

**ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DE OBRAS DE BIOINGENIERÍA PARA LA
RESTAURACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TALUDES AFECTADOS POR
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN CORDILLERA SUR, CIUDAD
BOLÍVAR, BOGOTÁ.**

DANIELA GIRALDO MEDINA

49102051

MARIA ALEJANDRA TOMBÉ SERNA

49102051

**UNIVERSIDAD DELCAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN
2016**

**ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DE OBRAS DE BIOINGENIERÍA PARA LA
RESTAURACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TALUDES AFECTADOS POR
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN CORDILLERA SUR, CIUDAD
BOLÍVAR, BOGOTÁ.**

**DANIELA GIRALDO MEDINA
MARIA ALEJANDRA TOMBÉ SERNA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Ambiental.**

**DIRECTOR
JUAN CARLOS CASAS ZAPATA
PhD EN CIENCIAS AMBIENTALES
DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN GCISA-TSEJK
UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**CODIRECTOR
JORGE IGNACIO MONTOYA RESTREPO
MSc. EN BIOLOGÍA
DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN INTEGRA
TECNOLÓGICO DE ANTIOQUIA**

**ASESOR
LUCIO GERARDO CRUZ VELASCO
PhD. EN INGENIERÍA
PROFESOR DPTO. DE GEOTECNIA**

**UNIVERSIDAD DELCAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN
2016**

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, Septiembre de 2016

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por permitirme culminar una etapa muy importante en mi vida, por cada bendición y por cada oportunidad presentada a lo largo de mi carrera.

A mis hermanos Mónica Giraldo y Darío Giraldo por ser una inspiración y una motivación para ser mejor cada día, por ir detrás de cada meta y no descansar hasta cumplirla satisfactoriamente.

A mi madre Sonia Medina por tanto sacrificio y esfuerzo por ver a sus hijos salir adelante y ser personas de bien y excelentes profesionales.

A mi compañera, amiga y hermana María Alejandra Tombé, por apoyo, las enseñanzas y el arduo trabajo realizado en su compañía.

Le pido a Dios que me acompañe en esta nueva etapa de mi vida y que el camino se encuentre lleno de oportunidades que me hagan crecer como persona y como profesional.

Daniela Giraldo Medina

A Dios por todas sus bendiciones a lo largo de mi vida, por ser la luz que aclara mis incertidumbres, la calma a mis temores y la fuerza en mis momentos más difíciles.

A mi abuelita Yolanda, mi mayor admiración y ejemplo a seguir, mi gran maestra de la vida, una excelente mujer y toda una guerrera. Tu presencia, aunque ahora de una manera diferente, es mi impulso para creer que soy capaz de lograr todo lo que me propongo.

A mi hermana Camila por ser un gran apoyo en mi vida y mi motivación para ser más fuerte.

A mis padres por apostar todo por nuestro futuro y nuestra felicidad y quienes siempre han creído firmemente en mí.

A Daniela Giraldo quien además de ser una gran compañera de estudio, es una excelente amiga y compañía y de quien he aprendido muchas cosas.

A toda mi familia con quienes siempre he podido contar, gracias por brindarme su apoyo, escucha y amor.

María Alejandra Tombé Serna

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por cada bendición en el desarrollo de nuestra carrera y nuestro proyecto.
- A las familias Giraldo Medina y Tombé Serna por su amor y apoyo incondicional,
por los sacrificios y motivación en cada momento difícil.
- Al Ph.D. Juan Carlos Casas Zapata y M.Sc. Jorge Ignacio Montoya por permitirnos
tener la experiencia en la ciudad de Bogotá.
- Al Ph.D. Lucio Cruz por sus asesorías, constante acompañamiento y el interés
mostrado por la investigación realizada.
- A los Ing. Yesica Ardila y Daniel Holguín por su constante colaboración, por estar
pendiente del desarrollo del proyecto y por ese gran carisma que los caracteriza.
- Al M. Sc. Edwin Rengifo Canizales por sus asesorías y majestuosa ayuda.
- Al Sociólogo Jhon Fredy Espejo por su disposición, colaboración y apoyo.
- A la Ph.D. Carmen por sus valiosos aportes y acompañamiento en la etapa
experimental del proyecto.
- A todo el equipo de trabajo de Convenio 494, del 2014 por sus enriquecedores
aportes en nuestra formación como profesionales.
- A doña Blanquita y don Salvador, de la comunidad de Cordillera Sur, por su
acogimiento, amor y preocupación.
- A la ing. Wendy Cerezo por su paciencia y colaboración en la parte práctica del
proyecto.
- Y en general a todas las personas que contribuyeron de alguna manera al
desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE	16
CAPÍTULO II. PROBLEMA DE INVESTIGACION	22
2.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCION DEL ÁREA DEL PROBLEMA.....	22
2.2 JUSTIFICACION	25
2.3. OBJETIVOS	26
2.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	26
2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
CAPITULO III. OBRAS DE BIOINGENIERIA EJECUTADAS Y ANÁLISIS CUALITATIVO	27
3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA IMPLEMENTADAS	27
3.2.2. Filtros Vivos Primarios.....	27
3.2.3. Filtros vivos secundarios:	28
3.2.4. Trinchos disipadores	29
3.2.5. Trinchos de Estabilización.....	30
3.2.6. Revegetalización	30
3.2.7. Senderos	34
3.3. ANALISIS CUALITATIVO.....	35
3.3.2. Recopilación y registro de contenidos fotográficos previos a la implementación de las obras	35
3.3.3. Recopilación y registro de contenidos fotográficos durante la implementación de las obras	37
3.3.4. Recopilación y registro de contenidos fotográficos posterior a la implementación de las obras.	41
CAPITULO IV. EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERIA MEDIANTE PRUEBAS FISICAS DE SUELO.....	48
5.1. DESARROLLO METODOLOGICO	48
5.1.1. Sistema de muestreo	48

5.2. RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS	50
5.2.1. Textura	50
5.2.2. Humedad de Campo.	52
5.2.3. Densidad aparente (DA).....	54
5.2.4. Densidad real (DR) y porosidad (P)	56
5.2.5. Contenido de materia orgánica (CMO).....	60
CAPITULO VI. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD ASOCIADA A LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOTÉCNICO.	
63	63
6.1. DESARROLLO METODOLOGICO	65
6.1.1. Métodos de cálculo:	65
6.1.2. Geometría y estratigrafía:.....	65
6.1.3. Superficies de deslizamiento:.....	67
6.1.4. Propiedades de los suelos:	67
6.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	69
6.2.1. PERFIL N°1: Parte izquierda del polígono de intervención.	69
6.2.2. PERFIL N°2: Parte media del polígono de intervención.	75
6.2.3. PERFIL N°3: Parte derecha del polígono de intervención.....	80
CONCLUSIONES	90
RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXOS.....	99
ANEXO 1. Algunas Obras de bioingeniería Comunes.	99
ANEXO 2. Determinación de la textura.....	103
ANEXO 3: Prueba de humedad de campo y densidad aparente (DA).....	105
ANEXO 4. Prueba de densidad real (DR) y porosidad (P).....	106
ANEXO 5. Prueba de contenido de materia orgánica (CMO)	107
ANEXO 6. Resultados de pruebas físicas	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de intervención.....	22
Figura 2. Deslizamiento superficial aledaño al polígono de intervención.....	23
Figura 3. Construcción de Filtros vivos primarios y trinchos de disipación.	28
Figura 4. Trinchos de estabilización construidas en Cordillera Sur.....	30
Figura 5. Senderos construidos en Cordillera Sur.	34
Figura 7. Escombros provenientes de la demolición de las casas, Mayo, 2014. ...	36
Figura 8. Construcción del filtro secundario-filtro 1, Septiembre de 2015.....	37
Figura 9. Filtro vivo 1, Julio de 2015.	38
Figura 10. Construcción de los Trinchos de estabilización y senderos, escalera 1, Octubre de 2015.....	38
Figura 11. Georreferenciación de trinchos disipadores, Octubre de 2015.	39
Figura 13. Construcción de Trinchos de estabilización parte alta del talud, Octubre de 2015.	40
Figura 14. Vista global de terrazas de estabilización parte izquierda del polígono. Diciembre de 2015.	40
Figura 15. Relleno y apisonamiento en trinchos de estabilización, Noviembre de 2015.....	40
Figura 16. Senderos y huerta, Marzo de 2016.....	41
Figura 17. Sendero, Marzo de 2016.	42
Figura 18. Trinchos de estabilización contiguos a gradas N ^o 1,.....	42
Figura 19. Trinchos de estabilización contiguos a gradas N ^o 1, Abril de 2016.....	43
Figura 20. Trinchos de estabilización entre gradas n ^o 1 y 2, Abril de 2016.	43
Figura 21. Filtro primario 2 primario. Febrero de 2016.....	44
Figura 22. Filtro primario 2, parte alta, Marzo de 2016	44
Figura 23. Filtro primario 2, parte media, Marzo de 2016	44
Figura 24. Filtro secundario del filtro 2, Febrero de 2016	45
Figura 25. Filtro secundario del filtro 2, Abril 2016.....	45
Figura 26. Filtro vivo 1 primario y secundario, Julio de 2016	45
Figura 28. Filtro 0 primario y secundario, Febrero de 2016.	46
Figura 29. Filtro 0 primario y secundario, Abril de 2016.....	46
Figura 30. Polígono de intervención Agosto de 2015	47
Figura 31. Polígono de intervención Abril de 2016	47
Figura 32. Cuadrícula divisoria del polígono para toma de muestras.	49
Figura 33: Métodos de cálculo del Fs	64
Figura 34: Recomendaciones de la geometría de un modelo.....	66
Figura 35. Selección de las tres perfiles representativos del talud	66

Figura 36. Modelación perfil 1, condición global, condiciones iniciales, iguales radios y cuadrícula.....	70
Figura 37. Modelación perfil 1, condición global, con Bioingeniería, iguales radios y cuadrícula.....	70
Figura 38. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte superior, mismos radios y cuadrícula.....	71
Figura 39. Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte superior, mismos radios y cuadrícula.....	72
Figura 40. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.....	72
Figura 41. Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte media, mismos radios y cuadrícula.....	73
Figura 42. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte baja, mismos radios y cuadrícula.....	73
Figura 43. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.....	74
Figura 44: Modelación perfil N°1, condición local inicial, parte baja, igual círculo de falla.....	74
Figura 45: Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte baja, igual círculo de falla.....	75
Figura 46. Modelación perfil 2, condición global, condiciones iniciales, mismos radios y cuadrícula.....	76
Figura 47. Modelación perfil 2, condición global, con Bioingeniería, mismos radios y cuadrícula.....	76
Figura 48. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte superior, mismos radios y cuadrícula.....	77
Figura 49. Modelación perfil 2, condición local con bioingeniería, parte superior, mismos radios y cuadrícula.....	77
Figura 50. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.....	78
Figura 51. Modelación perfil 2, condición local con Bioingeniería, parte media, mismos radios y cuadrícula.....	78
Figura 52. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte baja, mismos radios y cuadrícula.....	79
Figura 53. Modelación perfil 2, condición local con Bioingeniería, parte baja, mismos radios y cuadrícula.....	79
Figura 54. Modelación perfil 3 global, condiciones iniciales, radios y cuadrícula iguales.....	80
Figura 55. Modelación perfil 3 global, con Bioingeniería, radios y cuadrícula iguales.....	80

Figura 56. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte alta, igual radio y cuadrícula.	81
Figura 57. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte alta, igual radio y cuadrícula.	82
Figura 58. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte superior, igual círculo de falla	82
Figura 59. Modelación perfil 3, condición local con Bioingeniería, parte superior, igual círculo de falla.....	83
Figura 60. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte media, igual radio y cuadrícula.....	83
Figura 61. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte media, igual radio y cuadrícula.	84
Figura 62. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte media, iguales círculos de falla	84
Figura 63. Modelación perfil 3, condición local con Bioingeniería, parte media, iguales círculos de falla	85
Figura 64. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte baja, igual radio y cuadrícula.....	85
Figura 65. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte baja, igual radio y cuadrícula.	86
Figura 66. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte baja, iguales círculos de falla	86
Figura 67. Modelación perfil 3, Condición local con Bioingeniería, parte baja, iguales círculos de falla.....	87
Figura A1. 1. Fajina viva en talud.....	99
Figura A1. 2. Muros de criba o Cribwall con estacas vivas	99
Figura A1. 3. Geomallas de multifilamentos de alto peso molecular.....	100
Figura A1. 4. Técnica de Willow Spiling	100
Figura A1. 5. Zanja de corona.....	100
Figura A1. 6. Detalle de las zanjas de corona para el control de aguas superficiales en un talud.	101
Figura A1. 7. Trinchos de Estabilización con estacas Vivas	101
Figura A1. 8. Filtros Vivos	102
Figura A1. 9. Trinchos de disipación en filtros vivos	102
Figura A2. 1. Tamizado de muestras por tamiz de 2 mm	103
Figura A2. 2. Secado de las muestras de suelo	103
Figura A2. 3. Agitación de las muestras	103
Figura A2. 4. Muestras en el cilindro aforado y medición con hidrómetro.....	103

