seleccionaron en agua. La separación de las raíces vivas de las muertas, se basó en el conocimiento de la morfología de la raíz como criterio principal, esto incluye la coherencia de tejidos dentro del cilindro central de las raíces, el color, la flexibilidad de la raíz y la apariencia en general, basado en Vanlauwe et al⁹⁸.

Las raíces separadas fueron “escaneadas” utilizando bandejas de vidrio de diferentes tamaños y de 1 cm de alto. En las bandejas fueron distribuidas las muestras de raíces aleatoriamente con agua, evitando en lo posible la sobreposición de raíces o traslapes. Para esta fase se utilizó un procesador Intel Pentium 4 y un escáner EPSON-Expresión 1680 de alta resolución (Figura 7); con ayuda del procesador la muestra de raíces se digitalizó y la información obtenida, fue almacenada en un archivo electrónico bajo la extensión TIFF (Anexo B).

Las imágenes digitales se cuantificaron con el Software WinRHIZO Pro ® 2003 (Regent Instrument Inc. Canadá), según Schlönvoigt et al⁹⁹ este programa usa la proyección de la imagen de la raíz para medir la longitud total y las clases diamétricas (Anexo B). El programa guarda los resultados del análisis automáticamente en tablas, que se leen directamente en el programa MS Excel. La longitud radical obtenida por punto de muestreo, es dividida por el volumen total de la muestra, obteniendo la densidad de longitud radical (relación entre la longitud radical y el volumen de suelo de la muestra, expresada en cm de raíz por cada cm³ de suelo).

3.3.2 Muestras no disturbadas de suelo. Los anillos tomados se llevaron a la mesa de tensión, en las ollas y platos de presión y succión, con el objeto de determinar la capacidad del suelo para retener agua (humedad volumétrica a 75, 1000 y 15000 cm de succión), lámina de agua aprovechable y porosidad funcional (macro, meso y microporos).

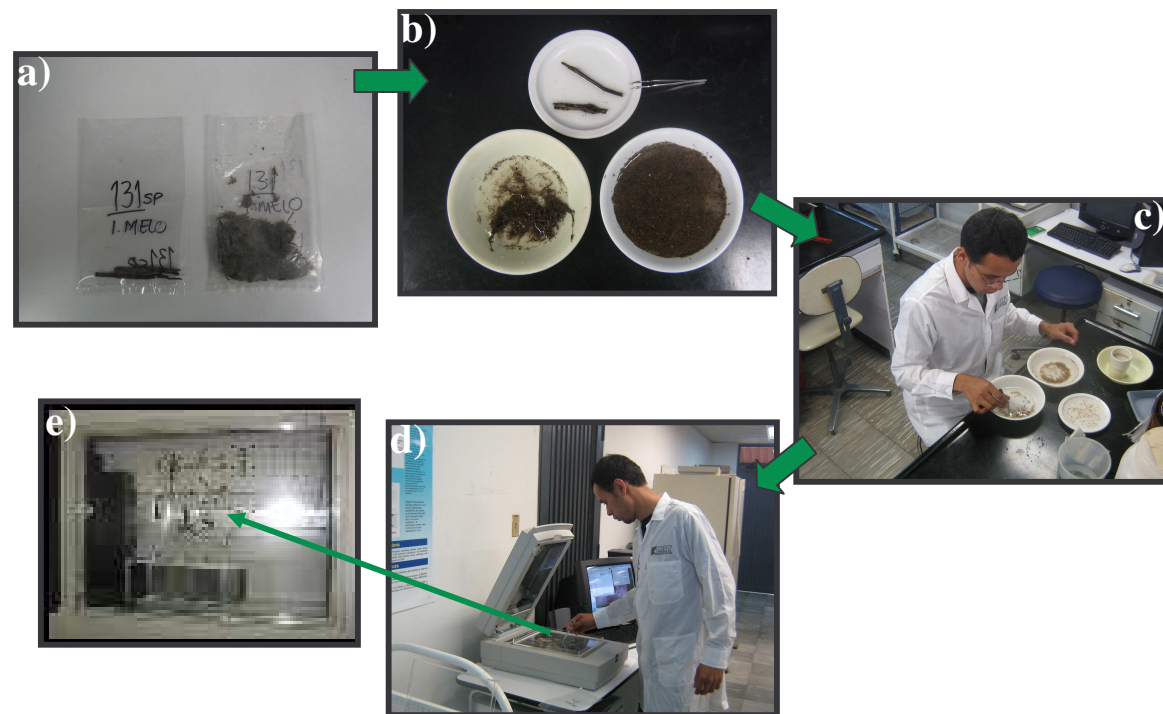
➤ **Humedad volumétrica a 75 cm de succión (%).** Esta determinación se realizó a partir del peso obtenido después de llevar las muestras a 75 cm de succión en la mesa de tensión, conociendo el peso seco de la muestra, mediante la siguiente formula:

$$Hvol75\text{ cm} = \frac{Msh75cm - Mss}{Mss} \times \frac{Das}{Daa} \times 100$$

⁹⁸VANLAUWE et al, Op. cit., p. 3.

⁹⁹SCHLÖNVOIGT, A. et al. Estudios Ecológicos de Raíces en Sistemas Agroforestales: Experiencias Metodológicas en el CATIE. Turrialba: CATIE, 2000. p. 30-33

Figura 7. Selección de raíces gruesas y digitalización de muestras de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a) muestras de raíces, b) muestras de raíces en agua para selección c) separación de raíces gruesas vivas, d) distribución de raíces en el scanner, e) digitalización de raíces.



Fuente: este estudio.

Donde, $H_{vol75\text{ cm}}$, es humedad volumétrica a 75 cm de succión (%); $M_{sh75\text{cm}}$, es masa del suelo húmedo a 75 cm de succión (g); M_{ss} , es masa del suelo seco a 105 °C (g); D_{as} , es densidad aparente del suelo (g cm^{-3}) y D_{aa} , es densidad del agua (g cm^{-3}).

➤ **Distribución del tamaño de poros.** Su determinación se realizó equilibrando las muestras a columnas de 0 y 75 cm de succión en la mesa de tensión a 1000 y 15000 cm (1 y 15 bares de succión) en las ollas y platos de presión respectivamente, lo cual permite determinar la capacidad del suelo para retener agua, agua aprovechable (lámina de agua) y su porosidad funcional (macro, meso y microporos).

➤ **Densidad aparente (Mg m^{-3}).** Se determinó por el método del cilindro del volumen conocido, a partir de la siguiente ecuación:

$$D_a = \frac{M_{ss}}{V_c}$$

Donde, D_a , es densidad aparente del suelo, (g cm^{-3}); M_{ss} , es masa de suelo seco a 105 °C, (g); V_c , es volumen del cilindro, donde se tomó la muestra de suelo, (cm^3).

3.3.3 Muestras disturbadas.

➤ **Textura (% Arena, % Limo, % Arcilla).** Se hizo siguiendo el método de Bouyoucos, el cual permite conocer la textura determinando el cambio de densidad de la suspensión, a través del tiempo.

➤ **Densidad real (Mg m^{-3}).** Por el Método del Picnómetro, el cual se basa en la determinación de la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un volumen de frasco conocido. Los cálculos se hicieron a partir de la siguiente ecuación:

$$D_r = \frac{M_{ss}}{V_{ss}}$$

Donde, D_r , es densidad real, (g cm^{-3}); M_{ss} , es masa de suelo seco, (g); V_{ss} , es volumen de suelo seco, (cm^3).

➤ **Porosidad total.** Se obtuvo con los datos de densidad real y densidad aparente mediante la siguiente relación:

$$VTP = \frac{(1 - \frac{Da}{Dr})}{Dr} \times 100$$

Donde, VTP, es volumen total de poros, (%); Da, es densidad aparente, (g cm⁻³); Dr, es densidad de las partículas, (g cm⁻³).

➤ **Propiedades químicas.** Fueron realizadas por el laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT, cuyas metodologías se fundamenta en McKean¹⁰⁰. El análisis incluyó la determinación de:

pH: mediante el pH-metro. Materia Orgánica: por el método de Walkey y Black. Fósforo: extracción por el Método Bray II y lectura por el método Murphy. Calcio, magnesio, potasio y sodio: con acetato de amonio y determinación por absorción atómica. Azufre: por extracción con (Ca [H₂PO₄] 2H₂O) determinación por turbidimetría con BaCl₂. Boro: por extracción con acetato de amonio, BaCl₂ y determinación por colorimetría. Cobre, hierro, manganeso y zinc: por extracción con solución de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.

3.4 ANALISIS ESTADÍSTICO

Este experimento se constituye en un estudio de caso para los dos árboles de *Acacia pennatula* y para el árbol de *Senna spectabilis*, donde se evaluaron los efectos simples de los factores: distancia del fuste (1,7, 3,4 y 5,1 m) y profundidades (0-25, 25-50, 50-75, 75-100 y 100-125 cm). A las variables evaluadas se les efectuó una prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado), mediante el paquete estadístico Infostat ®. Para el análisis de las variables se hicieron análisis de regresión simple, en los cuales la variable respuesta fue la RCT y la variable aleatoria era cada una de las variables evaluadas. Para el análisis de las propiedades físicas, se realizaron pruebas de comparación de medias (Test de Duncan al 95 %), por especie, además se aplicaron modelos de regresión para cada una de ellas (R² > 0.7). Los valores encontrados para la distribución de raíces primarias, fueron analizados mediante estadística descriptiva: medias y coeficientes de variación; por el comportamiento irregular que presentó esta variable, su descripción se realizó por separado para cada uno de los árboles investigados.

¹⁰⁰McKEAN, S. J. Manual de Análisis de suelos y tejido vegetal. Una guía teórica y práctica de metodologías. Cali: CIAT, 1993; 103 p. (Documento de Trabajo No. 129)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO

De acuerdo al análisis químico (Tabla 2) los suelos de la zona de estudio son moderadamente ácidos con fertilidad media. Presentan alta disponibilidad de potasio, calcio y magnesio; niveles adecuados de materia orgánica, sodio, azufre, boro, manganeso y cobre, además, concentración media de hierro y disponibilidad baja de fósforo y zinc.

Según Bernal¹⁰¹ la disponibilidad baja de fósforo puede restringir el crecimiento de las raíces en algunas especies vegetales, en este sentido Ryser¹⁰² manifiesta que los requerimientos de fósforo afectan la morfología radical, sin embargo estas deficiencias de tipo nutricional sumado a factores limitantes en la parte aérea, pueden influenciar un aumento en la exploración del terreno y por tanto una longitud radical mayor en especies vegetales.

Tabla 2. Caracterización química del perfil de suelo, en Bolívar, Valle del Cauca.

Prof. cm	pH	MO (%)	K	Ca	Mg	Na	CIC	P	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn
cmol kg ⁻¹							mg kg ⁻¹							
0-25	6,0	4,0	0,6	14,1	7,9	0,1	26,2	1,0	17,0	0,5	8,6	20,1	2,9	0,9
25-50	5,9	1,2	0,3	12,0	11,3	0,2	27,3	0,3	21,3	0,3	21,9	10,8	3,6	0,6
50-75	6,1	0,9	0,2	13,8	13,8	0,3	31,3	0,4	19,1	0,3	28,2	13,1	2,9	0,6
75-100	6,5	0,6	0,1	21,1	18,8	0,6	44,3	1,4	18,5	0,2	8,6	13,3	1,3	0,4
100-125	6,9	0,3	0,1	20,5	16,7	0,5	36,5	12,3	19,8	0,2	15,5	8,8	0,8	0,4

Fuente: este estudio

La reacción del suelo tiende a la neutralidad, el calcio, el magnesio, el sodio y la capacidad de intercambio catiónico, se incrementan a través del perfil del suelo, mientras el contenido de materia orgánica, potasio, boro, cobre y zinc tiende a disminuir en profundidad. El fósforo, hierro y azufre, presenta fluctuaciones en el perfil del suelo.

¹⁰¹BERNAL, E. J. Pastos y forrajes Tropicales: Producción y manejo. Bogotá: Banco Ganadero, 1994, p. 60

¹⁰²RYSER, Op. cit., p. 1-2.

4.2 CARACTERIZACIÓN DASOMÉTRICA DE *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*

En la tabla 3, se presentan las características dasométricas principales de las especies forestales evaluadas. Los árboles de *A. pennatula* y *S. spectabilis* tienen en promedio una altura total de 8,00 y 7,00 m; altura comercial de 0,66 y 1,49 m; diámetro de 0,35 y 0,31 m y radio de copa de 6,10 y 5,08 m, respectivamente. Los datos anteriores concuerdan parcialmente con los reportados por Tokura et al¹⁰³ para la especie *Senna*, no obstante, en este libro el trapichero aparece con el nombre científico de *Poponea* sp., clasificación taxonómica incorrecta. El mismo autor reporta que estas especies forestales se encuentran en el Valle del Cauca formando sistemas silvopastoriles como sombrío para el ganado, cercas vivas y barreras rompevientos. Por tratarse de especies que en estado adulto alcanzan gran tamaño, Barrera¹⁰⁴ afirma que el peso de la biomasa se convierte en una gran carga normal que mejora la cohesión del suelo, y por lo tanto se aumenta en gran medida la resistencia del suelo al cortante tangencial.

Tabla 3. Características dasométricas evaluadas en *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*.

Especie	Altura total (m)	Altura comercial (m)	Diámetro* (m)	Radio de copa (m)
<i>Acacia pennatula</i> 1	7,80	0,54	0,35	5,40
<i>Acacia pennatula</i> 2	8,00	0,35	0,35	6,20
<i>Acacia pennatula</i> 3	8,20	1,10	0,34	6,70
Promedio	8,00	0,66	0,35	6,10
<i>Senna spectabilis</i> 1	7,40	1,23	0,30	4,35
<i>Senna spectabilis</i> 2	6,70	1,28	0,32	5,10
<i>Senna spectabilis</i> 3	6,90	1,95	0,30	5,80
Promedio	7,00	1,49	0,31	5,08

* El diámetro de los árboles se tomó a 30 cm de la superficie del suelo. Fuente: este estudio.

4.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS RAÍCES DE *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*

En *A. pennatula* las raíces vivas finas son de color amarillo y las gruesas amarillas con algunos tonos rosa pálidos; las raíces muertas son de color gris en la corteza y marrón en el

¹⁰³TOKURA et al, Op. cit., p. 287-297.

¹⁰⁴BARRERA, Op. cit., p. 72.

interior; presentan ausencia de ramificación en algunos segmentos y ramificación abundante en segmentos cortos, especialmente en la longitud final de las raíces.

Las raíces vivas de *S. spectabilis* son de color café, las más finas presentan una corteza débil de color negro; las raíces gruesas son grisáceas con variaciones a tonos café claro. Las raíces muertas son de color negro y café oscuro. El sistema radical de esta especie presenta ausencia de ramificación en la mayor parte de la longitud radical, a excepción de algunos segmentos localizados en la parte media y al final de la raíz.

Las raíces finas de *S. spectabilis* son menos resistentes a esfuerzos de tensión (se rompen con facilidad) en comparación con las raíces de *A. pennatula*. Al respecto, Bransby et al¹⁰⁵ proponen que las pruebas de elementos radicales son requeridas para cuantificar las propiedades mecánicas de estas, permitiendo de esta manera la investigación de la interacción raíz-suelo, con el objeto de evaluar su contribución en la estabilidad de laderas, mediante modelos de refuerzo teórico como el propuesto por Wu¹⁰⁶.

4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS RADICALES DE *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*

4.4.1 Raíces primarias de *Acacia pennatula*. El sistema radical del primer árbol de *A. pennatula* se constituía de 12 raíces primarias, con diámetros entre 61,50 a 200 mm. (Tabla 4). La inclinación del terreno posiblemente influyó en el crecimiento del sistema radical de éste árbol; nueve raíces primarias crecieron hacia arriba de la pendiente, incluyendo la pivotante; buscando posiblemente mediante este mecanismo una mayor estabilidad de su biomasa aérea, para evitar su volcamiento por efecto del viento, al respecto van Noordwijk et al¹⁰⁷ plantea que “las raíces mas gruesas cercanas al tronco del árbol ayudan a fijar la planta al terreno”. Estas permiten adicionalmente dar una mayor cohesión al terreno mediante ese refuerzo mecánico, contribuyendo así en la prevención de movimientos masales en laderas arborizadas (Figura 8 a).

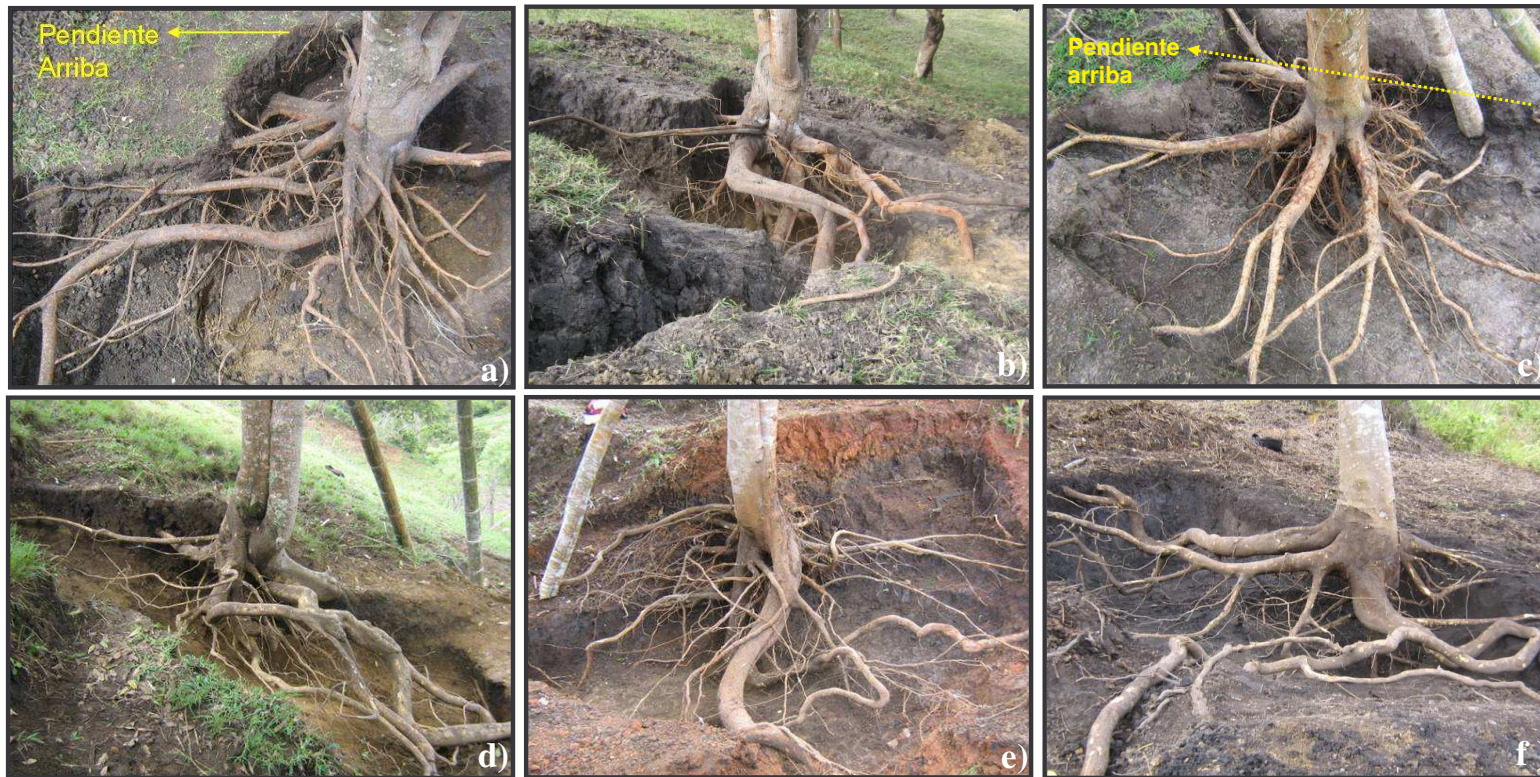
En el segundo árbol de *A. pennatula*, el sistema radical lo conformaban ocho raíces primarias con diámetros entre 110 a 152 mm. La presencia de raíces finas en comparación con el primer árbol fue inferior (Figura 8b). El sistema de raíces del tercer árbol de *A. pennatula*, estuvo constituido por una red compleja de raíces finas (< 2 mm de diámetro) y

¹⁰⁵BRANSBY et al, Op. cit., p. 1-2.