Figura A3. 1. Toma de muestras inalteradas mediante tubos biselados.....	105
Figura A4. 1. Picnómetro con muestra de suelo seco.....	106
Figura A4. 2. Extracción de aire en cámara de vacío	106
Figura A4. 3. Picnómetro con muestra de suelo seco y 1/3 de agua destilada....	106
Figura A5. 1. Pesaje de la muestra de suelo seco y tamizado de la misma	108
Figura A5. 2. Ignición de la muestra en la Mufla 360 °C	108
Figura A5. 3. Enfriado de las muestras en el desecador	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especies vegetativas establecidas en el polígono.	32
Tabla 2. Métodos utilizados en cada prueba realizada	50
Tabla 3. Estadísticos descriptivos prueba Humedad Gravimétrica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	53
Tabla 4. Prueba de normalidad contenido de Humedad Gravimétrica de la diferencia antes y después de las obras de bioingeniería.	53
Tabla 5. Estadísticos de muestras Humedad Gravimétrica relacionadas antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	54
Tabla 6. Correlaciones de muestras Humedad Gravimétrica relacionadas antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	54
Tabla 7. Estadísticos descriptivos prueba Densidad Aparente antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	55
Tabla 8. Prueba de normalidad Densidad Aparente antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	55
Tabla 9. Estadísticos de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	56
Tabla 10. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	56
Tabla 11. Estadísticos descriptivos prueba Densidad Real antes de la bioingeniería y Porosidad antes y después de la implementación de obras de bioingeniería.	58
Tabla 12. Prueba de Normalidad para diferencia de Porosidad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	59
Tabla 13. Estadísticos de muestras porosidad relacionadas para prueba t pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería. ...	59
Tabla 14. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada porosidad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería. .	60
Tabla 15. Estadísticos descriptivos prueba Contenido de Materia Orgánica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	61
Tabla 16. Prueba de normalidad para diferencia de Contenido de Materia Orgánica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería....	61
Tabla 17. Estadísticos de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	62
Tabla 18. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.	62
Tabla 19: Parámetros de resistencia del talud	68
Tabla A1. 1.Resultados Prueba de Textura	104
Tabla A6. 1. Resultados de pruebas físicas HG, HV, DA, DR, P,MO.....	109

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Triangulo Textural de los Estados Unidos	51
Gráfica 2. Texturas presentes en el talud de intervención en porcentaje	51
Gráfica 3. Diagrama de cajas, resultados de Humedad Gravimétrica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.....	53
Gráfica 4. Diagrama de cajas, resultados de densidad aparente (DA)	55
Gráfica 5. Diagrama de cajas Densidad Real	58
Gráfica 6. Diagrama de Cajas P	59
Gráfica 7. Diagrama de cajas, resultados de Contenido de materia orgánica (CMO)	61
Gráfica 8. Incrementos en porcentaje (%) del Fs con iguales radios y cuadrícula de la superficie de deslizamiento.....	87
Gráfica 9. Incrementos en porcentaje (%) del Fs con iguales círculos de falla	88
Gráfica 10: Fs antes y después de la implementación de obras de Bioingeniería, radios y cuadrícula iguales.....	88
Gráfica 11: Fs antes y después de la implementación de obras de Bioingeniería, círculos de falla iguales.....	88

INTRODUCCIÓN

El suelo constituye el recurso natural básico para el soporte de los ecosistemas terrestres, por lo que cualquier proceso de degradación que sufra implica cambios significativos y muchas veces irreversibles en la calidad del medio ambiente, la economía local, regional, mundial, y especialmente en los sistemas agrícolas, donde la productividad depende, en buena medida, del estado de conservación del suelo (Alonso, Alcázar Torralba, Cermeño Martín, & Barbero Abolafio, 2011); sin embargo, el deterioro del recurso es cada vez mayor, siendo acelerado por procesos antrópicos, los cuales generan una alta degradación y pérdida del mismo; convirtiéndose en un fenómeno de suma importancia en Colombia y el mundo, aquejando los ecosistemas y su biodiversidad, los ciclos de la naturaleza y su equilibrio, generando zonas vulnerables, que sufren amenazas por inundaciones, escases de agua, incendios forestales, avalanchas, deslizamientos, remoción en masa, así como pobreza y violencia.

Uno de los temas, referentes al deterioro del recurso suelo, que ha venido cobrando particular interés en materia de riesgo, amenaza y vulnerabilidad ambiental son los procesos de remoción en masa o el desplazamiento de material litológico, suelo, roca o cobertura vegetal hacia abajo (Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos – CEELAT, 2014), debido a que las fuerzas actuantes sobre los taludes y laderas superan las fuerzas estabilizantes, donde los principales factores solos o combinados que influyen en dichos fenómenos son los estructurales, como la meteorización física, química o biológica; los topográficos, cuando se tienen pendientes muy elevadas; climáticos como las fuertes precipitaciones; los tectónicos y finalmente uno de los principales factores, los antrópicos, los cuales causan deforestación de los terrenos dejándolos expuestos y propensos a perder su estabilidad; generando grandes pérdidas económicas, humanas y de diferentes ecosistemas.

En las últimas dos décadas los asentamientos humanos en Colombia se han concentrado en zonas peligrosas, inseguras o con riesgo de amenazas naturales. Parte de este fenómeno se ha producido por diversas razones, entre ellas el crecimiento poblacional, el desplazamiento forzado, la desigualdad socio-económica y la localización de un número importante de centros poblados en zonas montañosas o de ladera sin ninguna clase de control técnico (Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos – CEELAT, 2014). La ciudad de Bogotá no es ajena a dicha problemática, donde más específicamente el sector de Cordillera Sur, en la localidad de ciudad Bolívar, ha sufrido pérdidas humanas, ambientales y de infraestructura, debido a las altas pendientes y la gran cantidad de asentamientos ilegales, convirtiéndose en una zona de alto riesgo.

Existen gran cantidad de obras utilizadas para enfrentar los problemas causados por procesos de remoción en masa, que por lo general consisten en obras mecánicas de ingeniería convencional, en las que se implementan materiales como concreto, acero y hormigón (Rivera Posada J. H., 2008), las cuales actúan más sobre los efectos que sobre las causas de los procesos degradativos; sus estructuras son inertes y percederas, son extremadamente costosas, y causan efectos negativos sobre el ambiente. Por su parte la Bioingeniería es un método ecológicamente sostenible y socioeconómicamente benéfico e integral, que combina obras hidráulicas y estructuras mecánicas acompañadas de tratamientos físicos, químicos y biológicos para prevenir y controlar la erosión, proteger, estabilizar y restaurar taludes (Li, Zhang, & Zhang, 2006).

En el presente estudio se pretende evaluar la efectividad de obras de Bioingeniería en el sector de Cordillera Sur, para la restauración y estabilización del talud, afectado por procesos de degradación y remoción en masa, desde tres ejes o puntos de vista: primero de forma cualitativa, observando la evolución del talud con el tiempo mediante un seguimiento fotográfico en un periodo aproximado de 6 meses; segundo, de forma cuantitativa, analizando el cambio de diferentes propiedades físicas importantes del suelo, antes de la implementación de la obras de bioingeniería y 4 meses después, como lo son la textura, humedad de campo, la densidad aparente, la porosidad y el contenido de materia orgánica, que son las propiedades directamente afectadas por la vegetación y de las cuales depende en gran medida la presencia de una buena estructura del suelo; y tercero, desde el punto de vista geotécnico, realizando una aproximación a la estabilidad global y local o superficial del talud mediante una modelación del comportamiento del mismo con el programa GEOSLOPE 2012 con licencia estudiantil, con el fin de calcular el Factor de seguridad del talud (F_s), mediante el método de Bishop simplificado; todo lo anterior con la finalidad de analizar cambios que se puedan presentar por la construcción de las obras de bioingeniería, así como por las diferentes especies de vegetación utilizadas en los procesos de revegetalización.

CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE

Las plantas vivas se han empleado desde mucho tiempo atrás en diferentes partes del mundo, para prevenir o mitigar la erosión del suelo tanto en laderas como a las orillas de los ríos (Schlueter, 1986; Fatahi y otros, 2010; y Bariteau y otros, 2013; citados por Dhital y Tang, 2015), obteniendo grandes beneficios y efectos positivos en el control de procesos erosivos y de deterioro del suelo.

Aunque se han encontrado rastros del uso de vegetación viva en estructuras con fines de estabilización que datan desde el siglo I a.C. y prácticas ampliamente aplicadas en Europa occidental durante los siglos XVIII y XIX (Evette A. , Labonne, Liebault, Jancke, & Girel, 2009) y en China desde antes del siglo XII; donde fueron utilizados gran cantidad de arbustos para estabilizar taludes, y a comienzo del siglo XX, donde técnicas similares fueron usadas para controlar inundaciones y erosión a lo largo del Río Amarillo (Rivera Posada J. H., 2008); solo hasta finales de 1920, fue acuñado el término “bioingeniería”, que comprende el uso de materiales vivos e inertes y técnicas convencionales para construir diferentes estructuras entre las que se encuentran fajas vivas¹ en taludes, capas de ramificación, estacas de madera y plantación conjunta, rejillas en taludes, muros de criba² (que funcionan como muros de contención), trinchos de estabilización³ (Coppin & Stiles, 1990), filtros vivos⁴, trinchos de disipación⁵, y por supuesto la revegetalización, que comprende el uso de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, todo ello implementado en conjunto con el fin de estabilizar el talud y controlar la erosión y los procesos de remoción de masa.

El uso de la bioingeniería en los Estados Unidos, data en los años 1920 y 1930, y las aplicaciones más comunes fueron para la estabilización de orillas de arroyos, caminos y carreteras y restauración de taludes. Europa experimentó una tendencia similar; sin embargo, unos pocos practicantes continuaron para usar y mejorar los métodos vivos en mezcla con los de construcción. En el año 1930 un número de profesionales en varias disciplinas técnicas fueron exitosos empleando los conceptos básicos de la bioingeniería del suelo. Estas técnicas incluyeron el uso de sauce vivo como una construcción elemental viva, construcción de muros

¹ Las fajas son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas para que germinen en forma similar a como lo hacen las estacas vivas. Ver Figura A1. 1, ANEXO 1.

² Los muros de criba o Cribwall, son estructuras de contención elaboradas con troncos de diferentes especies arbóreas. Ver Figura A1. 2, ANEXO 1.

³ Los trinchos de estabilización son estructuras de contención elaboradas generalmente con guadua angustifolia y estacas vivas de plantas arbustivas. Ver Capítulo III. Obras de Bioingeniería Ejecutadas y Análisis Cualitativo.

⁴ Los Filtros vivos son zanjas paralelas en el sentido de la pendiente del terreno, tendidos con guadua joven de fácil rebrote o de ramas vivas. Ver Capítulo III. Obras de Bioingeniería Ejecutadas y Análisis Cualitativo.

⁵ Los trinchos de disipación son estructuras construidas con forma de vertedero para disminuir la velocidad y la energía cinética del agua de escorrentía, además de contribuir en la estabilización de los filtros vivos. Ver Capítulo III. Obras de Bioingeniería Ejecutadas y Análisis Cualitativo.

de piedra combinados con recortes de madera y muros con incrustaciones de vegetación (Rivera Posada J. H., 2008).

La vegetación es de suma importancia en los procesos de recuperación y estabilización de un talud, ya que sus raíces generan un refuerzo mecánico que permite el soporte de la acción de cargas cortantes de gran magnitud, y sin el cual probablemente fallaría el talud (Barrera Gutiérrez, Rivera Posada, & Cadena Romero, 2013). Por otro lado la vegetación cumple un papel fundamental en los procesos hidrológicos, debido a las funciones de interceptación de la lluvia, retención de agua, extracción de humedad y disminución de la presión de poros del suelo, entre muchas otras (Suarez Diaz, 2009).

Se han llevado a cabo todo tipo de estudios en diferentes partes del mundo para demostrar la importancia de la vegetación en la estabilidad de taludes, donde son evaluadas especies bien sean arbustivas, arbóreas y/o herbáceas, sus características, como diámetro y profundidad, y la eficacia en cuanto al refuerzo mecánico y resistencia a la tracción de cada tipo de raíz en el suelo que protegen y amarran la capa más superficial del suelo a las otras capas.

A nivel internacional Zhou, Watts, Li, y Cheng (1998) determinaron, mediante procesos de modelación, que las raíces laterales de un tipo de pino producen una alta resistencia al corte en la parte superior del suelo; Polen (2007) estudió la variabilidad espacial y temporal en el refuerzo de las raíces de los arroyos demostrando que este aumenta la estabilidad en las orillas de los ríos; Tosi (2007) afirma que las raíces aumentan la resistencia al cizallamiento mediante el anclaje de una capa de suelo y la formación de una red de unión dentro de la capa, reportando aumentos en el factor de seguridad al estudiar tres especies arbustivas en los Apenninos del Norte en Italia. Otros estudios de este tipo fueron realizados en Escocia y Estados Unidos por Mickovski y otros (2006) y Pollen (2007).

Genet y otros (2008) y Fan y Su (2008) demostraron que la resistencia al corte de los suelos por el refuerzo de las raíces, puede ser aproximadamente hasta un 100% mayor que la de los suelos libres de raíz, en casos de suelos con un alto grado de saturación o de humedad la cual disminuye, en gran medida, la resistencia al corte de los mismos; Chang Fan y Feng (2008) señalan un aumento en la resistencia al esfuerzo de cizallamiento por parte de las raíces y con ello del Factor de Seguridad. En otros países como Australia y Francia, se comparó la cohesión del suelo adicional que proporcionan diferentes especies herbáceas, arbustivas y arbóreas ((Docker & Hubble, 2008); (Burylo, Hudek, & Rey, 2010)). Por su parte Comino y Marengo (2010) estudiaron la resistencia a la tracción de

las raíces de tres especies arbustivas obteniendo una mejora en las propiedades mecánicas del suelo.

Más adelante Yunwei, Xuan y Tingguo (2011), muestran que el efecto de tracción de las raíces en el suelo es evidente y proponen un modelo de predicción desarrollado en el programa MATLAB, para indicar las realidades del efecto de tracción y su variación; en España, Tardío y Mickovski (2015) evaluaron la estabilidad de un talud con vegetación mediante mecanismos de simulación, los cuales muestran resultados más conservadores y realistas inmediatamente después de un evento de precipitación, cuando es más probable que se genere la falla. Fan y Tsai (2015) investigaron de igual manera el refuerzo de las raíces obteniendo resultados positivos.

Las especies implementadas, entre arbóreas, arbustivas y herbáceas variarán en cada zona dependiendo de las condiciones de la misma. M. Burylo y colaboradores (2011) estudiaron las raíces de seis especies de vegetación dominantes de las laderas margosas de los Alpes del Sur de Francia, encontrando mejores resultados del refuerzo de las raíces en especies herbáceas y arbustivas que en especies arbóreas para evitar deslizamientos. Por su parte Guohua, Wenzhi, Hu, Gefei, y Fang (2015) investigaron las propiedades del suelo y la vegetación de una zona de transición oasis-desierto en diferentes épocas en un periodo de 40 años, demostrando que la retroalimentación entre el suelo y la vegetación permitieron la estabilización de la arena con el tiempo.

En lo referente a las obras de bioingeniería como tal, Lammeranner, Rauch, y Laaha (2005) investigaron el uso de Bambú (*Bambusa nutans*) para la construcción de muros de criba, así como otros tipos de vegetación; realizaron seguimiento durante 32 meses y obtuvieron resultados exitosos con todas las plantas y especialmente con las especies *Salix tetrasperma* y *Alnus nepalensis*; Li, Zhang, y Zhang (2006) implementaron el primer proyecto de bioingeniería aplicado a las riberas de los ríos en China, integrando además técnicas ecológicas y convencionales para la construcción de faginas vivas, estaquillado vivo, geomallas⁶, geogaviones y la vegetación nativa para la preservación de la rivera. Midió parámetros hidrofísicos comprobando la disminución significativa de la erosión en la rivera.

Tiempo después Anstead, Boar, y Tovey (2012) propusieron implementar una medida de bioingeniería denominada willow spiling⁷, para lo cual se estudiaron las

⁶ Las Geomallas son mallas elaboradas con diferentes materiales, como multifilamentos de poliéster de alto peso molecular, de características resistentes a las condiciones ambientales, que actúan en forma conjunta con el suelo de los taludes para generar una estructura más estable. Ver Figura A1. 3, ANEXO 1

⁷ Willow spiling es una técnica que utiliza los tallos de sauce para realizar tejidos verticales que funcionan como muros o barreras de protección en las riberas de los ríos.

funciones biológicas y geomorfológicas del suelo, donde finalmente mostraron que las sequías e inundaciones pueden afectar la eficacia de estas medidas, pero a través de un diseño e implementación adecuados, seguidos de un constante monitoreo, este método puede ser eficaz para resistir tales tensiones y proteger las riberas. Dhital y Tang (2015) explican por su parte que en los últimos años, las técnicas de bioingeniería han sido ampliamente utilizadas porque son rentables, flexibles y aplicables en áreas remotas mediante el uso de materiales disponibles localmente, y debido a que requieren mano de obra barata en comparación a las obras de ingeniería civil más elaboradas. Giadrossicha y otros (2016) estudiaron la especie *Jatropha curcas* para su uso en la bioingeniería mediante el modelo de probabilidad logarítmica ponderada de distribución de las raíces y un modelo de refuerzo de la raíz, obteniendo que a pesar de un refuerzo por parte de las raíces relativamente bajo, es una planta adecuada debido a su rápida propagación y crecimiento, y resistencia. Tardío y Mickovski (2016) propusieron una adaptación de las rutinas y procedimientos de la práctica geotécnica y esquema de diseño de ingeniería civil existentes a los métodos de bioingeniería en los problemas clásicos de ingeniería geotécnica, obteniendo aumentos en el factor de seguridad.

Los diferentes autores han evaluado los procesos de restauración y estabilización de taludes mediante diversas maneras, como modelaciones de talud, evaluación de parámetros físicos, estudio de las características de las raíces, su resistencia, así como la evaluación directamente de las especies establecidas y seguimientos fotográficos, entre otras. Preti, Dani, y Laio (2010) propusieron un modelo analítico que permite relacionar la distribución vertical de las raíces de las plantas con las condiciones climáticas y edafológicas de la zona, para evaluar los procesos de restauración y estabilización de taludes en proyectos afines a la bioingeniería; Cao, y otros (2015), Singh, Ram y Ghosh (2015), y Kołodziej, Bryk, Jurkiewicz, Otremba, y Gilewska (2016), evaluaron parámetros físicos de un suelo restaurado con revegetalización tras la degradación por procesos de minería a cielo abierto encontrando una disminución en la densidad aparente del suelo, aumento en la porosidad y mejora en la cantidad de contenido de humedad en un suelo.

Sin embargo uno de los problemas críticos en la evaluación de intervenciones de bioingeniería de suelos es la dificultad en el desarrollo de cálculos precisos de la evolución de las estructuras y la combinación de las plantaciones de vegetación implementadas en el sitio y problema particular. Esto se debe principalmente a la dificultad en predecir de manera adecuada el desarrollo de las plantas en cada tipo de suelo, los patrones climáticos a largo y corto plazo y otros factores edafoclimáticos que podrían causar importantes grados de incertidumbre, conduciendo a una reducción del nivel de fiabilidad de los proyectos de

bioingeniería en términos de predeterminación de factores de seguridad. En condiciones de fuerte variabilidad climática este problema se acentúa más, por lo que se hace necesario considerar todas las condiciones más desfavorables. Ejemplo de ello es el Mediterráneo Occidental, donde se llevó a cabo un estudio utilizando el modelo de cálculo SLIP4EX para determinar el factor de seguridad y el modelo de Coulomb para determinar la resistencia al deslizamiento para evaluar las especies *Pinus halepensis* y *Quercus faginea*, obteniendo que el uso de técnicas de bioingeniería de suelos presentan una eficacia fiable, confirmados por la experiencia adquirida en las intervenciones en los sitios mediterráneos con condiciones edafo-climáticas similares, pero que hay una falta generalizada de información sobre las características geotécnicas de la vegetación mediterránea generando limitaciones importantes en los estudios de estabilidad (Fernandes & Guiomar, 2016).

A nivel nacional existen varios documentos y libros que reportan todo tipo de conceptos y prácticas donde se estudia la bioingeniería como alternativa de un gran potencial integral y sostenible que se ha venido aplicando en la restauración de suelos degradados por erosión severa y remociones masales, en diferentes lugares del país, como municipios del departamento del Valle del Cauca, tales como: Tejares, El Cairo, Dagua, La Cumbre, Restrepo, Cuenca Alta del río Cali, Obando, Cartago, Argelia y Buga; en el departamento de Caldas, en los municipios de Chinchiná, Palestina, Villamaría, Filadelfia, Pacora, y Marquetalia entre otros (Rivera Posada J. H., 2008); en el departamento de Cundinamarca en el municipio de Bojacá y en el departamento de Antioquia, en la ciudad de Medellín.

Rivera Posada (2001) presentó un documento donde define el término de trinchos vivos así como sus características, funcionamiento y adecuada construcción. Jaime Suárez ha publicado varios libros con temáticas sobre control de deslizamientos mediante técnicas de bioingeniería, los efectos de la vegetación en procesos de restauración de taludes, así como metodologías para la evaluación de los mismos (Suarez Diaz, 2009), (Suárez D., 2001).

Entre los trabajos realizados en Colombia con obras de bioingeniería Rivera Posada (2008) empleó especies vegetativas como el nacedero, guadua, matarratón, leucaena y guaduilla, entre otras para la implementación de estructuras vivas que permitieron el anclaje y refuerzo mecánico de la vegetación multistrata así como la disminución de la presión de poros, de tal manera que contrarrestara la formación de surcos y cárcavas profundas en esa zona caracterizada por suelos arcillosos de gran capacidad para retener la humedad. Romero, Santamaría y Zafra (2009) evaluaron en Bojacá, Colombia la eficacia de obras de bioingeniería mediante un estudio de la abundancia microbiológica, pH y

la conductividad eléctrica bajo tres estratos de erosión, evidenciando que las obras de bioingeniería permitieron valores moderados de pH y conductividad eléctrica, y una elevada abundancia microbiológica demostrando su efectividad en el control de erosión.

Por su parte una evaluación realizada por CENICAFÉ (2011) y después por Flórez (2014), en el municipio de Villamaría, en la vereda Ríoclaro Viejo, vereda Balmoral, en el municipio de Filadelfia y en la vereda San Bartolomé, municipio de Pácora, sector el Escobal, del departamento de Caldas, muchos años después de su implementación, demuestran que las técnicas de Bioingeniería son eficaces, eficientes, efectivas, económicas y sostenibles en el tiempo, con una total recuperación y estabilización de las laderas.

Barrera Gutiérrez, Rivera Posada, y Cadena Romero (2013), indicaron en diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria, que los valores para las resistencias pico y residual, en suelos con presencia de raíces, son más altos y se alcanzan en rangos de deformación más amplios, que los logrados por el suelo libre de raíces, como lo demuestran en su estudio con 4 especies vegetales, demostrando que las raíces de los árboles y arbustos son elementos estructurales importantes en la estabilidad del suelo, principalmente por sus características físicas como alta resistencia a la tensión cuando son sometidas a la acción de fuerzas de corte y tracción, y por sus características biológicas como su cantidad, tamaño y distribución dentro del suelo.

Más adelante Salazar Gutiérrez e Hincapié Gómez (2015) implementaron una zanja de corona⁸ revestida con cobertura vegetal, para el transporte de las aguas de escorrentía, filtros vivos para el drenaje de aguas sub superficiales y trinchos vivos para la recuperación y estabilización del drenaje natural ubicado en la parte más baja del derrumbe, utilizando materiales recién cortados de *Guadua angustifolia*, *Trichanthera gigantea* y *Salix humboltiana*. Por último, se construyeron terrazas vivas⁹ para la estabilización y revegetalización del área alcanzando la estabilización entre 3 a 5 meses después de iniciados los tratamientos.

⁸ Las zanjas de corona son zanjas interceptoras de escorrentía ubicadas en la parte alta del talud. Ver figuras Figura A1. **5** y Figura A1. **6**. ANEXO 1.

⁹ Las terrazas vivas son estructuras construidas de forma escalonada a lo largo del talud, con el fin de mejorar la geometría del mismo y disminuir la pendiente.