¹⁰⁶WU, T. H. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island. Geotech. Eng. Rep. 5 Civil Eng. Dep. Ohio State University Columbus Ohio, USA, 1976. 93 p.

¹⁰⁷VAN NOORDWIJK, M.; SPEK, L. Y. and PURNOMOSIDHI, P. Quantifying shallow roots: Tree geometry makes root research easy. En: Agroforestry Today. Vol. 7, no. 2. (apr.-jun. 1995); p. 9.

Figura 8. Sistemas radicales de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a, b y c) *A. pennatula*; d, e y f) *S. spectabilis*



Fuente: este estudio.

gruesas (entre 5 y 10 mm de diámetro), concentradas en la región más cercana al fuste; del tallo se desprendían 11 raíces primarias con diámetros entre 65 a 250 mm. Las raíces, en general, presentaron un patrón de crecimiento similar al encontrado en el primer árbol, creciendo siete raíces primarias hacia arriba de la pendiente (Figura 8 c).

Tabla 4. Raíces primarias de los sistemas radicales de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*.

No Raíces	<i>A. pennatula</i> 1	<i>A. pennatula</i> 2	<i>A. pennatula</i> 3	<i>S. spectabilis</i> 1	<i>S. spectabilis</i> 2	<i>S. spectabilis</i> 3
	Diámetro raíz (mm)			Diámetro raíz (mm)		
1	77,5	127,5	110	133	104	192,5
2	200	110	65	103	78	121
3	61,5	146	133	93	105,5	118
4	88,5	112,5	119	135	78,0	162,5
5	83	110	111	187,5	70	145
6	79	152	83,5	145,5	60	88
7	91	105,5	138		251	
8	90	145	103		117,5	
9	115		123,5		162	
10	135		132,5			
11	125		250			
12	115					
Promedio	105	126,6	124,4	132,8	114	137,8
Promedio general		118,5			128,2	
C.V.		31,8			36,4	

Fuente: este estudio

Los árboles de *A. pennatula* estaban conformados en promedio por diez raíces primarias con diámetro de 118,5 mm. Los resultados encontrados, concuerdan con los reportados para una especie del género *Acacia* evaluada por Toky y Bisht¹⁰⁸, quienes al investigar el sistema radical de algunas especies forestales de seis años de edad en una región árida del noroeste de India, encontraron que el sistema de raíces de *Acacia catechu* se constituía en promedio por $13 \pm 3,8$ raíces primarias.

La presencia alta de raíces finas en la parte más cercana al fuste de los árboles evaluados, sugiere que para labores de fertilización sea recomendable desarrollarla a manera de aplicación en corona, a una distancia del tallo menor a 1,5 m, donde se encontró una alta proporción de este tipo de raíces. Estudios de Morales y Beer¹⁰⁹ en sistemas agroforestales

¹⁰⁸TOKY and BISHT, Op. cit., p. 245-263

de *Eucalyptus deglupta* y *Coffea arabica*, sugieren que en los primeros 5 a 7 años de edad se podría añadir fertilizante adicional hasta unos dos metros de distancia del eje del árbol, logrando posiblemente un impacto positivo en la producción conjunta de café y madera; sin embargo, plantean que en los siguientes años se debería fertilizar a distancias mayores, hasta llegar al punto medio entre dos árboles vecinos.

4.4.2 Raíces primarias de *Senna spectabilis*. Los árboles de *S. spectabilis* en comparación con los de *A. pennatula* mostraron una presencia menor de raíces finas en el área cercana al tronco, pero mayor de raíces gruesas, con diámetro superior a 5 mm (Figura 8; d, e y f). De acuerdo a los datos obtenidos (Tabla 4), el sistema radical del primer árbol de *S. spectabilis*, se constituía de seis raíces primarias con diámetros entre 93 a 187,5 mm.

El sistema de radical del segundo árbol de *S. spectabilis* estaba conformado por una red compleja de raíces gruesas concentradas en la región más cercana al tallo; del fuste se desprendían nueve raíces primarias, con diámetros entre 60 a 251 mm.

En el tercer árbol, el sistema de raíces lo conformaron seis raíces primarias, con diámetro entre 88 a 192,5 mm, la presencia de raíces finas en comparación con el primer árbol excavado fue inferior.

En promedio los árboles de *S. spectabilis* presentaron siete raíces primarias con diámetro de 128,2 mm; en comparación con los árboles de *Acacia*, *Senna* estaba conformado por un número menor de raíces primarias.

4.4.3 Raíz pivotante de los sistemas radicales de *Acacia pennatula*. De acuerdo a los datos obtenidos (Tabla 5), la raíz pivotante del primer árbol con 115 mm de diámetro, creció inicialmente con geotropismo positivo hasta una profundidad máxima de 93 cm, una capa de arcilla, al parecer, impidió su penetración vertical, dirigiendo entonces su desplazamiento de manera horizontal hacia arriba de la pendiente a una profundidad promedio de 60 cm (Figura 9 a), alcanzando 11,4 m de longitud radical y 7,5 m de extensión horizontal radical.

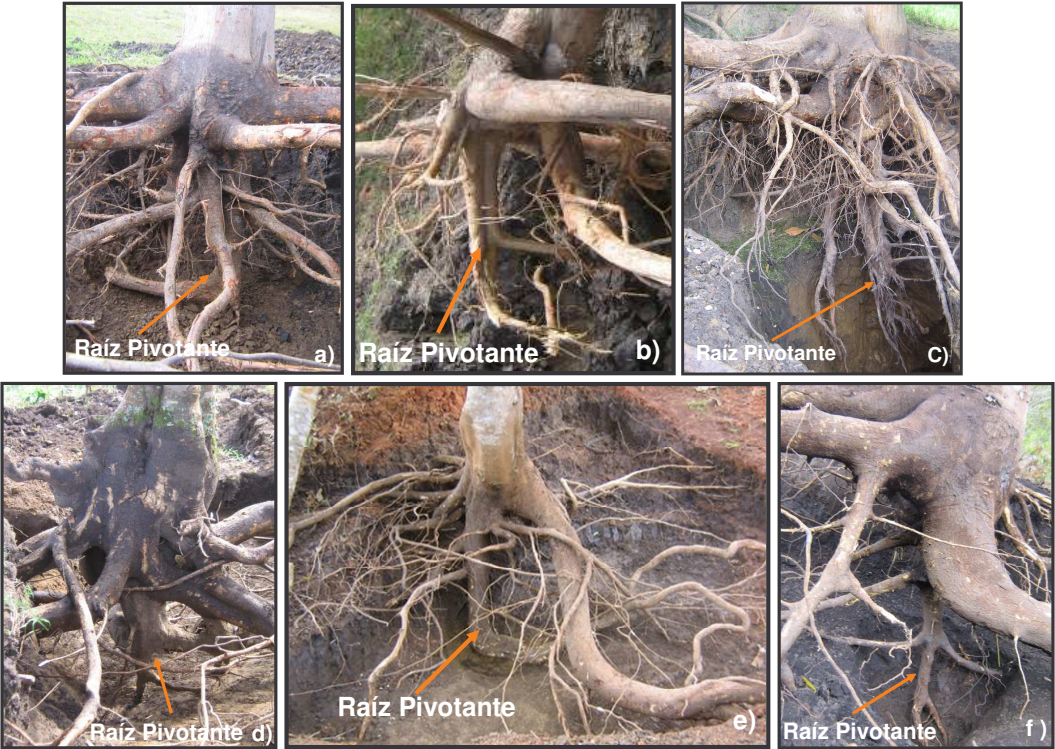
¹⁰⁹MORALES, E. y BEER, J. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba. Vol. 5, no. 17-18 (ene-jun. 1998); p. 48.

Tabla 5. Características de crecimiento de la raíz pivotante en sistemas radicales de *Acacia pennatula*.

Especie	Diámetro raíz (m)	Profundidad máxima (m)	Longitud raíz (m)	Extension horizontal raíz (m)
<i>Acacia pennatula</i> 1	115	0,93	11,40	7,50
<i>Acacia pennatula</i> 2	145	2,76	5,36	2,30
<i>Acacia pennatula</i> 3	250	1,35	1,16	0,48
Promedio	170	1,7	6	3,4
C.V.	42	57	86	106

Fuente: este estudio.

Figura 9. Raíz pivotante en árboles de *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*. a, b y c) Árboles de *A. pennatula*; d, e y f) Árboles de *S. spectabilis*



Fuente: este estudio

En la tabla 6 se muestra el porcentaje de arenas, limos y arcillas que presenta el perfil del suelo en el que creció este árbol. Se encontró que la textura predominante en el perfil es de tipo arcilloso, con contenidos que tienden a aumentar hasta los 100 cm de profundidad, mientras los porcentajes de limos y arenas disminuyen.

Tabla 6. Porcentaje de arcillas, limos, arenas y clase textural en la zona de crecimiento de la raíz pivotante en *Acacia pennatula*.

Prof. cm	<i>Acacia pennatula</i> 1				<i>Acacia pennatula</i> 2				<i>Acacia pennatula</i> 3			
	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura
0-25	28,2	29,1	42,7	Ar	40,5	29,4	30,1	Fr	33,4	30,9	35,7	FrAr
25-50	23,9	21,5	54,6	Ar	41,8	28,3	29,9	FrAr	33,5	29,6	36,9	FrAr
50-75	16,2	20,9	62,9	Ar	55,6	20,8	23,6	FrArA	31,7	24,7	43,6	Ar
75-100	16,7	20,8	62,5	Ar	48,0	28,5	23,5	Fr	22,7	34,2	43,0	Ar
100-125	17,2	22,0	60,9	Ar	69,3	17,4	13,2	FrA	19,9	39,3	40,8	Ar

Ar: Arcillosa; FrArA: Franco arcillo arenoso; F: Franca; FrA: Franco arenoso; FAr: Franco arcilloso. Fuente: este estudio.

Según Montenegro¹¹⁰, los suelos en donde la arcilla predomina en más del 50 %, tienen tendencia a ser difíciles de manejar, son encharcables y pueden causar asfixia radical, lo anterior sugiere que la profundización de la raíz pivotante fue impedida al parecer, por el porcentaje alto de arcillas (62,9 %) presentes en el perfil de estos suelos. Al respecto, estudios de Groot y Soumaré¹¹¹ en árboles de sabanas semiáridas tropicales del oeste de África, reportan que la penetración de la raíz principal en *Acacia seyal*, fue impedida al parecer por una capa de arcilla dura.

En el segundo árbol la raíz pivotante con 145 mm de diámetro alcanzó una profundidad máxima de 2,76 m y una longitud radical de 5,36 m (Figura 9 b). Las pruebas texturales, mostraron que estos suelos presentan, principalmente, una textura Franca; los contenidos de arena presentan una tendencia de aumento al profundizar en el perfil del suelo, varían de 40,5 a 69,3 %; los limos y arcillas muestran fluctuaciones a través del perfil con una tendencia a disminuir, oscilan entre 29,4 a 17,4% y 30,1 a 13,2%, respectivamente (Tabla 6). Este tipo de textura al parecer favoreció el crecimiento vertical de la raíz principal en este árbol, al respecto Montenegro¹¹² explica que muchos investigadores han llegado a la conclusión que la textura mejor balanceada corresponde a los suelos francos, estos presentan una tendencia uniforme a retener, a la vez que permite la difusión de gases, de tal forma que las plantas no son afectadas o limitadas en sus funciones fisiológicas.

¹¹⁰MONTENEGRO, H. Propiedades físicas de los suelos en relación con la Fertilidad. En: Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2003. p.101.

¹¹¹GROOT and SOUMARÉ, Op. cit., p. 10.

¹¹²MONTENEGRO, Op. cit., p. 101

En el tercer árbol la raíz pivotante con 250 mm de diámetro, atravesó una capa de arcilla endurecida y alcanzó una profundidad máxima de 1,35 m y longitud radical de 1,16 m (Figura 9 c). El perfil del suelo presentó una textura Franco arcillosa en los primeros 50 cm de profundidad, luego una textura Arcillosa, el porcentaje de arcillas y limos varía de 35,7 a 43,6% y 30,9 a 39,3%; respectivamente, mientras las arenas disminuyen a través del perfil de suelo, fluctuando de 33,4 a 19,9% (Tabla 6). La cantidad de arcillas en estos suelos fue inferior en comparación con el suelo en el primer árbol, es posible que esta menor proporción de arcillas, influyera en una mayor profundización vertical de la raíz pivotante.

La raíz pivotante de *A. pennatula* presento en promedio diámetro de 170 mm alcanzó una profundidad máxima de 1,7 m, longitud radical de 6 m y extensión horizontal radical de 3,4 m; estos datos presentan un coeficiente de variación superior al 40%. Los anteriores datos indican que el crecimiento radical arbóreo es bastante heterogéneo, esto concuerda con lo manifestado por Van Noordwijk et al¹¹³ quienes plantean que la distribución radical tiende a ser bastante irregular, debido a la variabilidad que se presenta en el suelo.

4.4.4 Raíz pivotante de los sistemas radicales de *Senna spectabilis*. De acuerdo a los datos obtenidos (Tabla 7), la raíz pivotante del primer árbol con 145,5 mm de diámetro creció verticalmente hasta una profundidad de 66 cm, luego se desplazó horizontalmente a una profundidad promedio de 46,2 cm, alcanzando 26,1 m de longitud radical y 15,26 m de extensión horizontal radical (Figura 9 d).

Tabla 7. Características de crecimiento de la raíz pivotante en sistemas radicales de *Senna spectabilis*.

Especie	Diámetro raíz (m)	Profundidad máxima (m)	Longitud raíz (m)	Extension horizontal raíz (m)
<i>Senna spectabilis</i> 1	145,5	1,10	26,10	15,20
<i>Senna spectabilis</i> 2	251	1,39	32,80	22,80
<i>Senna spectabilis</i> 3	88	1,98	1,78	0,22
Promedio	161,5	1,5	20,2	12,7
C.V.	51	30	81	90

Fuente: este estudio.

El perfil del suelo en el que se desarrolló este árbol muestra una textura predominante de tipo arcilloso (> 40 %), los contenidos de limos y arcillas tienden a aumentar a través del perfil, mientras tanto las arenas muestran fluctuaciones hasta los 75 cm (Tabla 8). Los

¹¹³VAN NOORDWIJK, et al, Op. cit., p. 9.

problemas en cuanto al flujo de agua y aire asociados a este tipo de suelos, probablemente influyeron en la poca penetración vertical de la raíz pivotante y en el crecimiento paralelo a la superficie del terreno que desarrolló esta raíz.

En el segundo árbol, la raíz pivotante con 251 mm de diámetro creció verticalmente hasta una profundidad de 88 cm, luego dirigió su desplazamiento horizontalmente a una profundidad promedio de 72 cm, alcanzando 32,8 m de longitud radical y 22,8 m de extensión horizontal radical (Figura 9 e). El análisis textural (Tabla 8) muestra un perfil con una textura de tipo franco arcillosa; el porcentaje de arenas tiende a mantenerse relativamente constante, mientras el porcentaje de limos y arcillas, disminuye y aumenta, respectivamente, a través del perfil. Estos datos, sugieren que la profundidad de la raíz pivotante, estuvo, probablemente limitada por el contenido de arcillas.

La raíz pivotante del tercer árbol de *S. spectabilis*, con 88 mm de diámetro y 0,49 m de profundidad inicial, alcanzó una profundidad de 1,98 m y una longitud de raíz de 1,78 m. La clase textural predominante en el perfil del suelo fue de tipo Franco Arenosa (Tabla 8), el porcentaje de arenas aumenta, mientras que el porcentaje de arcillas y limos tienden a disminuir a través del perfil. La mayor presencia de arenas afecta positivamente el espacio aéreo del suelo, de tal forma que el crecimiento de la raíz a través del perfil del suelo no es afectado. Según Castro¹¹⁴ este tipo de suelos presenta una permeabilidad alta, baja retención de humedad y fertilidad natural baja.

Tabla 8. Porcentaje de arcillas, limos, arenas y clase textural en la zona de crecimiento de la raíz pivotante en árboles de *Senna spectabilis*.

Prof. cm	<i>Senna spectabilis</i> 1				<i>Senna spectabilis</i> 2				<i>Senna spectabilis</i> 3			
	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura
0-25	27,1	31,2	41,7	Ar	41,52	31,3	27,15	Fr	41,9	27,0	31,2	FrAr
25-50	21,7	35,2	43,1	Ar	40,1	30,1	29,7	FrAr	57,5	19,2	23,3	FrArA
50-75	15,6	36,8	47,5	Ar	40,4	23,7	35,9	FrAr	61,1	19,3	19,6	FrA
75-100	16,4	42,4	41,2	ArL	40,3	22,5	37,3	FrAr	60,9	20,7	18,4	FrA
100-125	23,1	45,9	31,0	FrAr	40,5	16,4	43,1	Ar	64,7	15,7	19,6	FrA

Ar: Arcillosa; ArL: Arcillo limoso; F: Franca; FrA: Franco arenoso; FAr: Franco arcilloso; FrArA: Franco arcillo arenoso. Fuente: este estudio

¹¹⁴CASTRO, H. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Tunja: Instituto Universitario Juan de Castellanos, 1998. p. 122

En promedio la raíz pivotante de *S. spectabilis* con un diámetro de 161,5 mm, alcanzó una profundidad de 1,5 m, longitud radical de 20,2 m y extensión horizontal radical de 12,7 m; con coeficientes de variación de 51, 30, 80 y 90 %, respectivamente. Los anteriores datos sugieren que las raíces pivotantes de esta especie al encontrar impedimentos se desarrollan de manera lateral, además corroboran la irregularidad del crecimiento en los sistemas radicales arbóreos evaluados.