CAPÍTULO II. PROBLEMA DE INVESTIGACION

2.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCION DEL ÁREA DEL PROBLEMA

La localidad de Ciudad Bolívar está ubicada al sur de la ciudad de Bogotá y limita, al norte con la localidad de Bosa, al sur con la localidad de Usme, al oriente con la localidad de Tunjuelito y Usme, y al occidente con el municipio de Soacha.

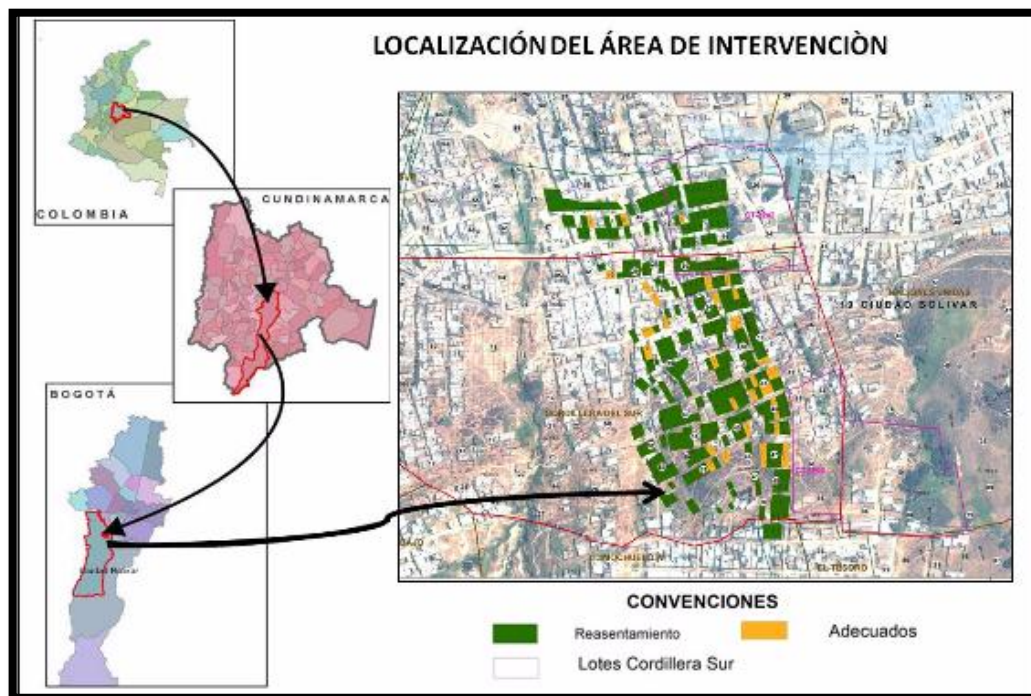


Figura 1. Localización del área de intervención.

Fuente: (Convenio-494, 2014)

Ciudad Bolívar tiene una extensión total de 12.998,46 hectáreas (ha.), de las cuales 3237.87 ha se clasifican como suelo urbano, 204.65 ha son suelo de expansión y 9555.94 ha corresponden al suelo rural.

Los terrenos de la zona urbana de la localidad de Ciudad Bolívar están situados a una altitud de 2400 metros sobre el nivel del mar (msnm), en la parte más baja y de 3100 msnm en su parte más alta, clasificados como piso térmico frío. La temperatura promedio es de 14° C según la estación climatológica Simón Bolívar, teniendo en cuenta las temperaturas mínima (9° C) y máxima (19° C). Contrario a lo que se podría esperar de una zona con esas características geográficas de clima frío, en esta localidad el ambiente es generalmente seco y soleado la mayor parte del año.

Cordillera Sur es uno de los barrios de esta localidad, perteneciente a la zona urbana, que a su vez se clasifica en tres sectores A, B y C, de acuerdo a características de ocupación y uso del suelo. Cordillera Sur pertenece al Sector A correspondiente a terrenos que originalmente fueron un lugar de explotación de materiales. Este, junto con otros barrios se desarrolló en la parte alta de una ladera de pendiente entre moderada y fuerte, donde se llevó a cabo un proceso de intervención antrópica alto, con asentamientos informales, explotación minera, construcciones sin control técnico, cortes en talud y rellenos no consolidados de material no seleccionado, modificando así las condiciones iniciales del suelo. Por otro lado inicialmente no se contaba con alcantarillado pluvial, lo cual ocasionaba la existencia de drenajes inadecuados, llevando consigo una gran cantidad de problemas sanitarios, ambientales y de inestabilidad del talud.

Actualmente, la zona está afectada por fenómenos de degradación y remoción en masa de diferentes magnitudes, en algunos sitios se encuentran movimientos locales o puntuales que han afectado una o dos viviendas y en otros sectores se encuentran movimientos de mayor magnitud que afectan varias viviendas, infraestructura, e incluso el drenaje natural, como lo ocurrido en diciembre del año 2015, un deslizamiento superficial causado por la ruptura de una tubería de agua potable, la cual afectó las casas de la parte baja del talud a unos 10 m de la parte izquierda del límite del polígono de intervención, como se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2. Deslizamiento superficial aledaño al polígono de intervención.

El polígono evaluado comprende 3.9 Ha, que antes de la implementación de las obras de bioingeniería fue afectada por fenómenos de remoción en masa, que ocasionaron la estricta reubicación de las viviendas de la zona, y con ellos su demolición, explicado la gran cantidad de escombros. En el proceso de identificación de la zona se observaron diferentes tipos de suelos en todo el polígono que incluyen suelos franco-arenosos, franco arcillo-arenosos, areniscas consolidadas, así como roca madre.

2.2 JUSTIFICACION

Este trabajo se realiza debido a la necesidad que existe de evaluar la efectividad de la bioingeniería como una alternativa de bajo costo, que requiera poco mantenimiento, donde se aprovechen las condiciones climáticas del lugar y que actúe directamente sobre la causa del problema, pero sobre todo que sea definitiva y autosostenible, siendo que la localidad de Ciudad Bolívar y específicamente el barrio cordillera Sur, lo componen poblaciones de escasos recursos que no podrían asumir costos elevados.

Teniendo en cuenta la importancia y necesidad de recuperar un territorio, con el cual se sienten identificados los habitantes del barrio cordillera Sur, e incrementar la seguridad a su paso, la bioingeniería resulta ser la mejor herramienta para lograr esta finalidad. Las obras implementadas en la zona de estudio, como es el caso de los trinchos vivos, permiten controlar y manejar las altas pendientes, que son una de las causas principales de las afectaciones que ha tenido el suelo en esta zona, así como el sostenimiento de los empujes de tierra, fundamental para recuperar el talud (Cavaillé, y otros, 2015).

Es entonces fundamental evaluar el potencial de las estructuras implementadas para la prevención de futuros fenómenos de remoción en masa en el talud, para lo cual es necesario analizar las características físicas e hidráulicas del suelo entre las que se encuentran la humedad y la densidad aparente, que se espera que sufran variaciones significativas después de implementar estructuras de estabilización en el talud, que con el tiempo permitan mejorar el comportamiento del agua y demás condiciones del mismo para volverlo más estable.

Por otro lado se pretende calcular el factor de seguridad, que directamente arroja un valor de estabilidad, clave para comparar con las características evaluadas y concluir sobre el cambio en las condiciones del suelo y si este adquirió mayor estabilidad después de implementadas las obras. Existen diferentes métodos de cálculo que dependen en una buena parte de la geometría del talud, y con ello difieren de acuerdo a la información que se tenga y a la precisión que cada uno genere. En el presente trabajo se emplea el método de Bishop simplificado, que no es un método exacto, pues las condiciones y geometría del talud no permiten utilizar uno de este tipo, pero sí muy preciso y uno de los más utilizados, el cual considera la masa deslizante dividida en dovelas o fracciones verticales y emplea un método de iteración para determinar el factor de seguridad.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la efectividad de las obras de Bioingeniería: filtros vivos, trinchos disipadores, trinchos de estabilización y revegetalización, para el control de procesos de remoción en masa en el polígono de Cordillera Sur, Ciudad Bolívar, Bogotá.

2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.3.2.1 Analizar la recuperación del talud en el tiempo y el espacio mediante fotografías comparativas, a corto plazo, en el polígono.

2.3.2.2 Estimar la estabilización del terreno a corto plazo mediante la evaluación de los parámetros: densidad aparente, densidad real, porosidad, humedad de campo y contenido de materia orgánica en el polígono.

2.3.2.3 Determinar el factor de seguridad del talud mediante el método de Bishop Simplificado antes y después de la implementación de las obras.

CAPITULO III. OBRAS DE BIOINGENIERIA EJECUTADAS Y ANÁLISIS CUALITATIVO

En el presente capítulo se estudian las diferentes obras de bioingeniería implementadas en el polígono de Cordillera Sur, siguiendo con el análisis cualitativo, que corresponde al seguimiento fotográfico de la evolución del terreno antes, durante y después de la implementación de las obras.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA IMPLEMENTADAS

Las obras de bioingeniería implementadas en el polígono comprenden Filtros Vivos primarios y secundarios, trinchos disipadores, trinchos de estabilización, revegetalización y otras obras adicionales como los senderos.

3.3.2 Filtros Vivos Primarios

Consisten en canales o zanjas construidas paralelas a la pendiente y a lo largo de la misma, cuya finalidad es permitir la evacuación rápida de las aguas de escorrentía y aguas sub superficiales, conduciéndolas a alcantarillados, cunetas o drenajes naturales, para mantener condiciones ideales de humedad que impidan represamientos o saturación de agua en los poros del suelo, y con ello pérdida de la capa orgánica, procesos erosivos y posteriores remociones y movimientos masales. De igual manera el entramado de las raíces de la vegetación establecida a partir de los filtros vivos, permite un refuerzo mecánico que incrementa la estabilidad del suelo (Rivera Posada J. H., 2011).

Los filtros se deben llenar con varios tendidos de guadua joven (de 3 a 4 tendidos), menor de dos años de edad para permitir el rebrote fácilmente, o con tendidos de ramas vivas de reproducción vegetativa fácil y rápida como Quebrabarrigo, Matarratón (*Gliricidia Sepium*), Leucaena (*Leucaena Leucocephala*), Arboloco, entre otras (Rivera Posada J. H., 2015). En el fondo de la zanja, y entre cada tendido de guadua se tenderá geotextil, otra tela natural sintética o capas de pasto, con el fin de evitar la entrada de materiales finos al sistema. Finalmente se rellena la zanja con material de excavación y tierra dejando una canaleta de 10 cm de alto, y se realiza la plantación de estacas, árboles o arbustos distanciados de 1 a 3 m y hasta 4 m para taludes con pendientes muy altas (Mayores a 45°), preferiblemente de raíz pivotante para permitir el anclaje de las raíces entre las guaduas. La longitud de la guadua y las ramas vivas puede ser de 1 a 3 metros dependiendo la irregularidad y pendiente del terreno. Finalmente la zanja deben tener por lo general un ancho mínimo entre

0.3 a 0.5 m, dependiendo el área del terreno a drenar, y profundidad de 0.5 a 1 m, que variará de acuerdo a la distancia a la cual se encuentre terreno firme y a la irregularidad que posea el mismo (Rivera Posada J. H., 2011).

En el terreno estudiado de Cordillera Sur, se construyeron 3 filtros vivos principales o filtros primarios, de ancho 0.6m y una profundidad de 0.8 m, para la cual al excavar se encontró terreno firme, como se observa en la figura 3; por otro lado se empleó guadua angustifolia de aproximadamente 3 m de largo y diámetros entre 9 y 12 cm, y camadas de pasto kikuyo, característico del talud.

La ubicación de los filtros se realizó determinando el contenido de agua de escorrentía en el polígono mediante el uso de la herramienta water drop, la cual simula la caída de una gota de agua en la superficie, y con la ayuda de las curvas de nivel, por lo que finalmente se estableció un filtro vivo primario en la parte superior derecha del polígono que se denominará Filtro 0, otro más abajo por el mismo costado al que se le denominara Filtro 1, y finalmente el Filtro 2, del lado izquierdo del talud, por la misma línea paralela al Filtro 1.



Figura 3. Construcción de Filtros vivos primarios y trinchos de disipación.

3.3.3 Filtros vivos secundarios:

Son zanjas que conectan en forma de espina de pescado a los filtros vivos primarios, de tal manera que conducen los caudales de los costados al filtro principal, para permitir de igual manera el descenso de las aguas de escorrentía y sub superficiales, que causan saturación en el suelo. Su punto inicial debe ubicarse en la parte más alta del vaso de depresión, es decir en la base del problema de humedad.

Estos filtros deben tener una profundidad media de excavación de 0.4 a 0.8 m o hasta encontrar suelo firme o roca sin disturbar, y se organizan varios tendidos de guadua forrados con geotextil, fibra natural o pasto, se rellenan con sustrato seleccionado de la excavación, dejando una canaleta de 20 cm de alto, y se realiza la plantación de estacas, árboles y arbustos, al igual que se hizo con los filtros primarios.

Al analizar la situación en el polígono de Cordillera, se encontraron vertimientos irregulares en algunos predios, producto de la demolición y de la no suspensión del servicio de abastecimiento de agua potable, que como consecuencia generaban saturación del terreno en esos sitios, por lo cual se establecieron las rutas de los filtros secundarios tratando de abarcar la mayor parte de estos. En cuanto a las dimensiones, los filtros se construyeron con un ancho de 0.6 m y profundidad de 0.8 m, longitud de excavación a la cual se encontró roca firme, de igual manera que para los filtros primarios. Se construyeron un total de 6 filtros secundarios, 2 que conectaban al filtro 0, 2 al filtro 1 y dos al filtro 2.

3.3.4 Trinchos disipadores

Son estructuras biomecánicas construidas con material vegetal vivo, que se establecen a lo largo de la pendiente de forma escalonada sobre los filtros vivos, y que se hacen necesarias cuando las pendientes del talud son muy elevadas, de tal manera que se convierten en un soporte para los filtros, controlan el arrastre de materiales, favorecen la recuperación de la vegetación, estabilizan el terreno a lo largo del perfil, evitan la erosión regresiva y a su vez funcionan como disipadores de la energía cinética del agua de escorrentía, gracias a un vertedero que deben llevar adaptado (Evette A. , y otros, 2009).

Los trinchos deben distanciarse uno del otro de 3 a 5 m, deben ir empotrados 0.2 a 0.3m dentro de la capa de terreno firme y tener profundidades mayores a las de los filtros vivos para evitar socavamiento en el fondo de la zanja, por la energía cinética de las aguas subsuperficiales que causan pérdida de la efectividad del filtro vivo (Rivera Posada J. H., 2011).

Teniendo en cuenta las altas pendientes del polígono de estudio, se trabajó con distancias promedios entre trinchos de 3 m. Estos fueron construidos con un ancho de 2 a 3 m, utilizando como material vivo guadua *Angustifolia* de 3 a 6 metros de largo con un diámetro promedio de 10 a 12 cm, como se observa en la Figura 3. En ellos se sembraron árboles, arbustos y estacas con capacidad de rebrote.

3.3.5 Trinchos de Estabilización

Son estructuras vivas de estabilización construidas en el sentido de la pendiente del talud, que utilizan material del subsuelo para formar balcones o terrazas escalonadas sostenidas con guadua, que luego son revestidas con cobertura vegetal, y reforzados con estacas con capacidad de rebrote. Estas estructuras mejoran las proporciones de retención de agua, disminuyen la velocidad de la misma, y con ello reducen los riesgos de erosión y deslizamientos (Veeck, Zhou, & Ling, 1995).

Los trinchos deben tener una altura promedio entre 0.5 a 1 m, más un 40% que corresponde a la parte que queda empotrada en el terreno. Su longitud depende del relieve encontrado en el sector específico del terreno en el que se implementará la técnica de bioingeniería. Los postes o pilotes de la estructura deberán estar separados entre 0.4 y 0.7 m, como soporte de las guadas colocadas horizontalmente y variará según la pendiente.

Se instalaron trinchos con diferentes longitudes y alturas a lo largo del polígono que variaron de acuerdo a las condiciones del relieve; se sembraron adicionalmente estacas vivas de Sauco y otras especies con capacidad de rebrote, en distancias entre 0.5 y 3 m como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Trinchos de estabilización construidas en Cordillera Sur.

3.3.6 Revegetalización

La vegetación cumple un papel básico y fundamental en los procesos de estabilización de taludes y control de erosión. En terrenos inestables, propensos a sufrir deslizamientos, se ha demostrado ampliamente que la vegetación puede reducir significativamente la erosión (Burylo, Hudek, & Rey, 2011).

Ahora bien, la vegetación puede mejorar la estabilidad del suelo mediante dos maneras: a través de mecanismos hidrológicos, mediante la retención del agua

por parte del follaje, disminuyendo así la velocidad de agua escorrentía y con ello su poder erosivo, la intercepción de las gotas de lluvia por el follaje impidiendo el impacto directo sobre el suelo, y la evapotranspiración que permite una disminución de la humedad en el suelo (Suárez D., 2001); y por otro lado mediante el refuerzo mecánico que ejercen las raíces, aumentando la cohesión y la resistencia al corte de los suelos.

Sin embargo se sabe que la gestión de los suelos propensos a deslizamientos y la evaluación de su vulnerabilidad, debe implicar un conocimiento de las especies vegetativas a implementar, de sus características y del potencial que requieren para prevenir los deslizamientos y procesos erosivos, así como un análisis de las condiciones climáticas y físicas del lugar para establecer las especies más convenientes.

Teniendo en cuenta que son las raíces de las plantas las que proporcionan de manera directa estabilidad en los suelos, debido a que generan un refuerzo mecánico en el talud y proporcionan una cohesión adicional que vuelve a los suelos mucho más resistentes a procesos de erosión, que aquellos suelos pobres en vegetación (Burylo, Hudek, & Rey, 2011), es de resaltar que el éxito del uso de vegetación en obras de bioingeniería dependerá en gran medida del desarrollo de las raíces y su comportamiento en el talud. En este mismo orden de ideas, es necesario que exista una diversidad y una buena distribución de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, de tal forma que los efectos sean lo más eficiente posible y no terminen causando resultados contrarios a los esperados.

Una de las características clave que deben tener las especies usadas para la bioingeniería es una propagación fácil y rápida (Dhital & Tang, 2015). El polígono de estudio, al estar ubicado en un barrio con condiciones climáticas más bien secas se ve aún más favorecido por los efectos de la vegetación, ya que, a diferencia de zonas con lluvias muy intensas, donde la retención de agua es mínima, para zonas con lluvias moderadas la retención de agua puede llegar a ser hasta de un 30% (Suárez D., 2001).

Además de la vegetación ya existente en el talud en condiciones previas a las obras de bioingeniería se establecieron, con el fin de renaturalizar y como parte de las obras y el proceso de estabilización, alrededor de 171 árboles y arbustos ubicados en los filtros vivos y 329 árboles y arbustos en los trinchos y a lo largo de todo el polígono, sin contar con los plantados en los límites del polígono y en los bordes de las escaleras. En la Tabla 1 se resumen algunas de las especies plantadas.

Para la plantación se realizaron hoyos de hasta 70 cm de profundidad y anchos entre 70 y 120 cm, se ubicó el árbol (0,7 a 1,5 m) en el hoyo y se incorporó una

mezcla homogénea de material seleccionado de excavación, compost, chipeado y tierra negra y entre 5 y 10 gr de hidroretenedor, de tal manera que quede cubierto hasta el cuello de la raíz.

Adicional a ello se establecieron especies de jardinería, es decir bajo porte, con tamaños entre 30 y 50 cm, como Boxus, cayeno, bailarina, achira, siete cueros, fucsia amaranto, agapanto, novio, malva, mermelada, entre otras, que se ubicaron en los límites del polígono, en los bordes de las escaleras y en jardineras.

Tabla 1. Especies vegetativas establecidas en el polígono.

ESPECIES	CLASIFICACION	DISTRIBUCION EN EL POLIGONO	NOMBRE CIENTIFICO
Sauco	Arbustiva	Existente antes de las obras de bioingeniería	Sambucus sp
Acacia Japonesa	Arbórea	Existente antes de las obras de bioingeniería	Acacia melanoxylon
Chilco	Arbórea	Existente antes de las obras de bioingeniería	Escallonia myrtilloides
Eucalipto	Arbórea	Existente antes de las obras de bioingeniería	Eucalyptus sp.
Cerezo Criollo	Arbórea	Existente antes de las obras de bioingeniería	Prunus serótina
Urapán	Arbórea	Existente antes de las obras de bioingeniería	faxinus chinensis
Gurrubo	Arbustiva	A lo largo de todo el polígono	Solanum lycioides
Sauco	Arbustiva	Filtros Vivos	Sambucus nigra subsp. Peruviana
Holly espinoso	Arbustiva	Filtros Vivos	Pyracantha coccinea
Holly liso	Arbustiva	Filtros Vivos	Cotoneaster pannosus
Chilco	Arbórea	Filtros Vivos	Baccharis latifolia
Corono	Arbustiva	A lo largo de todo el polígono	Xylosma spiculifera
Cucharo	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Myrsina coriacea
Fucsia boliviana	Arbustiva	Filtros Vivos	Fucsia cuspidata
Fucsia arbustiva	Arbustiva	Filtros Vivos	Fucsia arbustiva
Ligustro	Arbustiva	Filtros Vivos	Ligustrum lucidum

ESPECIES	CLASIFICACION	DISTRIBUCION EN EL POLIGONO	NOMBRE CIENTIFICO
Resucitado	Arbustiva	Filtros Vivos	Hibiscus rosa-sinensis
Endrino	Arbustiva	A lo largo de todo el polígono	Prunus spinosa
Caucho Tequendama	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Ficus tequendamae
Guamo Santaferoño	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Inga codonantha
Hayuelo	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Podocarpus oleifolius
Mano de Oso	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Oreopanax floribundus
Roble	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Quercus humboldtii
Abutilón	Arbustiva	A lo largo de todo el polígono	Abutilon indicum
Falso pimiento	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Schinus molle
Alcaparro	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Senna viarum
Gaque	Arbórea	A lo largo de todo el polígono	Clusia multiflora

Debido a las condiciones del suelo de estudio, muy seco y medianamente nutritivo, se sembró un árbol o arbusto de cada especie a excepción del sauco, para el cual se sembraron más ejemplares, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en otras experiencias con bioingeniería, en las que proporciona un incremento del 30% en la cohesión, debido a su gran rendimiento y enraizamiento (Sanchez Zapata, 2015).

Por otro lado el sauco tiene muchas cualidades que lo hacen apropiado para establecerse en el polígono de estudio. Debido a su rusticidad, tolerancia a una acidez leve, poca exigencia en suelos, y características que favorecen su reproducción y siembra en diferentes medios, tiene un alto porcentaje de sobrevivencia, que le permite adaptarse a suelos en altas pendientes, con ruinas o escombros, e incluso grietas de muros; situación que, indiscutiblemente favorece su implementación teniendo en cuenta las características de alta pendiente y gran cantidad de escombros en las que se encontraba el terreno de estudio (Grajales A., Botero G., & Ramírez Q., 2015).

Finalmente el sauco tiene una alta resistencia a las fuertes heladas, situación que se presenta en las laderas de Cordillera Sur, y tiene un elevado potencial para incrementar nutrientes en el suelo, contribuyendo a un mejor desarrollo de la vida vegetal, en el suelo de estudio, cuyas condiciones en cuanto a nutrientes no son muy buenas y como si fuera poco, no compite ni altera las dinámicas de crecimiento de otras especies, lo que definitivamente lo hace ideal para el suelo de Cordillera.

3.3.7 Senderos

Los senderos fueron implementados como algo adicional con el fin de permitir la movilidad de los habitantes del territorio, y para darle un uso adecuado a una buena parte de los escombros provenientes de las demoliciones realizadas en el polígono. Para su implementación se excavó a una profundidad entre 15 y 25 cm, y anchos de 0.8 a 1.2 m dependiendo de las condiciones de la zona del terreno, se rellenó con escombros seleccionados y triturados manualmente, hasta un espesor de 10 a 15 cm nivelados, compactados y humedecidos, y finalmente se recubrió con coberturas orgánicas secas o en proceso de secado, hasta alcanzar una capa uniforme de 5 a 10 cm de espesor, como se puede apreciar en la Figura 5. Esta cobertura tipo mulch ayuda al desarrollo de la vegetación, protege contra el golpeo de las gotas de lluvia, retarda la escorrentía, retiene sedimentos, y absorbe humedad (Suárez D., 2001).



Figura 5. Senderos construidos en Cordillera Sur.

3.4 ANALISIS CUALITATIVO

Se llevó a cabo un proceso de seguimiento y evaluación periódico mediante toma fotográfica desde diferentes puntos de referencia, con el fin de evaluar los cambios en el tiempo y en el espacio. El registro fotográfico se dividió en tres etapas: la primera que comprende las condiciones iniciales del talud, es decir antes de la implementación de las obras, para lo cual se recolectaron fotografías del año 2014; la segunda etapa comprende el proceso de construcción de las obras, que va desde julio del 2015, mes en el cual se inició el trabajo de campo, hasta Diciembre del mismo año, mes en el cual se finalizó la construcción; la tercera etapa comprende el registro fotográfico después de implementadas las obras, que se realizó desde Febrero hasta Abril del año 2016, mes en el cual terminó el trabajo de campo.