En las tablas 5 y 7 se puede observar la profundidad promedio alcanzada por la raíz pivotante en *A. pennatula* y *S. spectabilis*, longitud poco profunda, teniendo en cuenta que son árboles mayores a 15 años y con alturas en promedio de 8 y 7 m, respectivamente. Lo anterior, es corroborado por Suárez¹¹⁵ quien reporta que las raíces pivotantes en algunos casos no son tan profundas, como se espera.

Sin embargo, autores como Mattia et al ¹¹⁶ manifiestan que el sistema radical ancla las capas superficiales del suelo a mantos más profundos, aumentando mediante este refuerzo, la estabilidad del suelo. Es probable que este comportamiento no se presente en algunos de los árboles de las regiones tropicales. Las excavaciones y mediciones de raíces pivotantes en *A. pennatula* y *S. spectabilis*, y el análisis de textura del suelo, sugiere que el crecimiento radical es susceptible a cambios texturales en el perfil del suelo y conduce posiblemente a que las raíces se desarrollen de manera lateral, paralela a la superficie del terreno a escasa profundidad de la superficie del suelo.

La situación encontrada es posiblemente producto de la adaptación de las especies forestales al medio e implica la ampliación del área de influencia del sistema radical, aumentado por lo tanto las áreas en las que se desarrolla el efecto de interacción del refuerzo mecánico del suelo y los procesos hidrológicos, disminuyendo así, en distancias mayores la presión intersticial de poros y aumentando la fricción entre partículas, al momento de movilizar y transportar el agua del suelo para sus procesos fisiológicos naturales (evapotranspiración).

Lo anterior demuestra que no es una sola especie la encargada de la estabilización de una ladera, sino un conjunto poblacional, para que mediante el entrecruce de raíces, se de lugar al refuerzo mecánico y a procesos hidrológicos, a diferentes profundidades. De ahí, que la deforestación generalizada e indiscriminada para el establecimiento de cultivos y pasturas, no sea la práctica más recomendable, debido principalmente a que estas aceleran los

¹¹⁵SUÁREZ, Op. cit., p. 285.

¹¹⁶MATTIA et al, Op. cit., p. 23.

procesos de movimientos masales en terrenos de pendiente alta, tal como viene ocurriendo en Colombia y demás países tropicales del mundo.

4.4.5 Distribución lateral en raíces de *Acacia pennatula*. En el primer árbol de *A. pennatula*, la primera raíz lateral excavada con 135 mm de diámetro, alcanzó 13,9 m de longitud radical y 9,9 m de extensión horizontal radical, desplazándose a una profundidad promedio de 40,9 cm (Tabla 9). La segunda raíz lateral con 125 mm de diámetro, alcanzó una longitud de 12,1 m y extensión horizontal radical de 7,9 m; esta raíz hasta los 6 m de longitud creció sobre las capas superficiales del suelo, a una profundidad promedio de 6,4 cm, luego profundizó en el terreno hasta una profundidad máxima de 3,74 m, la mas profunda de todas las raíces excavadas (Figura 10 a).

Tabla 9. Diámetro, longitud, y extensión horizontal radical y características de la copa en *Acacia pennatula*.

Especie	Diámetro raíz 1 y 2 (m)	Longitud raíz (m)	Extensión horizontal raíz (m)	Radio de copa (m)	Relación extensión/ radio de copa
<i>Acacia pennatula</i> 1	135	13,9	9,9	5,4	1,6
	125	12,1	7,9		
<i>Acacia pennatula</i> 2	152	39,4	30,3	6,2	3,7
	105,5	21,9	15,9		
<i>Acacia pennatula</i> 3	123,5	15,3	11,3	6,7	1,5
	132,5	12,4	9,3		
Promedio	128,9	19,2	14,1	6,1	2,3
C.V.	12	55	60	11	55

Fuente: este estudio.

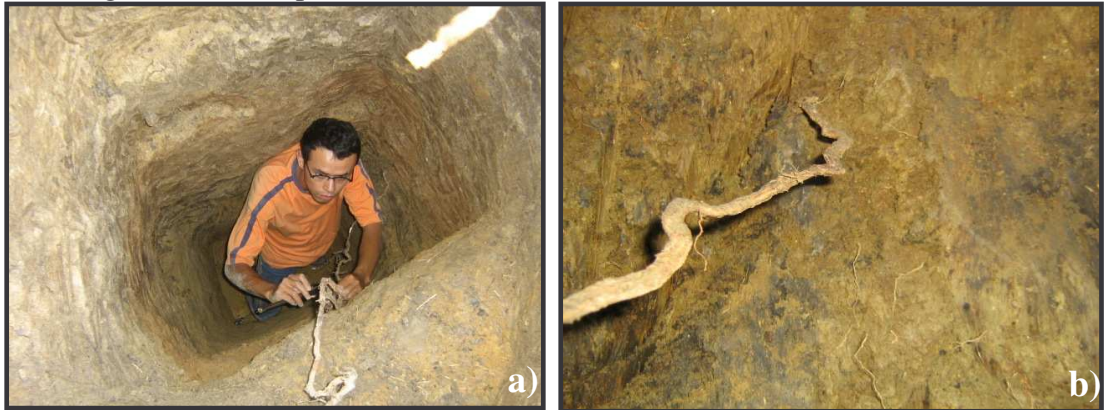
Teniendo en cuenta que el lugar de estudio corresponde a la zona de vida Bosque Seco Tropical, esta profundidad puede ser explicada por lo manifestado por Lynch y Ho¹¹⁷ quienes plantean que la disponibilidad de agua tiende a incrementarse con la profundidad, requiriéndose bajo condiciones secas raíces profundas

A medida que la raíz profundizó en el perfil (a 8,5 m de longitud radical) se vio afectada su morfología, pasando de su forma cilíndrica común a una forma rectangular o “aplanada”, con disminución o adelgazamiento en uno de sus lados (Figura 10 b). Es posible que tal cambio morfológico sea un efecto causado por el bajo nivel de macroporos presentes en el

¹¹⁷LYNCH, P. and HO, D. Rhizoeconomics: carbon costs of phosphorus acquisition. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 269, no. 1-2 (feb. 2005); p. 45-56.

suelo; mas adelante en el numeral 4.6.3 se discute este aspecto. Un comportamiento similar fue observado por Amézquita*, en raíces de *Elaeis guineensis*, en una plantación comercial en los llanos orientales de Colombia.

Figura 10. Raíz lateral de *Acacia pennatula* a) Medición en calicata, b) cambio en la morfología de la raíz (aplanada).



Fuente: este estudio.

En el segundo árbol de *A. pennatula* las raíces laterales con diámetro de 152 y 105,5 mm, alcanzaron una longitud de raíz de 39,4 y 21,9 m y extensiones de 30,3 y 15,9 m, estas raíces se desplazaron a una profundidad promedio de 46 y 22 cm, respectivamente. (Tabla 9).

En el tercer árbol de *A. pennatula* la primera raíz lateral con 123,5 mm de diámetro, alcanzó una longitud de raíz de 15,3 m y extensión horizontal radical de 11,3 m, desplazándose a una profundidad promedio de 19 cm. La segunda raíz lateral con 132,5 mm de diámetro se desplazó los primeros 4,6 m de longitud radical a una profundidad promedio de 12,5 cm luego profundizó hasta alcanzar 2,57 m, donde probablemente una capa de arcilla endurecida no permitió una mayor profundidad, dirigiendo su crecimiento de manera horizontal hasta alcanzar una longitud radical de 12,4 m y una extensión horizontal radical de 9,3 m (Tabla 9).

En la Tabla 9 se observa que en *A. pennatula*, la extensión horizontal máxima de raíces laterales fue de 30,3 m, distancia 4,8 veces mayor que el radio de copa del árbol; la relación media entre la extensión horizontal radical y el radio de copa, fue 2,3 veces

*ENTREVISTA con Edgar Amézquita, Física de Suelos, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, 15 de Noviembre de 2006.

superior a la copa, con un coeficiente de variación superior al 50 %, sin embargo en ninguno de los casos fue inferior al radio. Estos resultados demuestran que las raíces de los árboles es el órgano que en su normal desarrollo, amplía el efecto e impacto benéfico del componente leñoso en Sistemas Agroforestales, favoreciendo el aumento en el reciclaje de elementos, en la regulación hídrica del suelo y desde luego, una mayor área estabilizada por la presencia de raíces en este tipo de laderas, bajo uso silvopastoril.

4.4.6 Distribución lateral en raíces de *Senna spectabilis*. En el primer árbol de *S. spectabilis*, las raíces laterales con 135 y 187,5 mm de diámetro alcanzaron longitudes radicales de 41,6 y 34,2 m y extensiones horizontales radicales de 28,4 y 14,4 m, las raíces se desplazaron horizontalmente a una profundidad promedio de 41 y 40 cm, respectivamente (Tabla 10).

Tabla 10. Diámetro, longitud, y extensión horizontal radical y características de la copa en *Senna spectabilis*.

Especie	Diámetro raíz 1 y 2 (m)	Longitud raíz (m)	Extensión horizontal raíz (m)	Radio de copa (m)	Relación extensión/ radio de copa
<i>Senna spectabilis</i> 1	135	41,6	28,4	4,35	4,90
	187,5	34,2	14,4		
<i>Senna spectabilis</i> 2	251	26,9	21,3	5,1	3,80
	117,5	21,8	17,3		
<i>Senna spectabilis</i> 3	162,5	20,4	14,0	5,8	2,30
	145	15,1	12,9		
Promedio	166,4	26,7	18,1	5,1	3,7
C.V.	29	37	33	14	36

Fuente: este estudio.

En el segundo árbol de *S. spectabilis*, las raíces laterales excavadas con 251 y 117,5 mm de diámetro, alcanzaron longitudes de 26,9 y 21,8 m y extensiones horizontales radicales de 21,3 y 17,3 m, desplazándose a una profundidad promedio de 39 y 70 cm, respectivamente (Tabla 10).

Las raíces laterales del tercer árbol de *S. spectabilis*, con 162,5 y 145 mm de diámetro, alcanzaron longitudes de raíz de 20,4 y 15,1 m y extensión horizontal radical de 14 y 12,9 m, desplazándose a una profundidad promedio de 57 y 50 cm, respectivamente (Tabla 10).

En *S. spectabilis* (Tabla 10) la extensión máxima de raíces laterales fue de 28,4 m, mostrando una relación 6,5 veces superior al radio de copa del árbol, la relación promedio entre la extensión horizontal radical y el radio de copa, fue 3,7 veces mayor al radio.

Los valores encontrados en la extensión horizontal radical en *A. pennatula* y *S. spectabilis*, indica que la extensión de las raíces en éstos árboles, es mayor a la proyección de la copa del árbol, por lo tanto el área explorada por las raíces laterales es superior a la superficie aérea cubierta por el dosel del árbol. De esta manera se reconoce la importancia de las raíces laterales en la estabilidad de los suelos, al ampliar el área de influencia del componente arbóreo en este tipo de Sistemas Agroforestales, valor que comúnmente ha sido subestimado por los investigadores. Al respecto Krogstad¹¹⁸, expone que generalmente las interpretaciones del efecto de refuerzo de la raíz se han focalizado en las raíces más profundas que entran en las grietas de la roca y que anclan el suelo a la ladera, pero las raíces laterales poco profundas pueden proporcionar el único refuerzo en situaciones extremas donde las raíces de la planta son poco profundas, el suelo es profundo o existen pocas grietas en la roca de fondo para que la raíz penetre.

Suárez¹¹⁹ indica que generalmente la raíz principal alcanza profundidades mayores que las raíces laterales. Al respecto, el presente estudio encontró que las raíces laterales pueden explorar profundidades superiores a las conseguidas por la raíz pivotante del mismo sistema radical. Sin embargo, en términos generales, las raíces laterales fueron poco profundas y el anclaje se desarrolló principalmente de manera paralela a la superficie del terreno.

4.5 INFLUENCIA DE LAS RAICES DE *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*, EN LA RESISTENCIA AL CORTANTE TANGENCIAL.

4.5.1 Resistencia al cortante tangencial (RCT) en el suelo de *Acacia pennatula*. La RCT, fluctuó entre 87,6 y 131,7 kPa. Según Salamanca¹²⁰, una resistencia al corte superior a 100 kPa, se clasifica en un grado de limitación extremadamente alto para el crecimiento radical. La RCT presentó una tendencia a disminuir hasta los 50 cm de profundidad, para luego aumentar hasta alcanzar la resistencia máxima al cortante (Figura 11). A 3,4 m de

¹¹⁸KROGSTAD, Op. cit., p. 2.

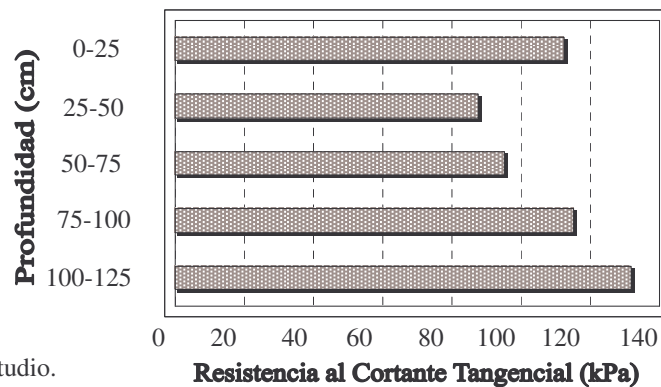
¹¹⁹SUÁREZ, Op. cit., p. 285.

¹²⁰SALAMANCA, A. Influencia de las características físicas del suelo y de su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad *Desmodium heterocarpum* subsp. *Ovalifolium* (OASHI) en tres regiones de Colombia. Palmira, 2000., p. 46-47. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

distancias respecto al fuste del árbol, la RCT disminuye y luego a 5,1 m de distancia aumentó (Figura 12), más adelante se discute al respecto.

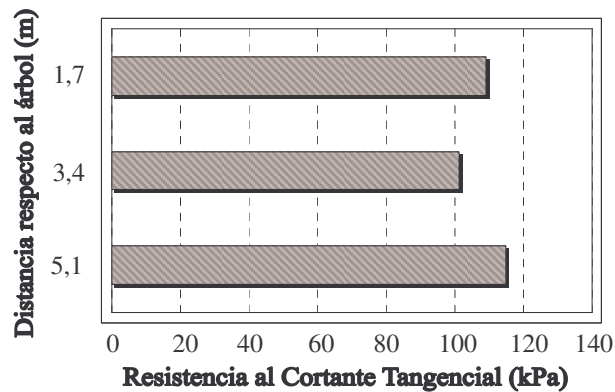
El análisis (Anexo D) muestra diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias:

Figura 11. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la profundidad, en el área de influencia de *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio.

Figura 12. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la distancia de *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio.

Teniendo en cuenta las distancias respecto al fuste, el análisis muestra que para la distancia de 1,7 m (Tabla 11), la RCT disminuye en un 23% hasta los 50 cm de profundidad, luego aumenta hasta en un 55 % a través del perfil del suelo, los valores presentaron coeficientes de variación de 14, 31, 18, 18 y 6%, respectivamente, para cada una de las profundidades estudiadas. El incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión fluctuó entre 6,6 y 37,6 kPa, obteniéndose el mayor valor en la parte superior, posiblemente por la

influencia de las raíces de *Cynodon plectostachyus*, estos valores presentaron coeficientes de variación de 40, 104, 98, 56 y 25%, respectivamente, para cada una de las profundidades. En las cinco profundidades evaluadas los valores más bajos de la RCT los presentó el suelo libre de raíces. La densidad de longitud de raíces gruesas (DLR) fluctuó entre 0,004 y 0,01 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 84, 35, 122, 134 y 164 %, respectivamente, para cada una de las profundidades.

Tabla 11. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 1,7 m de distancia del fuste de *Acacia pennatula*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>A. pennatula</i>	107,9	14	37,6	40	0,010	84
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>A. pennatula</i>	83,0	31	6,6	104	0,007	35
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>A. pennatula</i>	97,5	18	15,6	98	0,009	122
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>A. pennatula</i>	120,0	18	25,5	56	0,009	134
	Suelo libre de raíces	94,5	6	0	0	0	0
100-125	<i>A. pennatula</i>	136,8	6	10,2	25	0,004	164
	Suelo libre de raíces	126,7	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm³ de suelo. Fuente: este estudio.

A 3,4 m de distancia del fuste (Tabla 12), la RCT presentó un comportamiento similar a la distancia anterior, disminuye en 17% hasta los 50 cm de profundidad y luego aumenta hasta un 48 % en el perfil; la RCT presentó coeficientes de variación de 18, 22, 18, 24 y 19%, respectivamente, para cada una de las profundidades estudiadas. El incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión varió entre 0 y 32,8 kPa, obteniéndose el mayor valor en la parte superior (0-25 cm), y un valor nulo en la zona más profunda (100-125 cm), estos valores presentaron coeficientes de variación de 58, 110, 101, 64 y 55%, respectivamente, para las profundidades de estudio. A excepción de la última profundidad, los valores menores de la RCT se encontraron en el suelo libre de raíces. La DLR fluctuó entre 0,003 y 0,005 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 126, 115, 192, y 138%, respectivamente, para las cuatro primeras profundidades; de 100-125 cm de profundidad, no se encontraron raíces $\geq$ a 2 mm de diámetro.

Para la distancia de 5,1 m, respecto al tallo, la RCT, presentó un comportamiento similar a las distancias anteriores, hasta los 50 cm de profundidad disminuyó en un 25%, luego

aumento hasta en un 46%, la RCT presentó coeficientes de variación de 6, 24, 21, 19 y 3%, respectivamente, para cada una de las profundidades estudiadas. El incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión varió entre 11,5 y 55,6 kPa, obteniéndose el mayor valor en la parte superior (0-25 cm), y el valor inferior en la zona más profunda (100-125 cm), estos valores presentaron coeficientes de variación de 14, 113, 115, 61 y 40%, respectivamente, para cada una de las profundidades. En las cinco profundidades evaluadas, los valores más bajos de la RCT los presentó el suelo libre de raíces. La DLR fluctuó entre 0,001 y 0,01 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 85, 155, 134, y 245%, respectivamente, para las cuatro primeras profundidades; de 100 a 125 cm de profundidad no se encontraron raíces (Tabla 13).