Se recolectaron fotografías del año 2014 para analizar las condiciones iniciales del polígono; y el registro fotográfico se llevó a cabo en 2 etapas: La primera de construcción que abarcó los meses de julio a Diciembre, mes en el cual finalizó la construcción de las obras; y la segunda etapa y en desde antes de la implementación de las obras, es decir posterior al proceso de desalojamiento, reubicación y demolición de las viviendas de invasión ubicadas en el polígono.

3.4.2 Recopilación y registro de contenidos fotográficos previos a la implementación de las obras

Para esta primera etapa se recopilaron algunas fotografías tomadas en el año 2014, donde se encontraba el terreno sin intervenir, y ya en el mes de julio, poco más de un mes de iniciadas las obras, se realizaron visitas al polígono con el fin de observar, determinar a manera de diagnóstico y discutir sobre diferentes aspectos de interés en el lugar, que se diferenciaron a primera vista, y que tendrían relevancia en el objeto de la investigación, como la pendiente, el clima, el suelo, presencia de materiales parentales, presencia de escombros, de infiltración, vegetación, intervención antrópica, actividades realizadas dentro del polígono y sus alrededores.

Se encontró un clima frío y seco, consecuente con la información obtenida, alta presencia de escombros y material removido, debido al proceso de desalojamiento, reubicación y demolición de las viviendas de invasión ubicadas en el polígono, y pendientes elevadas, que hacen a los suelos altamente susceptibles a los deslizamientos, como se puede apreciar en las figuras 6 y 7, evidenciando la necesidad de tomar medidas preventivas de conservación de suelos y manejo adecuado de aguas de escorrentía y sub superficiales.

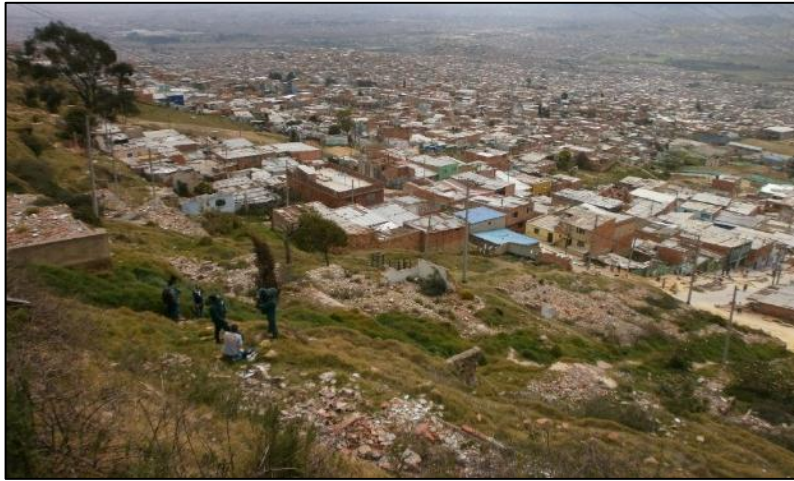


Figura 6. Parte alta del polígono, por escalera 3, Mayo 2014.



Figura 7. Escombros provenientes de la demolición de las casas, Mayo, 2014.

En las figuras 6 y 7 se puede detallar la gran cantidad de basura y piezas de diferentes tamaños de ladrillos y loza de las casas anteriormente ubicadas en el polígono. Aquí también se puede apreciar que la especie de pasto que naturalmente se encuentra en el terreno es *Pennisetum clandestinum* (pasto kikuyo), que se caracteriza por tener unas raíces fuertes y abundantemente fibrosas que le permiten una gran resistencia al pisoteo y al tránsito intenso.

Por otro lado es importante identificar las gradas que se alcanzan a apreciar en la parte superior de la figura 6, que corresponden al costado derecho del polígono, y que en el proceso de construcción de las obras fue pintada con la figura de una serpiente, ya que es un punto de referencia para realizar las posteriores comparaciones con la implementación de los obras de bioingeniería.

Es de recordar que en la zona se presentaron movimientos en masa que repercutieron en algunas partes de la ladera, poniendo en riesgo varias viviendas ubicadas sobre el talud, así como a sus habitantes, motivo por el cual se realizó el desalojamiento y reubicación de las familias afectadas con la posterior demolición de las casas para la restauración del talud.

3.4.3 Recopilación y registro de contenidos fotográficos durante la implementación de las obras

En este apartado se aprecia el proceso de construcción de las diferentes obras de bioingeniería.



Figura 8. Filtro vivo 1, Julio de 2015.

En la figura 8 se observa el filtro vivo primario en proceso de construcción, a finales del mes de julio del año 2015, el cual se encuentra ubicado en la parte derecha del polígono, y cuyo punto de referencia será la vivienda de material de lata color amarillo pálido, que se encuentra junto al árbol.

En la figura 9 se observa un filtro vivo secundario en proceso de construcción a principios del mes de septiembre del año 2015, que llega al filtro vivo 1, donde se aprecia la excavación realizada a lo largo del talud y paralela a este, el punto de inicio del filtro, y los trinchos de disipación ubicados sobre el filtro vivo, para disminuir la energía cinética del agua, como se explicó anteriormente



Figura 9. Construcción del filtro secundario al filtro 1, Septiembre de 2015.

En la figura 10, se aprecian los trinchos de estabilización en proceso de construcción, así como los senderos cercanos a la escalera 1, en octubre de 2015. Por otro lado se observan las casas de la parte inferior del talud que se encontraban en alto riesgo antes de ser intervenido.



Figura 10. Construcción de los Trinchos de estabilización y senderos, escalera 1, Octubre de 2015.

Por su parte en la figura 11 se aprecia el proceso de construcción de los trinchos disipadores de energía en los filtros vivos primarios. Se observa el empotramiento de las guaduas en el suelo, que es aproximadamente de unos 30 cm, con el fin de evitar el socavamiento por las aguas de escorrentía; el ancho de los trinchos de aproximadamente 2 m y las distancias con los otros filtros que en esta zona, son cortas (1 a 2 m) debido a la pendiente en el talud. .



Figura 11. Georreferenciación de trinchos disipadores, Octubre de 2015.

En la figura 12 se aprecian las guaduas en vertical empotradas de los trinchos de estabilización. Este bambú (*Guadua Angustifolia*), empleado para la construcción de todas las obras de bioingeniería, además de ser una especie ambientalmente amigable, es una excelente alternativa como material estructural debido a su rápido crecimiento y alta resistencia a las cargas (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014).



Figura 12. Trinchos de estabilización en la parte baja del talud, Octubre de 2015

Por otro lado se observa que mientras que en la figura 12 los pilotes están separados aproximadamente unos 70 a 80 cm, en la figura 13 al igual que la figura 15 están separados aproximadamente unos 40 cm, debido a que, al estar ubicada en la parte alta del talud con mayor pendiente requiere más soporte que los trinchos de la figura 12, ubicados en la base del talud.



Figura 13. Construcción de Trinchos de estabilización parte alta del talud, Octubre de 2015.

En la figura 14 se pueden observar las terrazas prácticamente terminadas, que se encuentran ubicadas en la parte izquierda del polígono la cual se va a identificar por su ubicación junto a las gradas que están pintadas haciendo alusión a un piano y que son el limite izquierdo del polígono. Estas gradas se denominan gradas N^o1.



Figura 14. Vista global de terrazas de estabilización parte izquierda del polígono. Diciembre de 2015.



Figura 15. Relleno y apisonamiento en trinchos de estabilización, Noviembre de 2015.

En la figura 15 se puede apreciar el proceso final de construcción de los trinchos de estabilización en la parte alta del talud, en la cual ya se ven bien establecidos los postes o pilotes de la estructura, de tal manera que generan un soporte a la guadua colocada horizontalmente. Se aprecia entonces el proceso de llenado de los espacios con sustrato derivado de la excavación, aplicando apisonado constante, con el fin de evitar infiltraciones de agua posteriormente, que puedan generar erosión alrededor de la estructura causando un efecto contrario a lo esperado.

3.4.4 Recopilación y registro de contenidos fotográficos posterior a la implementación de las obras.

En este apartado se presentan las obras de bioingeniería totalmente construidas y establecidas a lo largo de la pendiente del polígono, tanto en el momento inmediatamente después de finalizadas las obras, como en los 4 meses posteriores, en los cuales se fue evidenciando más la acción de las obras de bioingeniería y la vegetación establecida.



Figura 16. Senderos y huerta, Marzo de 2016

En las figuras 16 y 17 se aprecian los senderos y la huerta implementada con la comunidad y para su beneficio, la cual está ubicada en la parte central del polígono.



Figura 17. Sendero, Marzo de 2016.

Fuente: Trabajo en campo polígono Cordillera Sur, 2016.

En la figura 18 se observan los trinchos de estabilización ubicados contiguo a la escalera 1 (límite izquierdo del polígono), encontrándolos totalmente desprovistos de vegetación pero con las estacas plantadas.



Figura 18. Trinchos de estabilización contiguos a gradas N°1, Febrero de 2016.



Figura 19. Trinchos de estabilización contiguos a gradas N°1, Abril de 2016.

Por otro lado, en la figura 19, se encuentran los trinchos de la figura 18 pero en el mes de Abril, ya revegetalizados, al igual que los trinchos entre las escaleras 1 y 2 (parte central del talud), presentadas en la figura 20, en tan solo 4 meses después de terminadas las obras, lo cual permite inferir que las especies escogidas pudieron acomodarse perfectamente al terreno permitiendo la eficiente regeneración del talud en términos de estabilidad.



Figura 20. Trinchos de estabilización entre gradas n°1 y 2, Abril de 2016.

Desde la figura 21 hasta la 23, se puede apreciar la restauración del terreno aledaño al filtro primario 2, con tan solo un mes de diferencia. En varias de la figuras citadas se puede apreciar en los trinchos las estacas de sauco y otras especies arbustivas plantadas, las cuales comienzan a rebrotar, y con ello a generar una acción estabilizadora por parte de las raíces revegetalizando al mismo tiempo el terreno.



Figura 21. Filtro primario 2 primario. Febrero de 2016.



Figura 22. Filtro primario 2, parte alta, Marzo de 2016

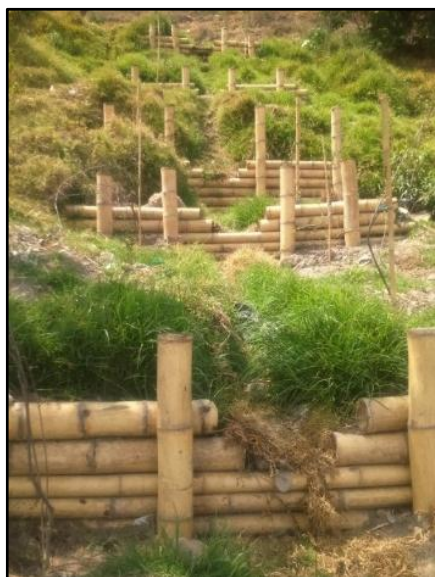


Figura 23. Filtro primario 2, parte media, Marzo de 2016

En la figura 24, se aprecia un filtro secundario que llega al filtro 2 en el mes de Febrero, donde se observa parte del terreno sin cobertura vegetal. En la figura 25, se tiene el mismo a finales del mes de abril con los trinchos y el talud revegetalizado y las estacas rebrotadas, con solo 3 meses de diferencia, lo que evidencia la acción positiva de las obras de bioingeniería.



Figura 24. Filtro secundario del filtro 2, Febrero de 2016



Figura 25. Filtro secundario del filtro 2, Abril 2016.

Las figuras 26 y 27 corresponden a la misma zona del polígono en diferentes fechas, reflejando claramente la efectividad debida a la implementación de las obras y de las especies vegetativas, reestableciendo el talud completamente. Se observan el filtro primario 1 con su espina de pescado (Filtro secundario) recubiertos por la vegetación al igual que los alrededores.



Figura 26. Filtro vivo 1 primario y secundario, Julio de 2015



Figura 27. Filtro vivo 1 primario y secundario, Abril de 2016



Figura 28. Filtro 0 primario y secundario, Febrero de 2016.



Figura 29. Filtro 0 primario y secundario, Abril de 2016.

Por otro lado en la figura 28 y figura 29 se aprecia ampliamente el cambio en las condiciones del talud, siendo totalmente restablecida la vegetación, casi cubriendo por completo tanto el filtro vivo 0, sus trinchos disipadores y los filtros secundarios, como los alrededores.