Tabla 12. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 3,4 m de distancia del fuste de *Acacia pennatula*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>A. pennatula</i>	103,1	18	32,8	58	0,003	126
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>A. pennatula</i>	85,4	22	9,04	110	0,004	115
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>A. pennatula</i>	87,9	18	6,1	101	0,005	192
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>A. pennatula</i>	109,8	24	15,3	64	0,005	138
	Suelo libre de raíces	94,5	6	0	0	0	0
100-125	<i>A. pennatula</i>	120,2	19	0	55	0	0
	Suelo libre de raíces	126,7	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm³ de suelo. Fuente: este estudio.

La RCT promedio en *A. pennatula* muestra que a 5,1 m de distancia del fuste se encontró los valores más altos para las profundidades de 0-25 cm (125,9 kPa), 25-50 cm (94,5 kPa) y 100-125 cm (138,1 kPa), con valores de DLR de 0,005 y 0,002 cm de raíz por cm³ de suelo para las dos primeras profundidades; el incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión varió entre 11,5 y 55,6 kPa. A 1,7 m de distancia se encontró los mayores valores para las profundidades 50-75 cm (97,5 kPa) y 75-100 cm (120 kPa), con valores de DLR de 0,009 cm de raíz por cm³ de suelo para las dos profundidades; el incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión fluctuó entre 6,6 y 37,6 kPa. En general, más del 90% de los valores bajos de la RCT correspondieron al testigo libre de raíces, lo que demuestra el efecto positivo que imparten los árboles en el refuerzo mecánico del suelo.

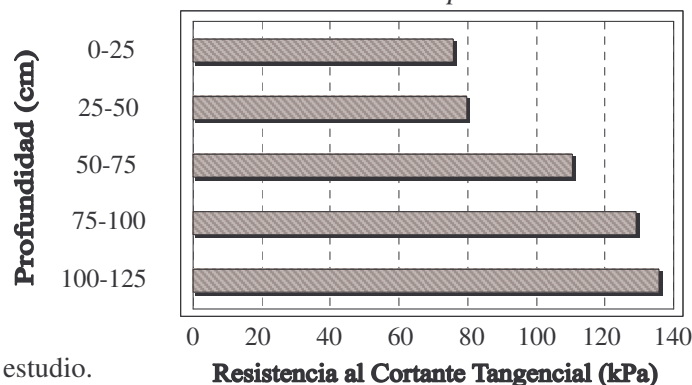
4.5.2 Resistencia al cortante tangencial (RCT) en suelo de *Senna spectabilis*. La RCT, varió entre 75,8 y 135,63 kPa. Según Salamanca¹²¹ una resistencia al cortante entre 60 y 80 kPa corresponde a un grado alto de limitación para el crecimiento radical y valores superiores a 100 kPa, a un grado de limitación extremadamente alto, para el crecimiento radical. El análisis estadístico (Anexo E) indicó diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades, con una tendencia a incrementar su valor al profundizar en el suelo (Figura 13) y a mayor distancia respecto al fuste del árbol (Figura 14).

Tabla 13. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 5,1 m de distancia del fuste de *Acacia pennatula*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>A. pennatula</i>	125,9	6	55,6	14	0,005	85
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>A. pennatula</i>	94,5	24	18,1	113	0,002	155
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>A. pennatula</i>	99,6	21	17,8	115	0,010	134
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>A. pennatula</i>	116,2	19	21,7	61	0,001	245
	Suelo libre de raíces	94,5	6	0	0	0	0
100-125	<i>A. pennatula</i>	138,1	3	11,5	40	0	0
	Suelo libre de raíces	126,7	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm^3 de suelo. Fuente: este estudio.

Figura 13. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la profundidad en el área de influencia de *Senna spectabilis*.

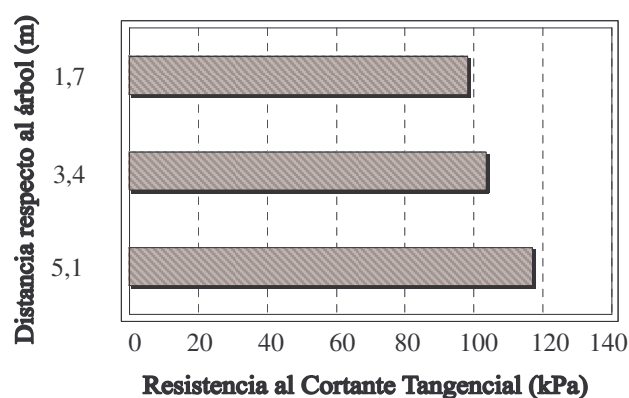


Fuente: este estudio.

¹²¹SALAMANCA, Op. cit., 46-47.

El análisis por distancias respecto al fuste, muestra que para la distancia de 1,7 m (Tabla 14), la RCT disminuye hasta los 50 cm de profundidad en un 28% y, luego aumentó a través del perfil en un porcentaje superior al 100 %; estos valores, presentaron coeficientes de variación de 52, 16, 24, 12 y 17% para cada una de las profundidades estudiadas. El incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión fluctuó entre 0 y 32,8 kPa, obteniéndose el valor mayor en una profundidad intermedia (50-75 cm); estos valores presentaron coeficientes de variación de 59, 32, 84, 49 y 41%, respectivamente, para las profundidades estudiadas. A excepción de la segunda profundidad (25-50 cm), los valores más bajos de la RCT los presentó el suelo libre de raíces. La DLR fluctuó entre 0,001 y 0,002 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 173 y 93%, para las profundidades iniciales (0-25 y 25-50 cm) respectivamente, y 173% para la última profundidad (100-125 cm); las otras profundidades no presentaron raíces gruesas.

Figura 14. Comportamiento de la resistencia al cortante tangencial respecto a la distancia de *Senna spectabilis*.



Para la distancia de 3,4 m respecto al fuste, el análisis (Tabla 15), indica que la RCT, aumentó a través del perfil del suelo pasó de 76,6 kPa (0-25 cm) a 140 kPa (100-125 cm) con un incremento del 83%, la RCT presentó coeficientes de variación de 19, 44, 22, 21 y 0%, respectivamente, para cada una de las profundidades estudiadas. El incremento de la resistencia al corte varió entre 4,47 y 26,1 kPa, con coeficientes de variación de 53, 89, 69 y 83 %, respectivamente, para las cuatro primeras profundidades. En las cinco profundidades los valores más bajos de la RCT se obtuvieron el suelo libre de raíces. La DLR, fluctuó entre 0,001 y 0,003 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 173%, para las dos profundidades en las que se encontró raíces (25-50 cm y 50-75 cm).

Tabla 14. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 1,7 m de distancia del fuste de *Senna spectabilis*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>S. spectabilis</i>	71,5	52	1,2	59	0,002	173
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>S. spectabilis</i>	51,6	16	0	32	0,001	93
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>S. spectabilis</i>	114,6	24	32,8	84	0	0
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>S. spectabilis</i>	126,1	12	31,6	49	0	0
	Suelo libre de raíces	94,6	6	0	0	0	0
100-125	<i>S. spectabilis</i>	126,9	17	0,3	41	0,002	173
	Suelo libre de raíces	126,6	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm³ de suelo. Fuente: este estudio.

Tabla 15. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 3,4 m de distancia del fuste de *Senna spectabilis*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>S. spectabilis</i>	76,6	19	6,2	53	0,000	0
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>S. spectabilis</i>	80,9	44	4,47	89	0,003	173
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>S. spectabilis</i>	98,8	22	17,0	69	0,001	173
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>S. spectabilis</i>	120,6	21	26,1	83	0	0
	Suelo libre de raíces	94,6	6	0	0	0	0
100-125	<i>S. spectabilis</i>	140	0	13,4	0	0	0
	Suelo libre de raíces	126,6	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm³ de suelo. Fuente: este estudio.

Para la distancia de 5,1 m, el análisis (Tabla 16), indicó que la RCT presentó una tendencia a aumentar a través del perfil del suelo, variando de 79,3 kPa a 140 kPa, con un incremento del 83%, estos valores presentaron coeficientes de variación de 39, 32, y 32%, para las tres primeras profundidades. El incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión

fluctuó entre 9 y 45,4 kPa, estos valores presentaron coeficientes de variación de 11, 91, y 73%, para las tres primeras profundidades. En las cinco profundidades evaluadas los valores más bajos de la RCT se registraron en el suelo libre de raíces. La DLR fluctuó entre 0,001 y 0,004 cm de raíz por cm³ de suelo, con coeficientes de variación de 157 y 173 %, para las profundidades de 25-50 cm y 50-75 cm.

La RCT promedio en *S. spectabilis* muestra que a 5,1 m de distancia del fuste se registró los valores más altos para las cinco profundidades, de 0-25 cm 79,3 kPa, de 25-50 cm 106,9 kPa, de 50-75 cm 118,4 kPa, de 75-100 cm 140 kPa y 100-125 cm 140 kPa, con valores de DLR de 0,004 y 0,001, para la segunda y tercera profundidad, respectivamente. El incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión varió entre 9 y 45,4 kPa, lo que demuestra el efecto positivo ejercido por las coberturas arbóreas en la resistencia mecánica del suelo y por lo tanto su importancia en la prevención de movimientos masales en estas laderas, bajo uso silvopastoril.

Tabla 16. Resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, a 5,1 m de distancia del fuste de *Senna spectabilis*.

Prof (cm)	Especie vegetal	T (kPa)*		t (kPa)**		D L R***	
		Promedio	C.V	Promedio	C.V	Promedio	C.V
0-25	<i>S. spectabilis</i>	79,3	39	9,0	11	0	0
	Suelo libre de raíces	70,3	7	0	0	0	0
25-50	<i>S. spectabilis</i>	106,9	32	30,5	91	0,004	157
	Suelo libre de raíces	76,4	10	0	0	0	0
50-75	<i>S. spectabilis</i>	118,4	32	36,6	73	0,001	173
	Suelo libre de raíces	81,8	5	0	0	0	0
75-100	<i>S. spectabilis</i>	140	0	45,4	0	0	0
	Suelo libre de raíces	94,6	6	0	0	0	0
100-125	<i>S. spectabilis</i>	140	0	13,4	0	0	0
	Suelo libre de raíces	126,6	9	0	0	0	0

*Esfuerzo cortante máximo que produjo la falla del suelo. **Diferencia entre el valor de esfuerzo de cortante máximo para la muestra de suelo con raíces y el valor de esfuerzo cortante máximo para la muestra de suelo libre de raíces y equivale al incremento de la resistencia al cortante en términos de cohesión. ***Densidad de Longitud Radical $\geq$ a 2 mm de diámetro, en unidades de cm de longitud de raíces por cm³ de suelo. Fuente: este estudio.

El aumentó de la RCT a mayor distancia del fuste en *Senna* y *Acacia*, puede tener una explicación en la regulación microclimática ejercida por los árboles, al respecto O'Rourke y Crespo¹²², manifiestan que la resistencia al cortante en términos de esfuerzos totales es

¹²²O'ROURKE, T. D. and CRESPO, E. Geotechnical properties of cemented volcanic soil, citado por SUAREZ, J. Deslizamiento y estabilización de laderas en zonas tropicales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998. p. 105.

influenciada en forma muy importante por el contenido de agua. Montenegro y Malagón¹²³ corroboran, que los cambios en la resistencia del suelo son funciones de su contenido de humedad, por lo tanto es probable que en estos sistemas, a mayor distancia del fuste de los árboles los contenidos de humedad disminuyan y por tanto la RCT aumenta.

Los coeficientes de variación altos que muestran los valores de la RCT de 31 y 32 a 52 %; incremento de la RCT en términos de cohesión de 40 a 115 y 32 a 91 % y DLR de 35 a 245 y 93 a 173%, para *A. pennatula* y *S. spectabilis*, respectivamente, es producto de la heterogeneidad en las características del suelo. En este sentido Varela¹²⁴, manifiesta: “el suelo es un subsistema dinámico, muy heterogéneo y especialmente discontinuo”. Esto sugiere, que el efecto de estabilidad mecánica suministrado por las raíces, varía alrededor del área de influencia del árbol, aunque su valoración se efectúe a distancias iguales respecto al tallo. Por lo tanto para la evaluación de este tipo de variables, los diseños experimentales deben definir claramente las profundidades de estudio, y dejar al criterio del investigador la selección de las distancias y direcciones respecto al fuste, con el animo de reconocer en “apariencia” puntos de muestreo homogéneos, en lo referente a la distribución radical y otras características edáficas, como la textura, estructura, humedad, entre otras.

El incremento en términos de cohesión adicional que se encontró en el área de influencia de *A. pennatula* y *S. spectabilis*, demuestra el efecto positivo que imparten los árboles en el refuerzo mecánico del suelo y el carácter preventivo que este tipo de coberturas ofrece hacia los movimientos masales. Adicionalmente los altos valores de la RCT presentados (> 90 %) en el área de influencia de las dos especies, en relación con el testigo libre de raíces, corroboran el efecto protector de los árboles en zonas de alta pendiente. Estos resultados resaltan la importancia en la implementación de Sistemas Agroforestales en zonas de ladera tropical, como instrumentos de protección y producción sustentable bajo este tipo de condiciones.

La anterior conclusión, concuerda con lo reportado por Rivera¹²⁵, quien evaluando la susceptibilidad a la erosión en cinco unidades de suelos de ladera de la zona cafetera Colombiana, encontró que en promedio para el perfil del suelo, los valores más altos de resistencia al cortante tangencial, se presentan en la unidad Chinchiná (112,37 kPa), seguido por la unidad Montenegro (106 kPa). Los valores más bajos están en la unidad

¹²³ MONTENEGRO, G. H. y MALAGÓN, C. D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. p. 222

¹²⁴ VARELA, A. Análisis e interpretación de propiedades biológicas. En: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: SCSC, 2003. p. 55.

¹²⁵ RIVERA, Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana, Op. cit., p. 103.

Parnaso (43,83 kPa), seguido por la unidad Guamal (69,65 kPa). Concluyendo, que esta es una de las razones por las cuales en suelos de la unidad Parnaso y Guamal, se presentan problemas graves de remociones masales a gran escala, en los períodos muy lluviosos, especialmente cuando el uso del suelo es monocultivo con sistemas radicales superficiales (0-30cm de profundidad), fenómeno que no ocurre o solo se presenta a escala pequeña, cuando los sistemas del uso del suelo son Agroforestales, Agropastoriles, Silvopastoriles.o Agrosilvopastoriles.

Los valores de la RCT representan desde el punto de vista biológico un grado alto de limitación para el crecimiento radical. Esta resistencia mecánica, puede explicar el comportamiento observado en algunas de las raíces pivotantes (crecimiento lateral). En este sentido, Salamanca¹²⁶ manifiesta, que la resistencia mecánica integra la proporción de macroporos presentes en el suelo, con la susceptibilidad del suelo a ser deformado. El suelo en el que creció *A. pennatula* y *S. spectabilis* presenta un bajo porcentaje de macroporos (ver numeral 4.6.3) y una muy baja susceptibilidad a ser deformado. Según, Amézquita¹²⁷, un suelo de malas condiciones para la agricultura, es un suelo que no es deformable y no permite la entrada ni distribución del agua. Sin embargo a pesar de estas limitaciones el sistema radical de estas especies alcanzó profundidades superiores a 3,7 m y extensiones mayores a 30 m.

La verdadera valoración de la RCT en los suelos evaluados, se vio restringida por las características del instrumento utilizado: el aparato de torsión con cuchillas (Torvane Pilkon®), cuenta con registro máximo de 140 kPa, y la resistencia al cortante de estos suelos, en muchos casos fue superior a este valor. En *A. pennatula* 18 mediciones sobrepasaron este rango, lo que representó un 20 % del total de valores registrados para esta especie. En *S. spectabilis*, 17 valores excedieron el registro del equipo, constituyéndose en más del 37 % del total de mediciones efectuadas en este único árbol (Anexo F). Para efectos estadísticos en estos casos se utilizó el máximo valor registrado por el equipo, aunque estos valores varían en rangos desconocidos. Esta limitación en el aparato es una de las razones por las cuales no fue posible encontrar regresiones estadísticas significativas y líneas de tendencia que explicaran el comportamiento de la resistencia al cortante en función de las variables evaluadas.

¹²⁶SALAMANCA, Op. cit., p. 46.

¹²⁷AMÉZQUITA, E. La fertilidad física del suelo. En: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: SCSC, 2003. p. 175.

4.6. COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO LA INFLUENCIA DE *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*.

4.6.1 Densidad aparente. En *A. pennatula* la densidad aparente varió en promedio entre 1,07 y 1,1 Mg m⁻³ (Tabla 17). Según Bernal¹²⁸ una densidad aparente baja en el suelo superficial generalmente indica un buen estado estructural, esta propiedad varía con la textura, estructura, contenido de materia orgánica y grado de compactación. El análisis estadístico (Anexo G) mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre profundidades, con un incremento a través del perfil del suelo (Figura 15).

De todos los modelos de regresión simple, una tendencia de tipo polinomial (Figura 15), fue la que mejor explicó el comportamiento de la densidad aparente a través del perfil del suelo, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,7.

Tabla 17. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg*m⁻³), densidad real (Mg-m⁻³), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos%, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lámina de agua (mm de agua cm⁻¹ de suelo) por profundidad en *Acacia pennatula*.

Propiedad Prof (cm)	Densidad aparente	Densidad Real	Porosidad Total	Macro poros	Meso poros	Micro poros	H CC*	H PMP**	Lámina de agua
0-25	1,07 a	2,41 a	46,16 a	0,18 a	6,79 a	39,19 c	50,42 b	43,63 c	1,70 a
25-50	1,07 a	2,49 ab	45,44 a	1,73 ab	7,16 ab	36,55 bc	47,82 ab	40,66 bc	1,79 ab
50-75	1,08 ab	2,56 bc	45,01 a	0,48 a	7,21 ab	37,32 bc	47,98 ab	40,77 bc	1,80 ab
75-100	1,08 ab	2,64 c	43,99 a	1,29 ab	8,26 b	34,44 ab	47,20 ab	38,94 ab	2,06 b
100-125	1,1 b	2,67 c	44,68 a	2,74 ab	9,53 c	32,41 a	45,77 a	36,15 a	2,4 c *

Humedad a capacidad de campo, ** Humedad a punto de marchitez permanente. Letras distintas indican diferencias significativas. Fuente: este estudio.

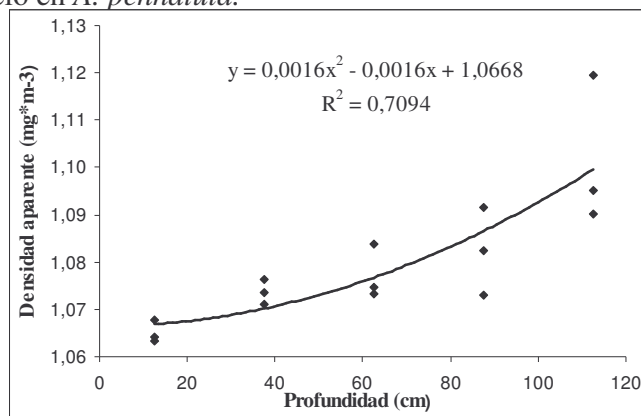
Lo anterior concuerda parcialmente con lo reportado por Pinzón¹²⁹ quien manifiesta que la densidad aparente presenta variabilidad espacial tanto en sentido vertical como horizontal; sin embargo la densidad aparente no presentó diferencias significativas entre distancias (Tabla 18).

En *S. spectabilis*, el análisis estadístico para la densidad aparente del suelo (Anexo H), no mostró diferencias significativas entre profundidades y entre distancias respecto al árbol. (Tablas 19 y 20).

¹²⁸BERNAL E. J. Pastos y forrajes Tropicales: Producción y manejo. Bogotá: Banco Ganadero, 1994. p. 61.

¹²⁹PINZON, Op. cit., p. 67.

Figura 15. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad aparente y la profundidad del suelo en *A. pennatula*.



Fuente: este estudio.

4.6.2 Densidad real. Los valores de densidad real de los suelos sembrados con *A. pennatula* fluctuaron en promedio entre 2,41 y 2,67 Mg m⁻³ (Tablas 17 y 18); de acuerdo a Montenegro¹³⁰ cuando no se presentan cantidades considerables de materia orgánica la densidad real fluctúa entre 2,5 a 2.6 Mg m⁻³ y alcanza el mayor valor en suelos arcillosos o arenosos con muy poca materia orgánica.

Tabla 18. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente (Mg·m⁻³), densidad real (Mg·m⁻³), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos%, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua (mm de agua cm⁻¹ de suelo) por distancias respecto a *Acacia pennatula*.

Propiedad Distancia (m)	Densidad aparente	Densidad Real	Porosidad Total	Macro poros	Meso poros	Micro poros	H CC*	H PMP**	Lámina de agua
1,7	1,08 a	2,54 a	44,17 a	1,51 a	7,68 a	34,98 a	47,89 a	40,21 a	1,92 a
3,4	1,08 a	2,56 a	45,95 a	1,23 a	7,57 a	37,15 a	47,69 a	40,07 a	1,91 a
5,1	1,09 a	2,56 a	45,05 a	1,11 a	8,12 a	35,82 a	47,92 a	39,80 a	2,03 a

*Humedad a capacidad de campo, **Humedad a punto de marchitez permanente. . Letras distintas indican diferencias significativas. Fuente: este estudio.

El análisis estadístico (Anexo I) muestra diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) entre profundidades, con una tendencia a incrementarse a través del perfil del suelo (Figura 16). Una regresión polinomial explicó el comportamiento de la densidad real respecto a la profundidad, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,82.

¹³⁰MONTENEGRO, Op. cit., p. 16

Tabla 19. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), densidad real ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos%, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por profundidad en *Senna spectabilis*.

Propiedad Prof (cm)	Densidad aparente	Densidad Real	Porosidad Total	Macro poros	Meso poros	Micro poros	H CC*	H PMP**	Lámina de agua
0-25	1,08 a	2,61 a	43,42 a	1,66 a	8,43 a	33,54 b	44,89 c	36,46 c	2,11 a
25-50	1,07 a	2,61 a	45,99 a	5,82 ab	7,61 a	32,56 b	41,35 bc	33,75 bc	1,90 a
50-75	1,07 a	2,72 b	42,66 a	3,50 ab	7,79 a	31,37 b	39,51 bc	31,72 bc	1,95 a
75-100	1,08 a	2,83 c	42,82 a	6,88 b	7,66 a	28,28 ab	36,02 ab	28,37 ab	1,91 a
100-125	1,08 a	2,85 c	41,79 a	11,55 c	7,03 a	23,2 a	30,24 a	23,20 a	1,76 a

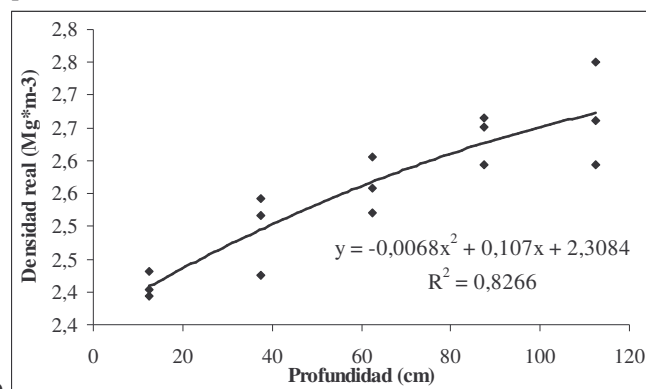
*Humedad a capacidad de campo, **Humedad a punto de marchitez permanente. Letras distintas indican diferencias significativas. Fuente: este estudio.

Tabla 20. Prueba de Duncan para valores promedios de densidad aparente ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), densidad real ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), Porosidad total %, Macroporos %, Mesoporos %, Microporos%, Humedad a capacidad de campo %, Humedad a punto de marchitez permanente % y lamina de agua ($\text{mm de agua cm}^{-1}$ de suelo) por distancias respecto a *Senna spectabilis*.

Propiedad Distancia (m)	Densidad aparente	Densidad Real	Porosidad Total	Macro poros	Meso poros	Micro poros	H CC*	H PMP**	Lámina de agua
1,7	1,07 a	2,73 ab	43,36 a	3,04 a	8,01 a	32,31 b	41,58 b	33,57 b	2,0 a
3,4	1,08 a	2,67 a	43,97 a	5,49 a	7,87 a	30,61 b	39,55 b	31,68 b	1,97 a
5,1	1,08 a	2,78 b	42,68 a	9,12 b	7,22 a	26,34 a	34,07 a	26,85 a	1,80 a

* Humedad a capacidad de campo, ** Humedad a punto de marchitez permanente. Letras distintas indican diferencias significativas. Fuente: este estudio.

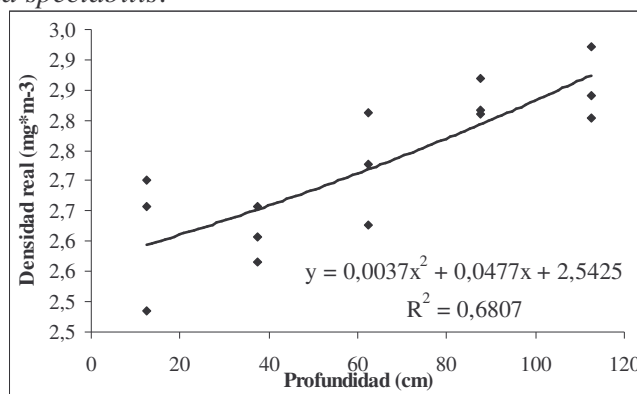
Figura 16. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad real y la profundidad del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio

En el suelo sembrado con *S. spectabilis* los valores de densidad real fluctuaron en promedio entre 2,61 y 2,85 Mg m⁻³ (Tablas 19 y 20), de acuerdo a Montenegro y Malagón¹³¹ estos valores pertenecen a suelos minerales con bajo contenido de materia orgánica y con abundante contenido de hierro. El análisis estadístico (Anexo J) indicó diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias. Una regresión de tipo polinomial, explicó el comportamiento de la densidad real a través del perfil del suelo, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,68. De acuerdo a la figura 17 la densidad real presentó una tendencia a aumentar al profundizar en el perfil del suelo, por disminución del contenido de materia orgánica, tal como se observa en la tabla 2, ya que según Montenegro¹³² existe una alta dependencia entre estas dos propiedades.

Figura 17. Regresión polinomial del comportamiento de la densidad real y la profundidad del suelo en *Senna spectabilis*.



Fuente: este estudio.

4.6.3 Porosidad total y distribución del tamaño de poros. En el suelo cercano a *A. pennatula* los porcentajes de porosidad total variaron en promedio entre 45,7 y 47,3 % (Tablas 17 y 18). Estos porcentajes de porosidad total se clasifican dentro de un rango medio. Amézquita¹³³, manifiesta que un suelo puede tener una porosidad total buena, pero distribución de poros mala, lo cual impide el desarrollo normal de las raíces. En este sentido, Montenegro¹³⁴ manifiesta la importancia de conocer no solo la porosidad total del

¹³¹MONTENEGRO, H. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. En: Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. 2ª ed. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 1995. p. 119

¹³²MONTENEGRO y MALAGÓN, Op. cit. p. 39

¹³³AMÉZQUITA, Op. cit., p. 165-166.

¹³⁴MONTENEGRO. Interpretación de las propiedades físicas del suelo, Op. cit., p. 120.

suelo, sino su proporción relativa en cuanto hace referencia a macroporos, mesoporos y microporos. Al respecto, Montenegro y Malagón¹³⁵ manifiestan que: “un suelo ideal, en relación con el espacio poroso, es aquel que tiene el espacio de poros dividido por igual entre poros grandes y pequeños; tal suelo tiene un grado alto de características físicas favorables en relación con la aireación, permeabilidad y retención de humedad. La prueba de Duncan (Anexo K) no indicó diferencias estadísticas significativas entre profundidades y entre distancias. De acuerdo a la figura 18, la porosidad total presentó valores relativamente constantes a través del perfil del suelo y distancias respecto al árbol.

Los macroporos mostraron en promedio, porcentajes inferiores al 3 % y considerando, según Castro¹³⁶, que un valor de macroporosidad inferior al 10 %, afecta negativamente el desarrollo de las plantas, se piensa que los suelos en los que creció *A. pennatula*, presentaron grandes limitaciones para el desarrollo de las raíces. Al respecto, Montenegro y Malagón¹³⁷ manifiestan que la aireación óptima del suelo depende de la existencia de poros grandes que drenen rápidamente después de la lluvia. La compactación reduce el tamaño de los poros y, por lo tanto, el intercambio en la rizosfera, creando condiciones anaeróbicas que a su vez, disminuye la absorción de elementos por parte de las raíces. Amézquita¹³⁸ manifiesta que los macroporos son el espacio por el cual crecen los pelos radicales, se constituyen así; en definitivos para permitir el desarrollo de las raíces y con ello contribuir a la capacidad de absorción de agua y de elementos para las plantas.

Sin embargo a pesar de estas limitaciones en el espacio aéreo las raíces crecieron y mediante procesos hidrológicos y mecánicos ejercieron un efecto positivo en la estabilidad de las laderas, especialmente en épocas lluviosas cuando el terreno se satura con facilidad por la ausencia de espacio aéreo en estos suelos que permita la movilidad del fluido en el interior del suelo. Según López¹³⁹, los árboles permiten regular los excesos de agua que pueden saturar y erosionar el suelo, que ocurren por tres procesos, interceptación, evapotranspiración y la disminución de la energía erosiva del agua.

Además, probablemente el espacio aéreo limitado de estos suelos halla causado el cambio morfológico encontrado en una de las raíces de *A. pennatula*; al respecto Montenegro¹⁴⁰

¹³⁵MONTENEGRO y MALAGON, Op. cit., p. 23

¹³⁶CASTRO, Op cit., p. 136.

¹³⁷MONTENEGRO Y MALAGON, Op cit. p. 280.

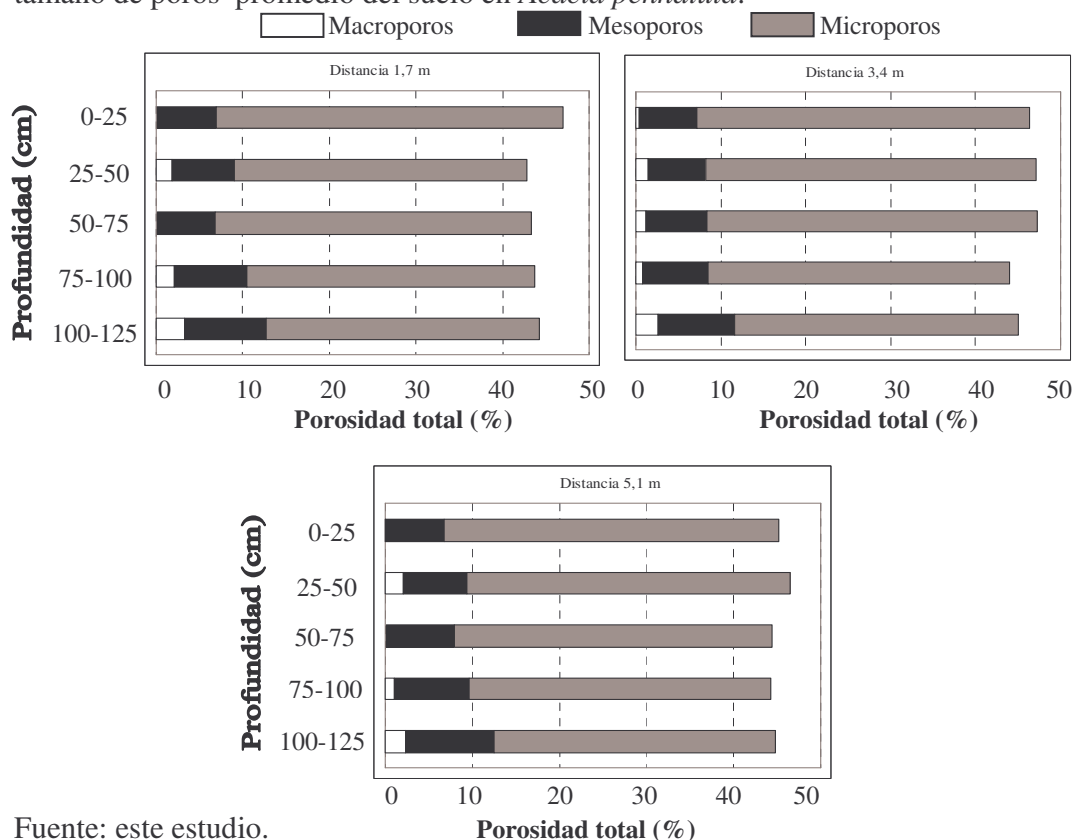
¹³⁸AMÉZQUITA, Op. cit., p. 130.

¹³⁹LOPEZ J., C. Manual de estabilización y revegetalización de taludes, 1 ed, Madrid. 1999. 704 p.

¹⁴⁰MONTENEGRO. Interpretación de las propiedades físicas del suelo, Op. cit., p. 123

manifiesta que las raíces, de acuerdo con la especie, cambian morfológicamente como reacción de la aireación del suelo y la velocidad de crecimiento de la raíz puede verse limitada por la falta de oxígeno. Adicionalmente, el nivel bajo de macroporos probablemente, influyó en los valores altos de resistencia al cortante encontrados en este estudio.

Figura 18. Perfil comparativo del comportamiento de la porosidad total y distribución del tamaño de poros promedio del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio.

El análisis estadístico para los macroporos (Anexo L) mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre profundidades, con una tendencia leve a incrementarse a través del perfil del suelo, pero con valores bajos, que aún se constituyen en una proporción de espacio aéreo baja para el buen desarrollo de las raíces de los árboles.

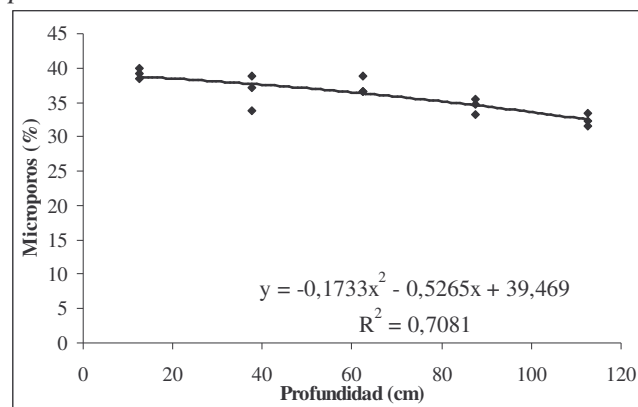
Los valores de mesoporos presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre profundidades (Anexo M), de acuerdo a la figura 18, el porcentaje de mesoporos aumenta ligeramente a través del perfil del suelo.

El porcentaje de microporos, presentó la proporción más alta respecto a la distribución de poros, de acuerdo al análisis (Anexo N) muestra diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias; los microporos disminuyen a través del perfil del suelo y aumentan a mayores distancias respecto al árbol (Figura 18).

Según Amézquita¹⁴¹, los microporos no son importantes desde el punto de vista agrícola funcional, la proporción alta de microporos, supone la presencia de índices altos de compactación que limitan la difusión de aire y el movimiento del agua, en estos suelos.

De todos los modelos de regresión simple aplicados, se encontró que una tendencia de tipo polinomial es la que mejor explicó el comportamiento de los microporos a través del perfil del suelo, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,7 (Figura 19).

Figura 19. Regresión polinomial del comportamiento de los microporos y la profundidad del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio

En términos generales la distribución de poros del suelo en *A. pennatula*, presenta limitaciones para el crecimiento del sistema radical, debido a la proporción baja de macroporos. Según Montenegro y Malagón¹⁴², teniendo en cuenta, que los poros pequeños se encuentran dentro de los agregados y los macroporos entre los agregados, los poros con diámetro grande corresponden a un valor bajo de succión; consecuentemente, el agua adherida a valores bajos de succión es disponible para las plantas, por lo tanto ante la baja

¹⁴¹AMÉZQUITA, E. El agua y la erodabilidad de los suelos. En: Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Bogota: SCCS. 1995. p. 133

¹⁴²MONTENEGRO y MALAGÓN, Op. cit., 800 p.

proporción de tales poros el crecimiento de las raíces fue afectado por la disponibilidad baja de agua que presentaron estos suelos.

Adicionalmente, el poco espacio aéreo hace que el movimiento del agua sea lento y el efecto de la pendiente puede acelerar la energía cinética del fluido ladera abajo, en este sentido, Montenegro y Malagón¹⁴³ expresan: “si la penetración del agua en el suelo es muy lenta comparada con el escurrimiento superficial, el proceso erosivo puede ser mayor”. Por lo tanto, el efecto de las raíces es fundamental para contribuir con la movilidad interna del agua en el suelo, al permitir el tránsito entre las aperturas que ella deja en su desarrollo y al convertirse en medio de movilización por donde el líquido se percola, además del proceso de evapotranspiración que la vegetación promueve.

Para los valores de porosidad total en *S. spectabilis*, el análisis estadístico (Anexo O), no indicó diferencias significativas entre profundidades y entre distancias; fluctuó en promedio entre 41,7 y 45,94% (Tablas 19 y 20) valores clasificados dentro de un rango medio de porosidad.