Figura 30. Polígono de intervención Agosto de 2015

Fuente: Convenio 494 de 2014



Figura 31. Polígono de intervención Abril de 2016

Las figuras 30 y 31 que permiten una visión global de la evolución en el talud, que al igual que las figuras anteriormente presentadas, demuestran el cambio positivo que traen las obras de bioingeniería, las cuales se convirtieron en estructuras totalmente vivas, que junto con la vegetación implementada convirtieron el talud en un terreno resistente a la erosión capaz de amortiguar el impacto de la lluvia y las presiones en el suelo. Es evidente entonces el proceso de restauración natural, revegetalización y mejora en la geometría del talud al comparar las fotografías en el periodo comprendido entre mayo de 2014 hasta Abril de 2016, entendiendo que el proceso de revegetalización al igual que la acción del refuerzo mecánico por parte de las raíces seguirá continuando.

CAPITULO IV. EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERIA MEDIANTE PRUEBAS FISICAS DE SUELO.

El conocimiento e interpretación de las propiedades físicas de un suelo, es de suma importancia a la hora de evaluar su estabilidad, debido a que la condición física del mismo, determina la estructura, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes, además del grado de deterioro de este.

En el presente estudio se realizaron diferentes pruebas físicas en laboratorio en dos etapas. La primera entre los meses de septiembre y octubre del año 2015, y la segunda en el mes de abril del año 2016 con el fin de evaluar las condiciones del suelo antes y después de la implementación de las obras y analizar posibles modificaciones en las características y/o propiedades del suelo atribuibles a la implementación de las obras de bioingeniería y de la vegetación que impliquen a su vez cambios en la estabilidad del talud. Se tienen los resultados de las propiedades de humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, contenido de materia orgánica, y adicional a ello se realizó la prueba de textura con el fin de obtener una caracterización más clara de los suelos del polígono a estudiar.

5.1 DESARROLLO METODOLOGICO

5.1.1 Sistema de muestreo

5.1.1.1 Selección de los sitios para muestreo y toma de muestras

Con la finalidad de obtener un estudio representativo del polígono de intervención, se realizó una división del área en parcelas de 20 m de lado, basado en la guía de zonificación del riesgo y amenazas de CENICAFÉ empleando la escala 1:2000, recomendada internacionalmente para un buen nivel de detalle en estudios de riesgo. El área de estudio es 1.7 Ha aproximadamente, por lo cual se obtuvieron en total 41 parcelas de 20 m de lado, dividiendo el área mediante el programa AUTOCAD 2015, de las cuales se descartan 10 debido a que se ubican en zonas de losa o cubiertas por escombros, para un total de 31 parcelas, como se observa en la Figura 32.

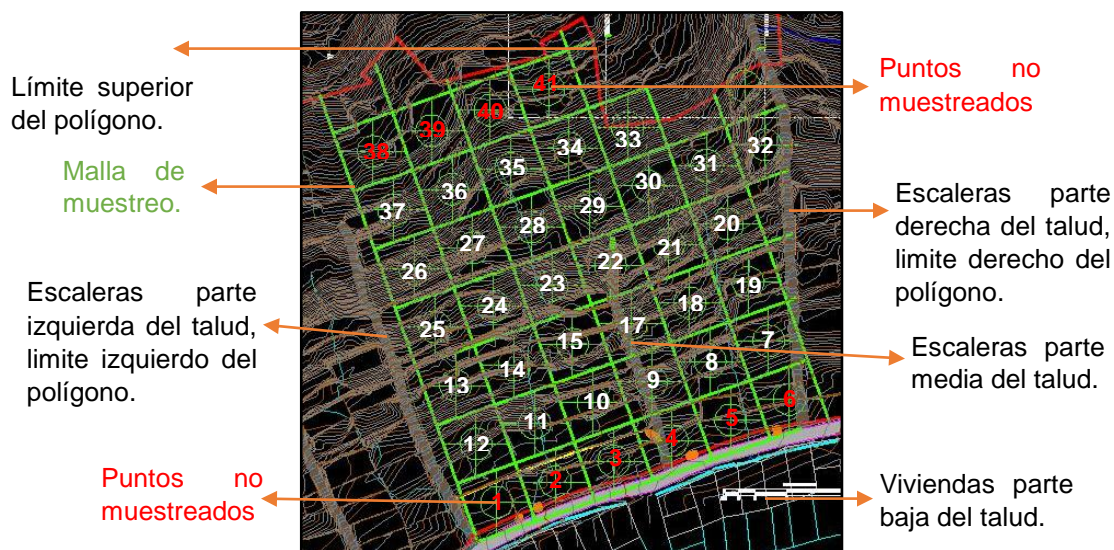


Figura 32. Cuadrícula divisoria del polígono de intervención para toma de muestras.

5.1.1.1 Recolección de muestras y preparación para estudios de laboratorio.

Se tomó una muestra por cada parcela para un total de 31 muestras, las cuales se analizaron individualmente con la finalidad de tener una mayor representatividad y poder evaluar la influencia de las obras de bioingeniería en diferentes puntos del talud; se tomaron muestras disturbadas empleando un barreno hasta una profundidad de 50 cm o hasta encontrar suelo firme o material rocoso que no permita el paso del mismo para las pruebas que no requieren el estado natural del suelo, como la prueba de textura y contenido de materia orgánica, posterior a ello se ponen a secar al ambiente durante 8 a 15 días, con el fin de conservar solo la humedad higroscópica del suelo.

Por su parte la prueba de densidad aparente y porosidad requieren muestras indisturbadas, o que conserven el estado natural del suelo, las cuales se tomaron con tubos biselados e inmediatamente se forraron con vinipel. Aquellas muestras que no pudieron ser procesadas en el laboratorio inmediatamente se guardaron en la nevera a 4 °C con el fin de que no perdieran sus características naturales.

Las pruebas físicas de laboratorio se realizaron basadas en el manual de Métodos Analíticos de Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2008), que es el manual vigente para Colombia, a excepción de la prueba de contenido de materia orgánica la cual se basó en el estudio realizado por Schulte y Hopkins (1996), citados por Eyherabide (2014).

Los métodos empleados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Métodos utilizados en cada prueba realizada

Prueba	Método	Objetivo del método
Textura	Bouyoucos	Determinación de los porcentajes de arena, limo y arcillas presentes en la fracción mineral del suelo, los cuales se llevan al triángulo textural del departamento de Agricultura de los Estados Unidos
Humedad	Gravimétrico	Determinación de la humedad mediante la diferencia entre el suelo húmedo y el secado a 105 °C durante 24 horas.
Densidad aparente (Da)	Cilindros biselados	Determinación de la densidad aparente del suelo, la cual incluye los poros del mismo.
Densidad real (Dr)	Método del picnómetro	Determinación de la densidad real del suelo, la cual no incluye los poros del mismo.
Porosidad	$\%poros = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$	
Contenido de materia orgánica	calcinación o pérdida por ignición (loss on ignition, LOI)	Cuantificar directamente el contenido de MO. Se basa en la determinación de la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura de 200 °C durante 2 horas.

5.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

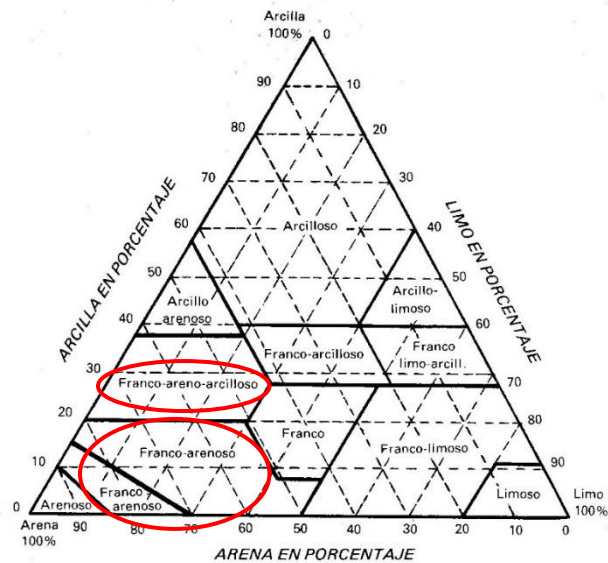
5.2.1 Textura

La textura (granulometría de los tamaños finos) se refiere a la proporción o la forma en que se distribuyen los componentes inorgánicos de diámetro menor a 2 mm, es decir las partículas finas, en el suelo; las cuales se agrupan en tres clases según su tamaño: Arena, Limo y Arcilla. La textura es una propiedad de suma importancia, ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica, movimiento del agua, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, erodabilidad, uso y manejo (Romero, Santamaría, & Zafra, 2009).

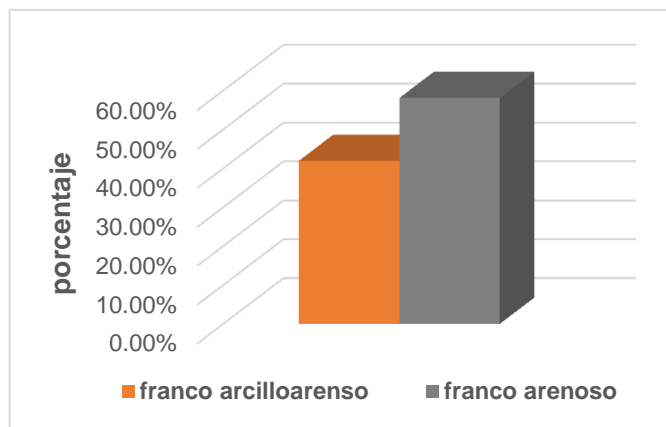
Las partículas texturales del suelo, arena, limo y arcilla, se asocian para formar unidades de mayor tamaño o partículas secundarias denominados agregados, los cuales con el espacio de huecos que llevan asociados, como resultado de interacciones fisicoquímicas, dan origen a la estructura del suelo; la cual varía según como se hallen agregadas las partículas individuales, sin importar si presentan la misma textura. La estructura afecta directamente la aireación, el

movimiento del agua en el suelo, las características de la superficie del suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión (Villamil, 2015).

El procedimiento empleado para la identificación de las texturas y presentado en el ANEXO 2, junto con los porcentajes de arenas, limos y arcillas obtenidos fue realizado con el fin de identificar el tipo de suelo en el talud por lo que este parámetro solo fue determinado antes de la implementación de las obras de bioingeniería. En el estudio se encontraron 2 clases de suelos, donde un 58,06%, como se observa en la Gráfica 2, presentaron características Franco arenosas y un 41,94 franco arcillo arenosas según el triángulo textural de los Estados Unidos, presentado en la Gráfica 1; siendo los porcentajes de arena mayor al 50% en todos los puntos de muestreo realizados en el talud.



Gráfica 1. Triángulo Textural de los Estados Unidos
Fuente: (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004)



Gráfica 2. Texturas presentes en el talud de intervención en porcentaje

Debido a que el mayor porcentaje lo presenta la textura franco arenosa, y que las características son similares a la textura franco arcillo-arenosa, se asume este tipo de textura como global para el análisis de los resultados de cada prueba realizada.

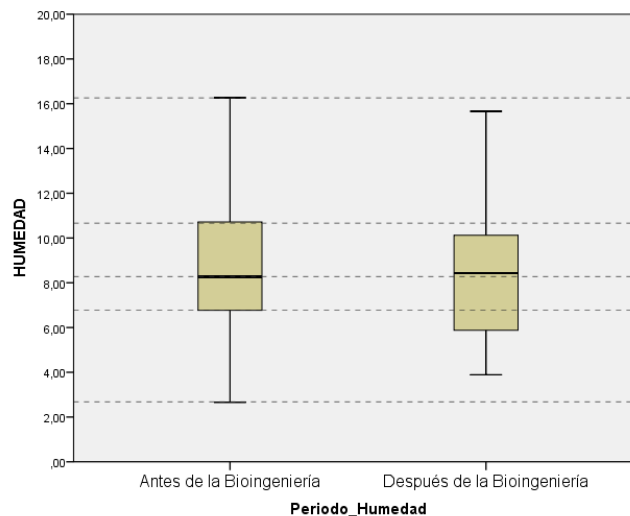
Para el análisis de los resultados de las pruebas físicas Densidad aparente, Densidad real, porosidad y contenido de materia orgánica, se realiza un análisis exploratorio de datos mediante el uso de diagramas de cajas y estadísticas básicas, en el marco de una hipótesis u objetivo, la cual se valida inicialmente con un estudio de normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro Wilk y posterior a ello se realiza la prueba T pareada, mediante la cual se estudia si existe o no diferencias significativas según la hipótesis planteada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería, con el uso del paquete estadístico IBM SPSS statistics visor.