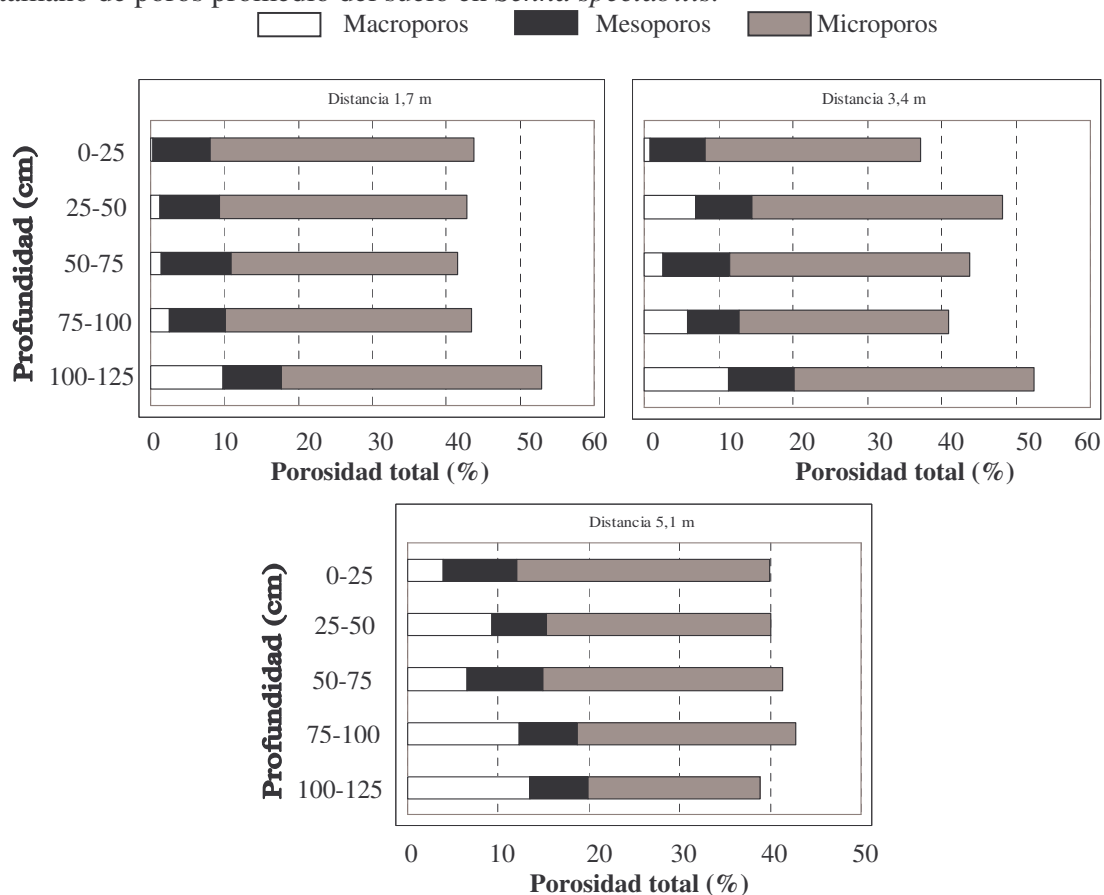
El porcentaje de macroporos presente en *S. spectabilis*, según el análisis (Anexo P) muestra diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y entre distancias; los macroporos presentan una tendencia de aumento al profundizar en el perfil y a mayor distancia respecto al árbol (Figura 20), sin embargo, la mayoría de los valores se encuentran por debajo del rango de 10% (Tabla 19 y 20) lo que indica que presentan limitaciones para el flujo adecuado de aire y agua en el suelo.

En cuanto al porcentaje de mesoporos, el análisis estadístico (Anexo Q) no indicó diferencias entre profundidades y entre distancias, lo anterior concuerda, con lo observado en la figura 20, donde se muestra que los mesoporos se mantienen relativamente constantes a través del perfil del suelo y distancias respecto al árbol.

De acuerdo, al análisis (Anexo R), los microporos muestran diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias respecto al árbol. De acuerdo a los valores encontrados (Tablas 19 y 20) el porcentaje de microporos disminuye a través del perfil del suelo y a mayores distancias respecto al árbol. (Figura 20).

¹⁴³MONTENEGRO y MALAGÓN, Op. cit., 800 p.

Figura 20. Perfil comparativo del comportamiento de la porosidad total y distribución del tamaño de poros promedio del suelo en *Senna spectabilis*.



Fuente: este estudio

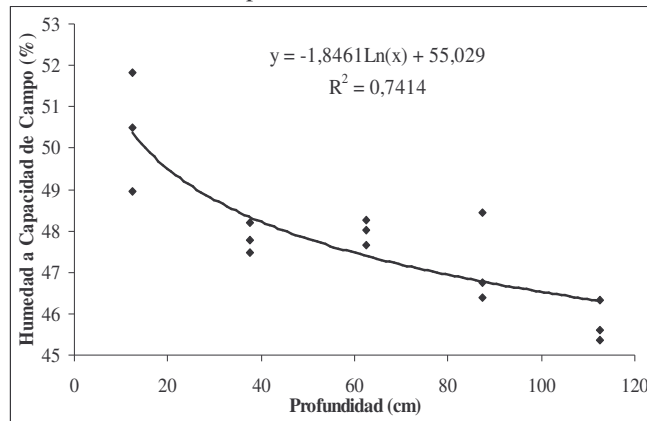
4.6.4 Humedad volumétrica a 75 cm de succión. Los valores de humedad a capacidad de campo encontrados en los suelos con *A. pennatula*, variaron en promedio entre 47,2 y 50,4 %, según Montenegro y Malagón¹⁴⁴, estos valores se clasifican, en un rango muy alto de retención de humedad. El análisis estadístico (Anexo S) para los valores de humedad a capacidad de campo indica diferencias significativas ($p < 0,05$) entre profundidades. Una tendencia de tipo logarítmica es la que mejor explica el comportamiento de esta propiedad a través del perfil del suelo, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,77 (Figura 21).

En suelos con *S. spectabilis*, el análisis (Anexo T) de los valores de humedad a capacidad de campo presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias; para este último

¹⁴⁴MONTENEGRO y MALAGÓN, Op. cit., p. 40.

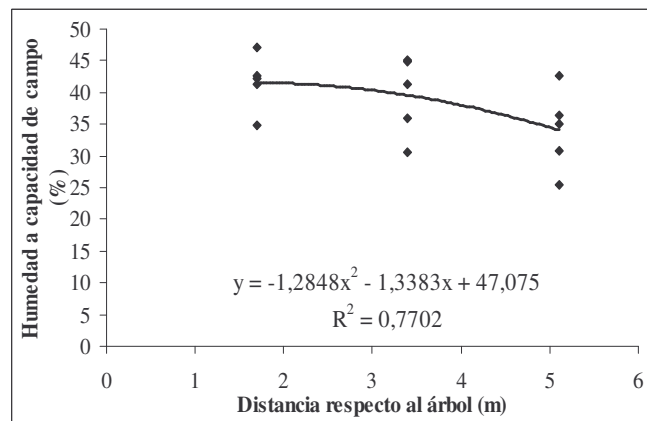
factor se encontró que una regresión de tipo polinomial explicó el comportamiento de esta propiedad, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,77 (Figura 22).

Figura 21. Regresión logarítmica de la humedad a capacidad de campo y la profundidad a través del perfil del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: Este estudio

Figura 22. Regresión polinomial de la humedad a capacidad de campo y distancia respecto a *Senna spectabilis*.

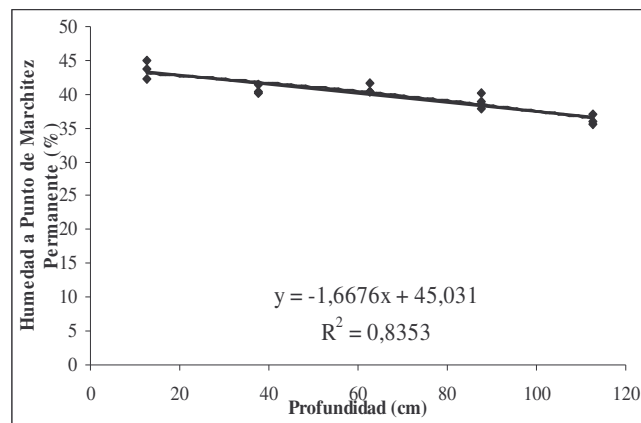


Fuente: Este estudio.

4.6.5 Humedad volumétrica a 15000 cm de succión. En suelos con *A. pennatula* los valores de humedad a punto de marchitez permanente (HPMP) presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) entre profundidades (Anexo U), se encontró explicación de esta propiedad a través del perfil del suelo con una regresión lineal, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,83. De acuerdo a la figura 23 la HPMP disminuye a medida que aumenta la profundidad en el terreno.

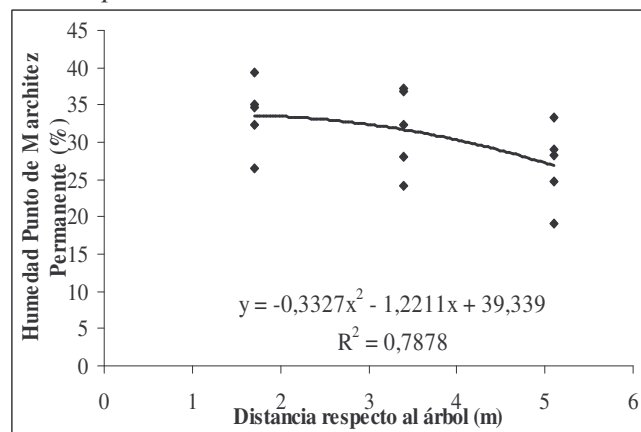
El análisis (Anexo V) de los valores de punto de marchitez permanente, en suelos con *S. spectabilis* indicó diferencias altamente significativas entre profundidades ($p < 0,01$), y diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distancias. Una tendencia de tipo polinomial explicó el comportamiento de esta propiedad respecto a las distancias del árbol, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,78 (Figura 24).

Figura 23. Regresión lineal de la humedad a punto de marchitez permanente y la profundidad a través del perfil del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: Este estudio

Figura 24. Regresión polinomial de la humedad a punto de marchitez permanente y distancia respecto a *Senna spectabilis*.



Fuente: Este estudio.

4.6.6. Agua aprovechable. Los valores de lamina de agua en suelos con *A. pennatula* variaron entre 1,7 y 2,4 mm de agua cm^{-1} de suelo (Tabla 21), según Castro¹⁴⁵ estos datos se clasifican en un rango muy alto de almacenamiento y deben ser interpretados como la cantidad de agua retenida después de una lluvia, equivalentes a 17 y 24 m^3 en una hectárea, respectivamente; además los valores de lamina de agua almacenada en el suelo mostraron diferencias estadísticas (Anexo W) altamente significativas entre profundidades ($p < 0,01$), una regresión lineal fue la que mejor explicó este comportamiento, con un coeficiente de determinación, R^2 de 0,78 (Figura 25). De acuerdo a la figura 25 y la tabla 21 la lámina de agua es directamente proporcional al aumento de la profundidad. Los datos anteriores sugieren que las altas profundidades alcanzadas por algunas de las raíces de *A. pennatula* se debió posiblemente a la búsqueda de agua en el suelo.

Tabla 21. Volumen de agua disponible y lámina de agua a través del perfil del suelo en *Acacia pennatula*.

Distancia del fuste (m)	Profundidad (cm)	Agua disponible (% Vol)	Lamina de agua (mm de agua por cm de suelo)
1,70	0-25	6,74	1,68
	25-50	7,29	1,82
	50-75	6,61	1,65
	75-100	8,38	2,10
	100-125	9,39	2,35
3,40	0-25	6,82	1,71
	25-50	6,88	1,72
	50-75	7,30	1,82
	75-100	7,76	1,94
	100-125	9,35	2,34
5,10	0-25	6,83	1,71
	25-50	7,31	1,83
	50-75	7,72	1,93
	75-100	8,62	2,16
	100-125	10,12	2,53

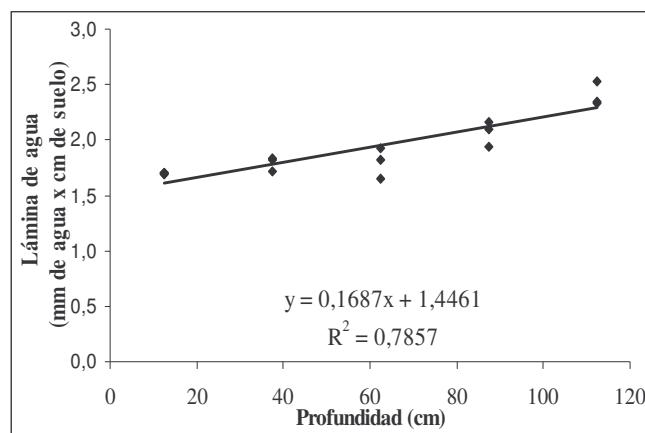
Fuente: este estudio

En suelos con *Senna spectabilis* los valores de lámina de agua almacenada en el suelo, variaron entre 1,76 y 2,11 mm agua cm^{-1} de suelo, según Castro¹⁴⁶ estos datos se clasifican en un rango alto y muy alto de almacenamiento; equivalentes a 17,6 y 21,1 m^3 en una hectárea, respectivamente; los valores de lámina de agua no mostraron diferencias estadísticas significativas (Anexo X), lo anterior es corroborado en la tabla 22, donde no se observa tendencia en la distribución de la lamina de agua a través del perfil del suelo y distancias respecto al árbol.

¹⁴⁵CASTRO, Op. cit., p. 129.

¹⁴⁶CASTRO, Op. cit., p. 130.

Figura 25. Regresión lineal de la lámina de agua a través del perfil del suelo en *Acacia pennatula*.



Fuente: este estudio.

La variabilidad relativa y los niveles altos de la lámina de agua, sugieren que la poca penetración en algunas de las raíces de esta especie, se debió posiblemente a que el agua necesaria para sus procesos fisiológicos se encontraba en los estratos superiores del suelo, por lo tanto no era necesario alcanzar profundidades superiores a 125 cm para poder absorberla y transportarla.

Tabla 22. Volumen de agua disponible y lámina de agua a través del perfil de suelo en *Senna spectabilis*

Distancia del fuste (m)	Profundidad (cm)	Agua disponible (% Vol)	Lamina de agua (mm de agua por cm de suelo)
1,70	0-25	7,77	1,94
	25-50	7,58	1,90
	50-75	7,45	1,86
	75-100	8,88	2,22
	100-125	8,37	2,09
3,40	0-25	8,06	2,01
	25-50	7,89	1,97
	50-75	9,04	2,26
	75-100	8,02	2,01
	100-125	6,36	1,59
5,10	0-25	9,45	2,36
	25-50	7,35	1,84
	50-75	6,87	1,72
	75-100	6,07	1,52
	100-125	6,37	1,59

Fuente: este estudio.

5. CONCLUSIONES

- En el área de influencia de *A. pennatula* y *S. spectabilis* el incremento de la resistencia al corte en términos de cohesión y los valores altos de resistencia al cortante tangencial en comparación con el testigo libre de raíces, demuestra el efecto positivo que imparten las raíces de estas especie en el refuerzo mecánico del suelo y por tanto su importancia en la prevención de movimientos masales en laderas susceptibles.
- De acuerdo con los resultados encontrados, se espera que en zonas de ladera y donde las condiciones del suelo sean similares a las del sitio donde se realizó este trabajo, la estabilidad del terreno será mayor si se establecen sistemas silvopastoriles en los que la pastura se encuentre asociada con las especies forestales evaluadas.
- Los altos coeficientes de variación encontrados en la RCT sugieren que el efecto de estabilidad mecánica suministrado por las raíces, varía alrededor del área de influencia del árbol, aunque su valoración se efectúe a distancias iguales respecto al tallo, como consecuencia de la heterogeneidad que presenta el suelo.
- *A. pennatula* y *S. spectabilis* por su amplio sistema radical en suelos con limitaciones de tipo físico, se constituyen en especies con un alto potencial y adaptabilidad para utilizar en tratamientos de Bioingeniería y en Sistemas Silvopastoriles en zonas tropicales de ladera.
- Los valores encontrados en la extensión horizontal radical en *A. pennatula* y *S. spectabilis*, indican que el área explorada por las raíces es superior a la superficie aérea cubierta por el dosel del árbol. (> 2,3 y 3,7 veces, respectivamente).
- La presencia de porcentajes altos de arcillas (> 40%), nivel bajo de macroporos (< 10%) y resistencia al corte alta (>140 kPa) en los suelos que creció *A. pennatula* y *S. spectabilis*, se constituyen en propiedades físicas que limitaron el crecimiento de los sistemas radicales.
- La irregularidad en el crecimiento radical de *A. pennatula* y *S. spectabilis*, demuestra que para procesos de restauración en suelos degradados con técnicas de Bioingeniería, un conjunto poblacional de especies vegetales suministra una mayor estabilidad en las laderas, mediante el entrecruce de raíces que da lugar al refuerzo mecánico y a procesos hidrológicos en áreas y profundidades diferentes.
- Los altos valores de la RCT obtenidos en el área de influencia de las especies vegetales estudiadas sustentan la utilización de la vegetación (Bioingeniería) como un método efectivo para la prevención de movimientos masales y para la restauración de suelos degradados por este tipo de procesos.

6. RECOMENDACIONES.

- Debido al comportamiento heterogeneo de las variables evaluadas se considera necesario realizar un mayor número de investigaciones que permitan explicar tal situación.
- Determinar el efecto de especies vegetales nativas en la estabilidad del suelo, la extracción de agua por parte de sistemas radicales y la contribución del esfuerzo de tensión de raíces en la resistencia del suelo al cortante tangencial.
- Evaluar las interacciones suelo planta en Sistemas Agroforestales y su efecto en la estabilidad del suelo.
- Fomentar coberturas vegetales en zonas de ladera tropical, especialmente Sistemas Agroforestales, que permitan dar una mayor estabilidad al terreno y prevenir la aparición de movimientos masales.

BIBLIOGRAFÍA

AKINNIFESI, F., et al. Tree root architecture. En: VAN NOORDWIJK, M.; CADISCH, G. and ONG, C. K. Bellow-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Nairobi: CAB International, 2004. p. 62-66.

AMÉZQUITA, E. El agua y la erodabilidad de los suelos. En: Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Bogota: SCCS, 1995. p. 133

_____ La fertilidad física del suelo. En: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: SCSC, 2003. p. 175.

BARRERA G., J. E. Evaluación del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas de la zona cafetera colombiana. Bogotá, 2003., 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

BERNAL E. J. Pastos y forrajes Tropicales: Producción y manejo. Bogotá: Banco Ganadero, 1994. p. 60

BERRY, P. y REID, D. Mecánica de Suelos. Traducido por Bernardo Caicedo. Bogotá: McGRAW-HILL, 1993. p. 181–204.

BISCHETTI, G. et al. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy). En: Plant and Soil. Holanda. Vol. 278, no. 1-2 (dic. 2005); p. 11 – 22.

BÖHM, W. Methods of studying root systems. Berlín: Springer-Verlag, 1979. p. 14.

BRANSBY, M. F. et al. Stabilization of slopes by vegetation reinforcement. Proc. International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. [on line]. Hong Kong: 2006. Available from internet
<URLhttp://www.dundee.ac.uk/civileng/geotechnics/staff/mfb/papers/_2_text.pdf. 6 p.

BUDOWSKY, G. Agroforestería una disciplina basada en el conocimiento tradicional. En: Revista Forestal Centroamericana. Turrialba: CATIE, 1993. p. 14.

CALLE, Z. Restauración de suelos y vegetación nativa: Ideas para una ganadería andina sostenible. Cali: Fundación CIPAV. 2003. p. 30.

CALLE, Z; MURGUEITIO, E. y CALLE, N. Enfoques silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas. Ganadería Productiva y Sostenible. Cali: CIPAV, 2001, p. 25

CASTILLO, J. A. Variación de la erodabilidad y aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en los andes Colombianos. Palmira, 2004., p. 1. Trabajo de grado (Doctor en Ciencias Agropecuarias). Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Postgrados.

CASTRO, H. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Tunja: Instituto Universitario Juan de Castellanos, 1998. p. 122

CRISTANCHO, J. Variabilidad espacial de los parámetros físicoquímicos y su relación con la distribución del sistema radical en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). Fusagasuga, 2002., p. 46. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Universidad de Cundinamarca. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. Datos de precipitación; estación pluviométrica El Retiro, período 1971 a 2006, Bolívar, Valle del Cauca, 2006. p 1.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. Evaluación Ambiental de la Calidad del Agua en el Embalse SARA BRUT. Santiago de Cali, 2005. 41 p.

DHYANI, S. K; NARAIN, P. and SINGH, R. K. Studies on root distribution of five multipurpose tree species in Doon Valley, India. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 12, no. 2. (nov. 1990); P. 149 – 161.

DONOSO, S.; RUIZ, F. y HERRERA, M. Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus globulus*. [en línea]. En: Revista de Ciencias Forestales Universidad de Chile. Santiago. Vol. 16, no. 1–2 (2001); p. 6. Disponible en Internet:<http://revistacienciasforestales.uchile.cl/>

EKANAYAKE, J. C. et al. Tree roots and slope stability: A comparison between *Pinus radiata* and *Kanuka* En: Journal of Forestry Science. Nueva Zelanda. Vol. 27, no. 2 (1997); p. 216-233.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Zonificación y uso potencial del suelo de la zona cafetera del Departamento del Valle del Cauca. Manizales: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2001. p 42.

FLÓREZ, A. Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, Cordillera Central, Colombia. Amsterdam, 1986., 159 p. Trabajo de grado (Philosophy Doctor) Universidad Van Ámsterdam

FORSYTHE, W. Física de suelos: manual de laboratorio. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1975. p. 82.

FRANTI, T. Bioengineering for hillslope, streambank and lakeshore erosion control. [on line]. Nebraska: 1997. Available from internet URL< <http://www.icecubetopper.com>. p. 1-2.

GALINDO, W. et al. Manejo Sostenible de los Sistemas Ganaderos Andinos. Cali: CIPAV, 2003. p. 30-34

GRAY, D. H. and SOTIR, R.B. Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, A practical guide for erosion control. New York: John Wiley and Sons, 1996. 378 p.

GROOT, J. J. R. and SOUMARE, A. The roots of the matter soil quality and tree roots in the Sahel. En: Agroforestry Today. Vol. 7, no 1. (jan.-march 1995); p. 9–11.

HOSSNE, A. Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. En: Revista Científica UDO Agrícola. Caracas. Vol. 4, no. 1 (2004); p. 42–52.

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. Condiciones e indicadores ambientales en Colombia, proyecciones en el corto mediano y largo plazo, [en línea] Informe mensual. 2001. Disponible en Internet: www.ideam.gov.co/

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. Terrenos afectados por movimientos en masa en Colombia, [en línea] 2000. Disponible en Internet: <http://www.ideam.gov.co>

JUÁREZ B., E. y RICO R., A. Mecánica de suelos. Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa, 2006. p. 373-411.

KRISHNAMURTHY, L. y ÁVILA, M. Agroforestería Básica. México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 1999. 340 p.

KROGSTAD, F. A. Physiology and ecology based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes. Washington, 1995., 45 p. Thesis (Master of Science) [on line]. University of Washington. Available from internet: <URL<<http://www.students.washington.edu/fkrogsta/decision/roots/rootstab.pdf>

LAL, R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Services USDA Soil Conservation Service and U.S. Agency for International Development. SMSS Technical Monograph no 21. 1994. 78 p.

LOPEZ J., C. Manual de estabilización y revegetalización de taludes, 1 ed, Madrid. 1999. 704 p

LYNCH, P. and HO, D. Rhizoeconomics: carbon costs of phosphorus acquisition. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 269, no. 1-2 (feb. 2005); p. 45-56.

MAGALHÃES, L. M. S, y BLUM, W. E. H. Distribuição radicular de espécies florestais plantadas na região de Manaus, Amazônia. [en línea]. En: Floresta e Ambiente. Brasil. Vol. 7, no 1 (jan-dez. 2000); p 93. Disponible en Internet: <http://www.ufrj.br/institutos/if/revista/pdf/p93.pdf>

MATTIA, C.; BISCHETTI, G. B. and GENTILE, F. 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical mediterranean species. En: Plant and Soil. Holanda. Vol. 278, no. 1-2 (dic. 2005); p. 23 – 32

McKEAN, S. J. Manual de Análisis de suelos y tejido vegetal. Una guía teórica y práctica de metodologías. Cali: CIAT, 1993. 103 p.

MENDIVELSO, D.; RUBIANO, Y.; MALAGÓN, C. D. y LÓPEZ, L. D. Erosión de las tierras colombianas. En: CONGRESO COLOMBIANO DE LA CIENCIA DEL SUELO. (9o.: 1998: Paipa) Conferencias Magistrales IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: SCSC. P. 41–49

MONTAGNINI, F *et al.* Sistemas Agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos. 2a. Edición, San José de Costa Rica: Organización de Estudios Tropicales, 1992. p. 59.

MONTENEGRO, H. Propiedades físicas de los suelos en relación con la Fertilidad. En: Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 2003. p.101.

MONTENEGRO, H. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. En: Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Santa fe de Bogota: SCCS, 1995. p. 120.

MONTENEGRO, H. y MALAGÓN, C. D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”, 1990. 800 p.

MORALES E. Arquitectura y distribución espacial de raíces de *Eucalyptus deglupta* dentro de un sistema agroforestal simultaneo con *Coffea arabica*. Turrialba, 1997, 122 p. Trabajo de grado (Master of Science) [en línea]. CATIE. Disponible en Internet: <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/>

MORALES, E. y BEER. J. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba. Vol. 5, no. 17-18 (ene-jun. 1998); p. 48

MURGUEITIO, M. M. Recuperación de áreas degradadas por erosión en cárcavas profundas, mediante prácticas biológicas y de Bioingeniería. Cali, 2005., 116 p. Trabajo de grado (Ecóloga). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.

MURGUEITIO, E. e IBRAHIM, M. Agroforestería pecuaria para la reconversión de la ganadería en Latinoamérica. [en línea]. En: Livestock Research for Rural Development. Cali. Vol. 13, no. 3 (2001). Disponible en Internet:
<http://www.cipav.org.co/Irrd/Irrd/13/3/murg133.htm>

ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS. Taller sobre una agenda para reducción de vulnerabilidad a los peligros naturales: El desarrollo integral regional dentro de los países. En: Boletín de Vías Universidad Nacional (Manizales). OEA. Vol. 12, no. 82, (1994); p. 131 – 189.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas: diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles. Roma: FAO, 1990. 234 p.

_____. Mantengamos viva la tierra: Causas y Remedios de la Erosión del Suelo. En: Boletín de Suelo de la FAO. Roma, (1983); p. 50.

O'LOUGHLIN, C. and ZIEMER, R. R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests, [on line] Corvallis: 1982.
Available from internet <URL< <http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/Ziemer82.PDF>.
p 70-78.

PEZO, D. e IBRAHIM, M. Sistemas Silvopastoriles. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 1999. p 4.

RIVERA P., J. H. Construcción de trincheras vivas para la conducción de aguas de escorrentía en zonas tropicales de ladera. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No 296 (2002); 8 p

_____. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín, 1999., p. 103. Trabajo de grado (Doctor en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. (Premio Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2001).

_____. Protección y recuperación de bordes de ríos y cañadas en zonas de ladera tropicales con tratamientos bioingenieriles y biotecnológicos. Chinchiná: Cenicafé. 2002. 8 p.

_____. Manejo y Estabilización de Taludes en Zonas de Ladera mediante Tratamientos de Bioingeniería. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No. 291 (2001); 8 p.

_____. Control de derrumbes y negativos en carreteras, mediante tratamientos de tipo biológico. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No. 264 (1999); 8p.

RIVERA P., J. H. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. En: Avances Técnicos Cenicafé. Colombia. No 256 (1998); 8 p.

RIVERA P., J. H. y SINISTERRA R, J. A. Uso social de la Bioingeniería para el control de la erosión severa. Cali: CIPAV. 2006. 110 p.

_____. Restauración social de suelos degradados por erosión y remociones masales en laderas andinas del Valle del Cauca Colombia con la utilización de obras de Bioingeniería. En: CONGRESO NACIONAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS. (5o.: 2005: Cali). Ponencia en Disco Compacto. Cali. 35 p.

RUSSO, R. y BOTERO, R. El componente arbóreo como recurso forrajero en los sistemas silvopastoriles. [en línea]. Escuela de agricultura de la región Tropical Húmeda EARTH San José, Costa Rica. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo1.htm>

RYSER, P. The mysterious root length. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 286, no. 1-2 (ago. 2006); 6 p.

SALAMANCA, A. Influencia de las características físicas del suelo y de su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad *Desmodium heterocarpum* subsp. *Ovalifolium* (OASHI) en tres regiones de Colombia. Palmira, 2000., p. 46-47. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

SCHLÖNVOIGT, A. et al. Estudios Ecológicos de Raíces en Sistemas Agroforestales: Experiencias Metodológicas en el CATIE. Turrialba: CATIE, 2000. p. 30-33

SUAREZ, J. Deslizamiento y estabilización de laderas en zonas tropicales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998. p. 275-302.

TOKURA, Y. et al. Árboles nativos del Valle del Cauca. Cali: Lerner, 1996. p. 297

TOKY, O. P. and BISH, R. P. Observations on the rooting patterns of some agroforestry trees in an arid region of north-western India. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 18, no. 3 (jun. 1992); p. 245-263.

TRAGSA Y TRAGSATEC. 1994. Restauración hidrológico – forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid. 902 p.

VANLAUWE, B. et al. Root distribution of *Senna siamea* grown on a series of derived savana zone soils in Togo, West Africa. En: Agroforestry Systems. Holanda. Vol. 54, no. 1 (ene. 2002); p. 3.

VAN NOORDWIJK, M.; SPEK, L. Y. and PURNOMOSIDHI, P. Quantifying shallow roots: Tree geometry makes root research easy. En: Agroforestry Today. Vol. 7, no. 2. (apr.-jun. 1995); p. 9.

VARELA, A. Análisis e interpretación de propiedades biológicas. En: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: SCSC, 2003. p. 55.

VERCHOT, L. et al. Soil-Atmosphere Gas Exchange in Tropical Agriculture: Contributions to Climate Change. En: VAN NOORDWIJK, M.; CADISCH, G. and ONG, C. K. Bellow-ground Interactions in Tropical Agroecosystems. Nairobi: CAB International, 2004. p. 221.

WATSON, A.; PHILLIPS, C. and MARDEN, M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species y their contribution to slope stability. En: Plant and soil. Holanda. Vol. 217, no. 1-2 (dic. 1999); p. 39-47.

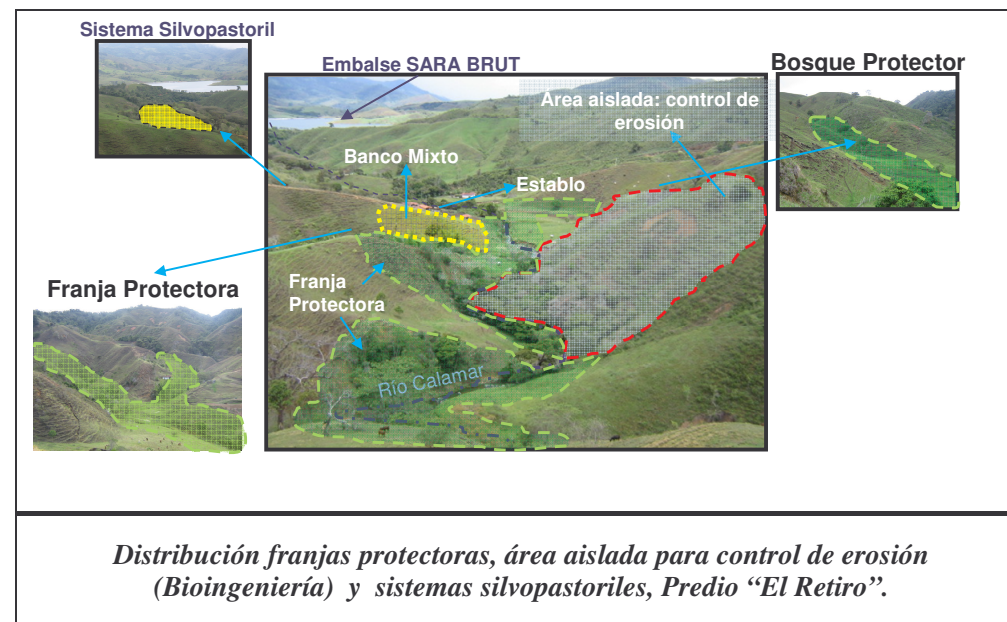
WU, T. H. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island. Geotech. Eng. Rep. 5 Civil Eng. Dep. Ohio State University Columbus Ohio, USA, 1976. 93 p.

ZIEMER, R. R. Roots and the stability of forested slopes. In: Timothy, R. H. y Andrew, J. Pearce, Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steplands, proceedings of the Christchurch Symposium, [on line] Nueva Zelanda: 1981. Available from internet: <URL<<http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/ZiemerIAHS.PDF>. p. 343 – 361.

ZIEMER, R. R. The role of vegetation in the stability of forested slopes, [on line] Nueva Zelanda: 1981. Available from internet: <URL<<http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/ZiemerIUFRO1981.PDF>. p. 297-308.

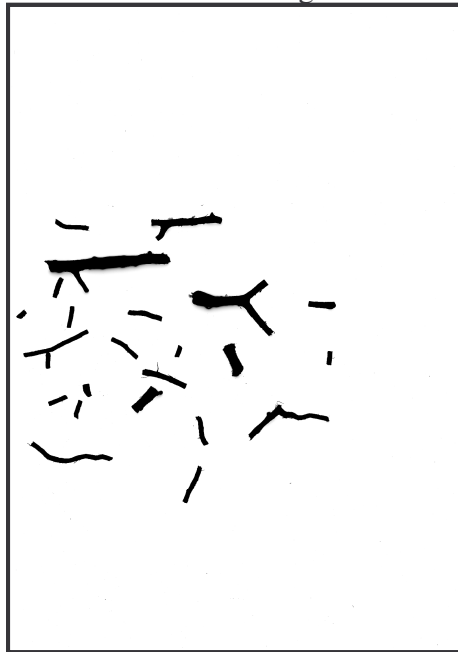
ZIEMER, R.R. and SWANSTON, D. N. Root strength changes after logging in Southeast Alaska. [on line] Oregon: 1977. Available from internet: <URL<<http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer77.PDF>. 10 p.

Anexo A. Reconversión productiva y Restauración Ecológica, en fincas aledañas al Embalse BRUT, en el marco del Convenio 012 entre CVC y CIPAV, en Bolívar, Valle del Cauca.

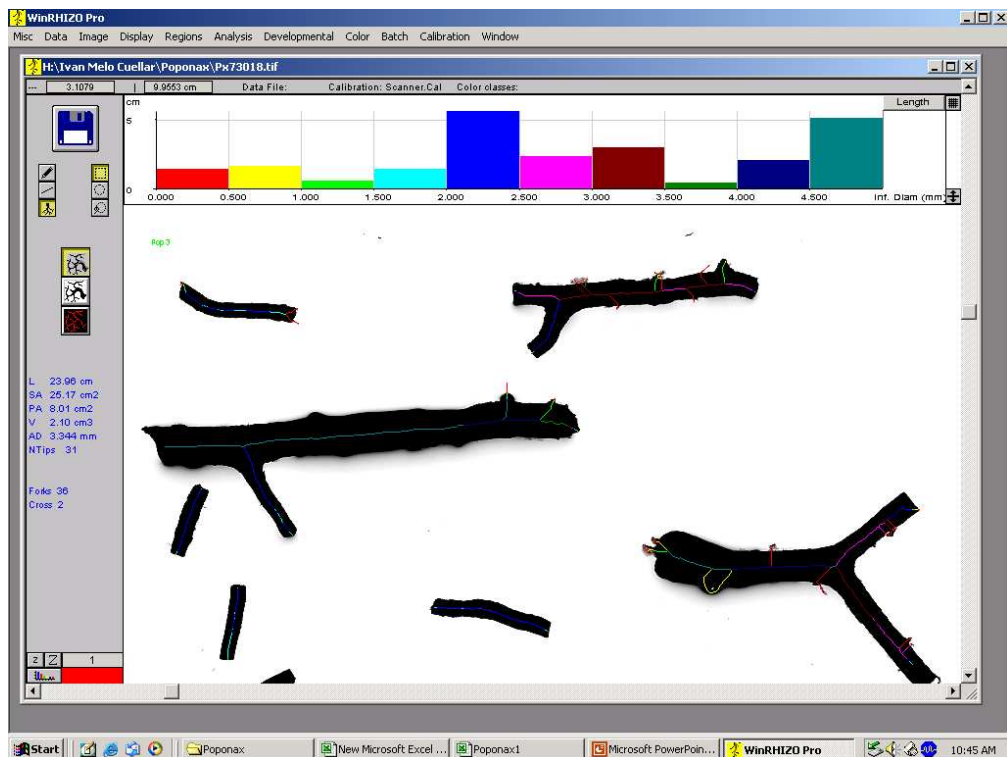


Anexo B. Digitalización de muestras de raíces y análisis de imágenes con el software WinRHIZO Pro®.

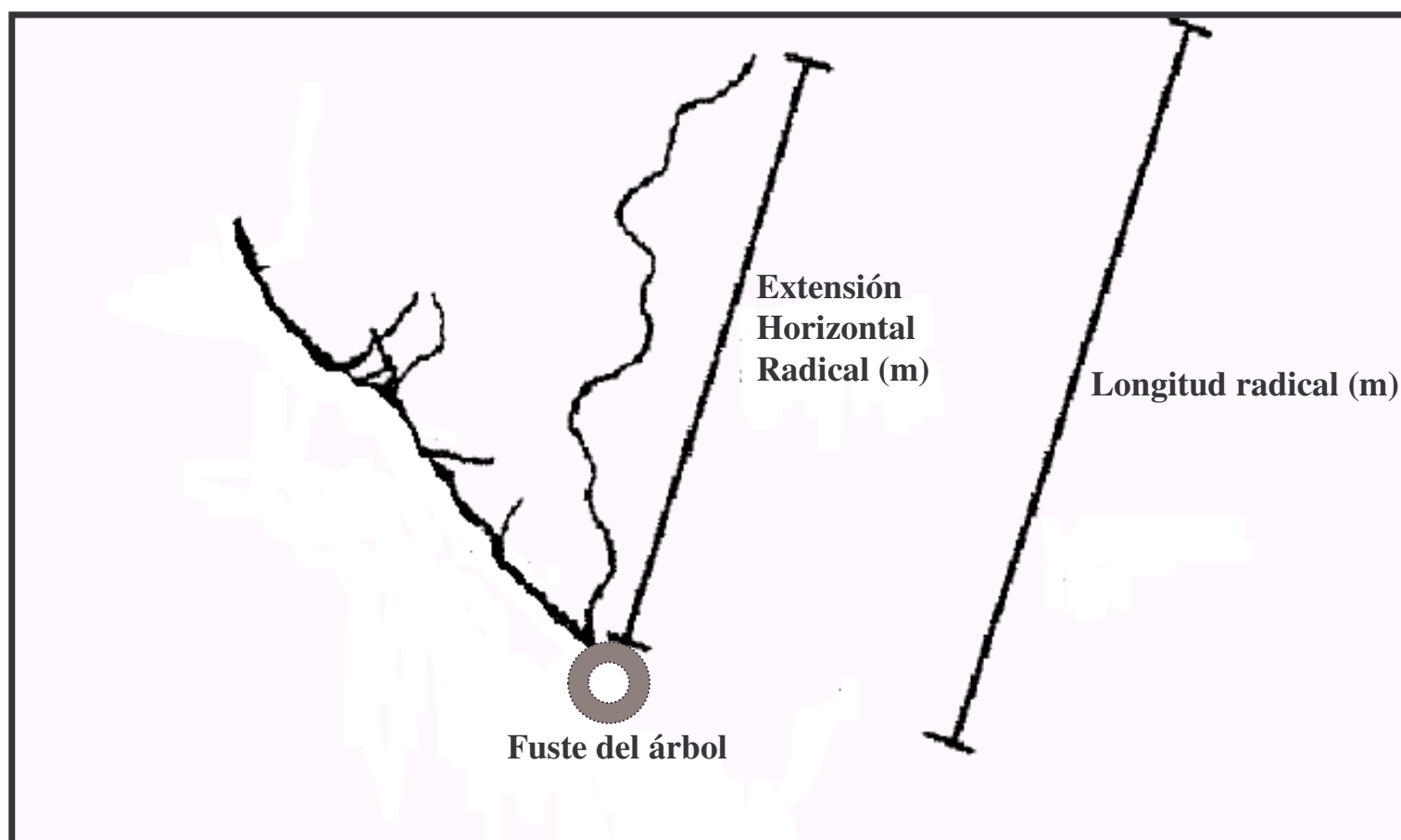
Muestra de raíz digitalizada



Análisis de imágenes de raíces.



Anexo C. Representación gráfica de longitud y extensión horizontal radical.



Anexo D. Análisis de varianza para la resistencia al cortante tangencial, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RCT	90	0,46	0,43	17,08

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	24670,58	6	4111,76	11,99	<0,0001
Distancia	2784,74	2	1392,37	4,06	0,0208
Prof. (cm)	21885,84	4	5471,46	15,96	<0,0001
Error	28453,91	83	342,82		
Total	53124,49	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 342,8182 gl: 83

Distancia (m)	Medias	n	
3,4	101,29	30	A
1,7	109,02	30	A B
5,1	114,88	30	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 342,8182 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n	
25-50	87,66	18	A
50-75	95,00	18	A
0-25	112,31	18	B
75-100	115,33	18	B
100-125	131,70	18	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Anexo E. Análisis de varianza para la resistencia al cortante tangencial, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RCT	45	0,58	0,55	22,44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	30023,19	6	5003,87	8,82	<0,0001
Distancia	2816,14	2	1408,07	2,48	0,0971
Prof. (cm)	27207,06	4	6801,76	11,99	0,0001
Error	21565,01	38	567,50		
Total	51588,21	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 567,5003 gl: 38

Distancia (m)	Medias	n	
1,7	98,16	15	A
3,4	103,39	15	A B
5,1	116,93	15	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 567,5003 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n	
0-25	75,81	9	A
25-50	79,80	9	A
50-75	110,63	9	B
75-100	128,93	9	B C
100-125	135,63	9	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Anexo F. Mediciones de la resistencia al cortante tangencial (RCT) en *Acacia pennatula* y *Senna spectabilis*

Distancia respecto al árbol (m)	Profundidad (cm)	RCT, <i>Acacia pennatula</i> 1 (KPa)	RCT, <i>Acacia pennatula</i> 2 (KPa)	RCT, <i>Senna spectabilis</i> 1 (KPa)
1,7	0-25	96,6	102,5	41,3
3,4	0-25	103,1	94,3	61
5,1	0-25	126,3	126,6	100,1
1,7	0-25	137,3	99,9	113,6
3,4	0-25	118	90,8	78,3
5,1	0-25	122,5	130,2	43,8
1,7	0-25	109,5	101,4	59,7
3,4	0-25	132	80,3	90,4
5,1	0-25	137	113,1	94,1
1,7	25-50	62,6	81	60,6
3,4	25-50	85,9	80,6	75,7
5,1	25-50	138,8	84,6	140
1,7	25-50	130,4	70,4	49,2
3,4	25-50	119,3	73,6	48,6
5,1	25-50	94,4	73,2	72,7
1,7	25-50	63,2	90,4	45
3,4	25-50	87,4	65,9	118,4
5,1	25-50	90,1	86,1	108
1,7	50-75	94,5	82,8	118,8
3,4	50-75	94,1	78,3	74,9
5,1	50-75	140	101,3	140
1,7	50-75	126,4	94,4	85,1
3,4	50-75	115,2	83,9	102,8
5,1	50-75	81,3	88,3	140
1,7	50-75	78,6	108,1	140
3,4	50-75	69	86,9	118,8
5,1	50-75	93,8	93	75,3
1,7	75-100	140	85,5	109,6
3,4	75-100	130,4	97	129,3
5,1	75-100	140	108,4	140
1,7	75-100	121,4	126,7	128,9
3,4	75-100	136,1	102,3	92,6
5,1	75-100	140	107,3	140
1,7	75-100	106,1	140	140
3,4	75-100	66,8	126,4	140
5,1	75-100	81,9	119,5	140
1,7	100-125	140	120,8	100,7
3,4	100-125	140	87	140
5,1	100-125	140	140	140
1,7	100-125	140	140	140
3,4	100-125	140	113,6	140
5,1	100-125	140	140	140
1,7	100-125	140	140	140
3,4	100-125	100,6	140	140
5,1	100-125	128,7	140	140

Anexo G. Análisis de varianza para densidad aparente, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
D aparente	90	0,13	0,07	3,17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	6	2,4E-03	2,04	0,0698
Distancia	1,9E-03	2	9,4E-04	0,80	0,4506
Prof. (cm)	0,01	4	3,1E-03	2,65	0,0388
Error	0,10	83	1,2E-03		
Total	0,11	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0012 gl: 83

Distancia (m)	Medias	n
3,4	1,08	30 A
1,7	1,08	30 A
5,1	1,09	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0012 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n
0-25	1,07	18 A
25-50	1,07	18 A
50-75	1,08	18 A B
75-100	1,08	18 A B
100-125	1,10	18 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Anexo H. Análisis de varianza para densidad aparente, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
D aparent	45	0,11	0,00	2,01

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,2E-03	6	3,7E-04	0,79	0,5820
Distancia	1,9E-03	2	9,4E-04	2,00	0,1497
Prof. (cm)	3,5E-04	4	8,9E-05	0,19	0,9426
Error	0,02	38	4,7E-04		
Total	0,02	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0005 gl: 38

Distancia	Medias	n
1,7	1,07	15 A
3,4	1,08	15 A
5,1	1,08	15 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0005 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
25-50	1,07	9 A
50-75	1,07	9 A
75-100	1,08	9 A
0-25	1,08	9 A
100-125	1,08	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo I. Análisis de varianza para densidad real, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
D Real	90	0,23	0,17	7,10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,80	6	0,13	4,08	0,0013
Distancia	4,6E-03	2	2,2E-03	0,07	0,9322
Prof. (cm)	0,80	4	0,20	6,08	0,0002
Error	2,72	83	0,03		
Total	3,53	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0329 gl: 83

Distancia	Medias	n	
1,7	2,54	30	A
5,1	2,56	30	A
3,4	2,56	30	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0329 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n			
0-25	2,41	18	A		
25-50	2,49	18	A	B	
50-75	2,56	18		B	C
75-100	2,64	18			C
100-125	2,67	18			C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo J. Análisis de varianza para densidad real, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
D Real	45	0,57	0,50	3,97

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,58	6	0,10	8,29	0,0001
Distancia	0,10	2	0,05	4,30	0,0207
Prof. (cm)	0,48	4	0,12	10,28	0,0001
Error	0,44	38	0,01		
Total	1,03	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0117 gl: 38

Distancia	Medias	n	
3,4	2,67	15	A
1,7	2,73	15	A B
5,1	2,78	15	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,0117 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n	
25-50	2,61	9	A
0-25	2,61	9	A
50,75	2,72	9	B
75-100	2,83	9	C
100-125	2,85	9	C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo K. Análisis de varianza para porosidad total, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P Total	90	0,07	0,00	8,88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	95,19	6	15,87	0,99	0,4372
Distancia	47,51	2	23,75	1,48	0,2329
Prof. (cm)	47,68	4	11,92	0,74	0,5646
Error	1329,50	83	16,02		
Total	1424,69	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 16,0180 gl: 83

Distancia(m)	Medias	n
1,7	44,17	30 A
5,1	45,05	30 A
3,4	45,95	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 16,0180 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n	
75-100	43,99	18	A
100-125	44,68	18	A
50-75	45,01	18	A
25-50	45,44	18	A
0-25	46,16	18	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo L. Análisis de varianza para macroporos, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Macroporos	90	0,11	0,04	21,6

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	77,69	6	12,95	1,68	0,1352
Distancia	2,46	2	1,23	0,16	0,8527
Prof. (cm)	75,24	4	18,81	2,45	0,0428
Error	638,33	83	7,69		
Total	716,02	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 7,6907 gl: 83

Distancia(m)	Medias	n
5,1	1,11	30 A
3,4	1,23	30 A
1,7	1,51	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 7,6907 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n
0-25	0,18	18 A
50-75	0,48	18 A
75-100	1,29	18 A B
25-50	1,73	18 A B
100-125	2,74	18 B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo M. Análisis de varianza para mesoporos, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Mesoporos	90	0,29	0,24	21,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	94,70	6	15,78	5,64	0,0001
Distancia	5,06	2	2,53	0,90	0,5084
Prof. (cm)	89,63	4	22,41	8,00	0,0001
Error	232,37	83	2,80		
Total	327,06	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 2,7996 gl: 83

Distancia (m)	Medias	n
3,4	7,57	30 A
1,7	7,68	30 A
5,1	8,12	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 2,7996 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n		
0-25	6,79	18	A	
25-50	7,16	18	A	B
50-75	7,21	18	A	B
75-100	8,26	18		B
100-125	9,53	18		C

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo N. Análisis de varianza para microporos, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Microporos	90	0,26	0,20	12,39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	567,51	6	94,58	4,76	0,0003
Distancia	72,03	2	36,01	1,81	0,1695
Prof. (cm)	495,48	4	123,87	6,24	0,0002
Error	1648,39	83	19,86		
Total	2215,89	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 19,8601 gl: 83

Distancia (m)	Medias	n
1,7	34,98	30 A
5,1	35,82	30 A
3,4	37,15	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 19,8601 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n	
100-125	32,41	18	A
75-100	34,44	18	A B
25-50	36,55	18	B C
50-75	37,32	18	B C
0-25	39,19	18	C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo O. Análisis de varianza para porosidad total, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P Total	45	0,07	0,00	14,38

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	104,31	6	17,38	0,45	0,8421
Distancia	12,60	2	6,30	0,16	0,8509
Prof. (cm)	91,70	4	22,93	0,59	0,6718
Error	1476,15	38	38,85		
Total	1580,46	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 38,8462 gl: 38

Distancia (m)	Medias	n
5,1	42,68	15 A
1,7	43,36	15 A
3,4	43,97	15 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 38,8462 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	41,79	9 A
50-75	42,66	9 A
75-100	42,82	9 A
0-25	43,42	9 A
25-50	45,99	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo P. Análisis de varianza para macroporos, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Macroporos	45	0,54	0,47	71,9

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	790,26	6	131,71	7,38	0,0001
Distancia	280,08	2	140,04	7,85	0,0014
Prof. (cm)	510,18	4	127,54	7,15	0,0002
Error	677,99	38	17,84		
Total	1468,25	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 17,8418 gl: 38

Distancia(m)	Medias	n
1,7	3,04	15 A
3,4	5,49	15 A
5,1	9,12	15 B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 17,8418 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
0-25	1,66	9 A
50-75	3,50	9 A B
25-50	5,82	9 A B
75-100	6,88	9 B
100-125	11,55	9 C

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo Q. Análisis de varianza para mesoporos, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Mesoporos	45	0,12	0,00	21,21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14,27	6	2,38	0,89	0,5109
Distancia	5,38	2	2,69	1,01	0,3743
Prof. (cm)	8,89	4	2,22	0,83	0,5128
Error	101,36	38	2,67		
Total	115,63	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 2,6674 gl: 38

Distancia(m)	Medias	n
5,1	7,22	15 A
3,4	7,87	15 A
1,7	8,01	15 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 2,6674 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	7,03	9 A
25-50	7,61	9 A
75-100	7,66	9 A
50-75	7,79	9 A
0-25	8,43	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo R. Análisis de varianza para microporos, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Microporos	45	0,39	0,30	20,3

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	899,82	6	149,92	4,11	0,0028
Distancia	283,46	2	141,73	3,89	0,0291
Prof. (cm)	616,04	4	154,01	4,22	0,0063
Error	1385,36	38	36,46		
Total	2284,86	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 34,4568 gl: 38

Distancia(m)	Medias	n
5,1	26,34	15 A
3,4	30,61	15 A B
1,7	32,31	15 B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 34,4568 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	23,20	9 A
75-100	28,28	9 A B
50-75	31,37	9 B
25-50	32,56	9 B
0-25	33,34	9 B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo S. Análisis de varianza para humedad a capacidad de campo, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% H Cap campo	90	0,09	0,03	10,17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	205,93	6	34,32	1,45	0,2054
Distancia	0,97	2	0,48	0,02	0,9798
Prof. (cm)	204,97	4	51,24	2,17	0,0499
Error	1963,71	83	23,66		
Total	2169,64	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 23,659 gl: 83

Distancia(m)	Medias	n
3,4	47,69	30 A
1,7	47,89	30 A
5,1	47,92	30 A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 23,659 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	45,77	18 A
75-100	47,20	18 A B
25-50	47,82	18 A B
50-75	47,98	18 A B
0-25	50,42	18 B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo T. Análisis de varianza para humedad a capacidad de campo, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% H C campo	45	0,48	0,40	17,44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1571,69	6	261,95	5,84	0,0002
Distancia	452,64	2	226,32	5,04	0,0114
Prof. (cm)	1119,05	4	279,76	6,232	0,0006
Error	1705,25	38	44,87		
Total	3276,94	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 44,8749 gl: 38

Distancia	Medias	n	
5,1	34,07	15	A
3,4	39,55	15	B
1,7	41,58	15	B

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 44,8749 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n	
100-125	30,24	9	A
75-100	36,02	9	A B
50-75	39,51	9	B C
25-50	41,35	9	B C
0-25	44,89	9	C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo U. Análisis de varianza para la humedad a punto de marchitez permanente, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% H PMP	90	0,18	0,12	13,74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	544,83	6	90,81	3,00	0,0105
Distancia	2,57	2	1,29	0,04	0,9584
Prof. (cm)	542,26	4	135,57	4,48	0,0025
Error	2510,69	83	30,25		
Total	3055,52	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 30,2493 gl: 83

Distancia (m)	Medias	n	
5,1	39,80	30	A
3,4	40,07	30	A
1,7	40,21	30	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 30,2493 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n	
100-125	36,15	18	A
75-100	38,94	18	A B
25-50	40,66	18	B C
50-75	40,77	18	B C
0-25	43,63	18	C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Anexo V. Análisis de varianza para humedad a punto de marchitez permanente, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% H PMP	45	0,47	0,38	20,37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1306,53	6	217,76	5,67	0,0003
Distancia	359,82	2	179,91	4,60	0,0162
Prof. (cm)	946,71	4	236,68	6,05	0,0007
Error	1485,52	38	39,09		
Total	2792,06	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 39,0928 gl: 38

Distancia	Medias	n
5,1	26,85	15 A
3,4	31,68	15 B
1,7	33,57	15 B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 39,0928 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	23,20	9 A
75-100	28,37	9 A B
50-75	31,72	9 B C
25-50	33,75	9 B C
0-25	36,46	9 C

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo W. Análisis de varianza para lámina de agua, en el suelo de *Acacia pennatula*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Lamina agua	90	0,30	0,25	21,35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6,19	6	1,03	5,94	0,0001
Distancia	0,27	2	0,14	0,79	0,5569
Prof. (cm)	5,92	4	1,48	8,52	0,0001
Error	14,41	83	0,17		
Total	20,60	89			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,1736 gl: 83

Distancia(m)	Medias	n	
3,4	1,91	30	A
1,7	1,92	30	A
5,1	2,03	30	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,1736 gl: 83

Prof. (cm)	Medias	n	
0-25	1,70	18	A
25-50	1,79	18	A B
50-75	1,80	18	A B
75-100	2,06	18	B
100-125	2,40	18	C

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Anexo X. Análisis de varianza para lámina de agua, en el suelo de *Senna spectabilis*.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Lamina agua 45		0,12	0,00	21,21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,89	6	0,15	0,89	0,5109
Distancia	0,34	2	0,17	1,01	0,3743
Prof. (cm)	0,56	4	0,14	0,83	0,5128
Error	6,34	38	0,17		
Total	7,23	44			

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,1667 gl: 38

Distancia (m)	Medias	n
5,1	1,80	15 A
3,4	1,97	15 A
1,7	2,00	15 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Test:Duncan Alfa:=0,05

Error: 0,1667 gl: 38

Prof. (cm)	Medias	n
100-125	1,76	9 A
25-50	1,90	9 A
75-100	1,91	9 A
50-75	1,95	9 A
0-25	2,11	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)