5.2.2 Humedad de Campo representada como Humedad Gravimétrica (HG).

La humedad del suelo está constituida por la cantidad de agua que ocupa los espacios porosos. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y algunas condiciones de la zona como el régimen de lluvias, el riego y la evapotranspiración potencial (UNAD, 2011).

El contenido de agua en el suelo es expresado como porcentaje, con base en el peso se entiende como contenido gravimétrico o en el volumen como contenido volumétrico de una muestra representativa del mismo, la metodología empleada se presenta en el ANEXO 3 y los resultados en el ANEXO 6 en la Tabla A6.1. La manera más común de medir la humedad del suelo es la gravimétrica, por lo que para la evaluación de la humedad solo se tiene en cuenta los resultados obtenidos por este método.

La capacidad de campo de los suelos franco arenosos se encuentra entre 10,3 y 12,8 % según Salazar (1999) y Hossne (2004), citados por Hossne (2009); en el presente estudio se encuentra un valor promedio de la humedad gravimétrica de 8,8% antes de la implementación de las obras de bioingeniería y de 8,7% después de la implementación de las obras, como se puede observar en la Tabla 3, lo que indica que el suelo no ha alcanzado su máximo estado de retención de agua, sin embargo se debe tener en cuenta que las condiciones climáticas de Cordillera Sur son secas, con escasa precipitación, pero eventos de lluvia muy fuertes, que tienden a generar mayor escorrentía que infiltración de la misma, influenciados además por la alta pendiente del talud.



Gráfica 3. Diagrama de cajas, resultados de Humedad Gravimétrica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos prueba Humedad Gravimétrica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Numero de muestras (N)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Media (%)	Varianza
Humedad gravimétrica antes	31	2,66	16,27	8,838	12,407
Humedad gravimétrica después	31	3,89	15,66	8,728	11,807

Al comparar las medias antes y después de la bioingeniería hay una leve disminución de esta, sin embargo la variabilidad es alta, como se aprecia en el diagrama de cajas de la Gráfica 3, presentando un coeficiente de variación de 0.398 y 0.394 respectivamente, mayores a 0.2 o al 20%. Al realizar la prueba T pareada luego de cumplir con el criterio de normalidad de Shapiro Wilk, al presentar un valor de $SIG > 0.05$, según se observa en la Tabla 4, se tiene que hay diferencia significativa entre los datos antes y después de las obras. Lo anterior se puede contribuir a la acción de los filtros vivos, los cuales ayudan a drenar el agua direccionándola hasta los mismos para finalmente conducirla al alcantarillado, por lo que los puntos cercanos a estos tenderán a aumentar el contenido de humedad y los más lejanos a disminuir.

Tabla 4. Prueba de normalidad contenido de Humedad Gravimétrica de la diferencia antes y después de las obras de bioingeniería.

Prueba	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	GI	Sig.
Diferencia de HG, antes y después de la bioingeniería	0,983	31	0,898

Tabla 5. Estadísticos de muestras Humedad Gravimétrica relacionadas antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Media (%)	N	Desviación estándar	Coefficiente de variación
HG antes de la bioingeniería	8,838	31	3,522	0,398
HG después de la bioingeniería	8,7284	31	3,436	0.394

Tabla 6. Correlaciones de muestras Humedad Gravimétrica relacionadas antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

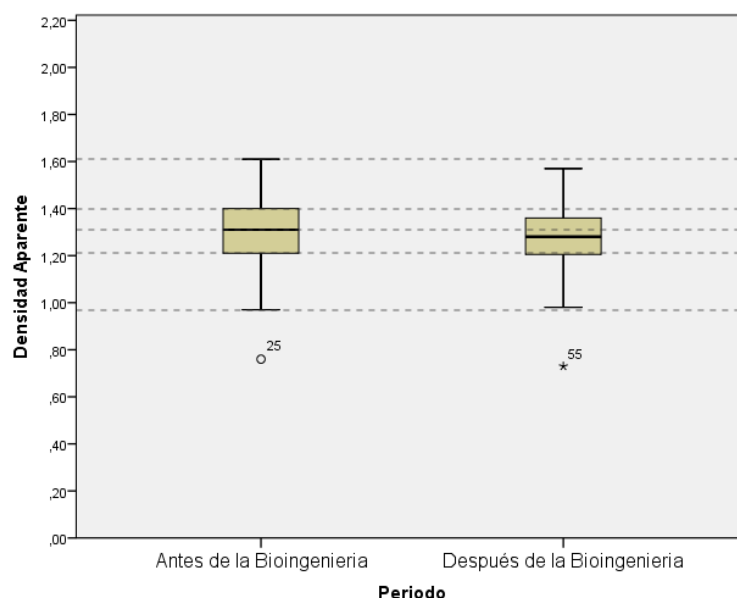
Prueba	N	Correlación	Sig.
HG antes de la bioingeniería y HG después de la bioingeniería	31	0,483	0,006

5.2.3 Densidad aparente (DA)

La densidad aparente es la densidad que corresponde a la masa de suelo por unidad de volumen, que incluye el espacio ocupado por los poros, por lo que permite inferir la organización de la fracción sólida del suelo, su grado de compactación, porosidad y grado de aireación, así como la resistencia mecánica y la cohesión del mismo (Doran y Parkin, 1994), como se cita en (Rubio Gutiérrez, 2010), además de las dificultades para la emergencia, enraizamiento y circulación del agua y del aire (Porta & López Acevedo, 2003).

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las mismas y los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua (Rubio Gutiérrez, 2010).

Los resultados del estudio se presentan en el ANEXO 6; los estadísticos descriptivos se presentan en la Tabla 7, y su representación en el diagrama de cajas presentado en la Gráfica 4, donde se tienen una baja dispersión de datos, un valor promedio de DA de $1,3 \text{ g/cm}^3$, antes de la implementación de obras de bioingeniería y de $1,26 \text{ g/cm}^3$ después de la implementación de las mismas indicando una disminución en dicho parámetro, lo cual es muy positivo ya que cuanto mayor la densidad aparente, menor es el espacio poroso, que permite el movimiento del agua, el crecimiento y penetración de raíces y el desarrollo de las plantas, indicando una mejora en la estructura del mismo permitiendo el desarrollo de las raíces que a su vez se encargan de amarrar el suelo y mejorar su estabilidad.



Gráfica 4. Diagrama de cajas, resultados de densidad aparente (DA)

Tabla 7. Estadísticos descriptivos prueba Densidad Aparente antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Numero de muestras (N)	Mínimo (g/cm ³)	Máximo (g/cm ³)	Media (g/cm ³)	Varianza
Densidad Aparente antes	31	0,76	1,61	1,30	0,031
Densidad Aparente después	31	0,73	1,57	1,26	0,025

Por otro lado se observa en el diagrama de cajas un valor atípico antes de la implementación de las obras de bioingeniería que corresponde al punto 25 de muestreo, ubicado en la parte media del talud y un dato extremo después de la implementación de las obras, que corresponde al punto 30, ubicado en la parte alta del talud, lo que puede indicar algún error en la prueba, sin embargo, se tiene un coeficiente de variación (Cv) de 0,1358 y 0,1256 respectivamente, como se puede apreciar en la Tabla 9, para las condiciones iniciales y finales, menor a 0,2, lo que representa que las variabilidades son muy bajas y los datos atípicos tienen un impacto muy bajo, indicando uniformidad en las mediciones.

Tabla 8. Prueba de normalidad Densidad Aparente antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	GI	SIG
Diferencia de DA, antes y después de la bioingeniería	0,956	31	0,235

Tabla 9. Estadísticos de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	N	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
DA antes de la bioingeniería	31	0,176	0,136
DA después de la bioingeniería	31	0,159	0,126

Tabla 10. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	N	Correlación	Sig.
DA antes de la bioingeniería y DA después de la bioingeniería	31	0,164	0,379

Al analizar los resultados, se validó el supuesto de normalidad de las diferencias de las densidades antes y después de la bioingeniería al encontrar un valor de $SIG > 0,05$, como se observa en la Tabla 8, no obstante, el valor de $SIG > 0,05$ en la prueba T, según se ve en la Tabla 10, indica que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los dos escenarios, sin embargo las pruebas se realizaron en el corto plazo, 4 meses después de la implementación de las obras, por lo que las plantas y su sistema radicular no han alcanzado su máximo desarrollo, sin embargo muestra como la bioingeniería y la vegetación utilizada tiene un efecto positivo en el suelo.

Cabe destacar que las raíces de la vegetación tienen un efecto importante en la DA, ya que un buen sistema radicular explora mejor el suelo, favorece la agregación, rompe las capas duras y con ello se favorece la disminución de la densidad aparente. Por otro lado al aumentar el espacio poroso, es indudable que se dan mejores condiciones para el buen desarrollo vegetal, se favorece también el intercambio suelo-planta, la difusión del aire en el suelo y el movimiento del agua (Scalone Echave, 2008). Como concepto muy general, se podría afirmar que con densidades aparentes menores, se tienen mejores condiciones para el desarrollo de la vegetación y con ello un incremento en la estabilidad de la capa superficial del mismo.

5.2.4 Densidad real (DR) y porosidad (P)

La densidad real es la relación que existe entre la masa de las partículas secas y el volumen real de la fase sólida conformada por las mismas, sin tener en cuenta su organización en el suelo. Esta propiedad depende de la composición mineral del suelo y del contenido de algunos sólidos especiales en él, como la materia orgánica y los óxidos de hierro (Jaramillo J., 2002). Teniendo en cuenta que esta

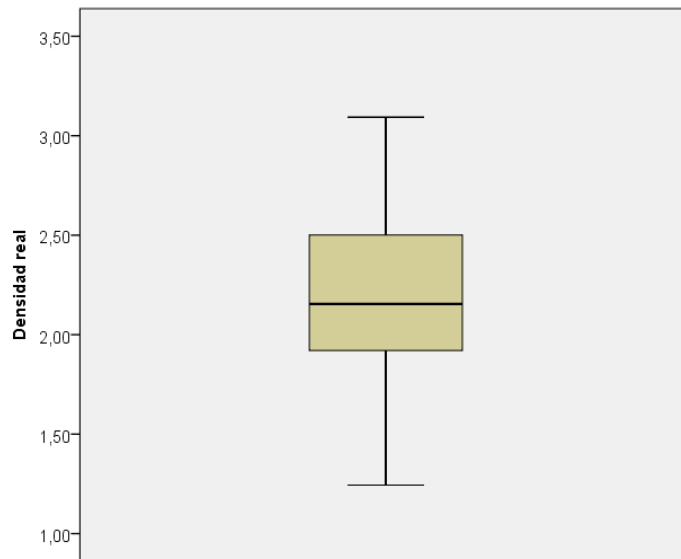
propiedad varia de manera insignificante con el tiempo, ya que no considera el espacio de los poros, en el presente estudio de investigación, esta se halló con el fin de poder determinar la porosidad.

La porosidad por otra parte corresponde al volumen de suelo disponible para ser ocupado por los líquidos y gases, es decir, el que no es ocupado por la fracción sólida del suelo, así que depende de ella, por lo que se verá reflejada en la densidad aparente y su determinación requerirá también del conocimiento de la densidad real (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, 2009). Ello quiere decir que los valores de densidad aparente son inversamente proporcional a los valores de porosidad, lo que implica que, al igual que la densidad aparente, la porosidad está íntimamente ligada al desarrollo de las raíces, el contenido de materia orgánica, la infiltración, la escorrentía y agrietamientos en el suelo, mejorando sus condiciones (Zanuzzi, Arocena, Mourik, & Faz Cano, 2009).

La metodología empleada para la determinación de los parámetros de densidad real y porosidad se explica en el ANEXO 4 y los resultados se presentan en el ANEXO 6 en la Tabla A6.

El valor de densidad real promedio obtenido fue de $2,1905 \text{ mg/m}^3$, oscilando en un amplio rango (Entre $1,24 \text{ mg/m}^3$ y $3,09 \text{ mg/m}^3$) en los diferentes puntos de muestreo como se observa en la Tabla 11. El contenido de los distintos elementos constituyentes de los suelos es el que determina las variaciones de su densidad real, por lo que la determinación de este parámetro permite por ejemplo estimar su composición mineralógica. Si la densidad real es muy inferior a $2,65 \text{ gr/cm}^3$, se puede pensar que el suelo posee un alto contenido de materia orgánica, si es significativamente superior a $2,65 \text{ gr/cm}^3$ se puede inferir que posee un elevado contenido de óxidos de Fe o minerales ferromagnésicos (Jaramillo J., 2002).

Por otro lado al comparar los valores de porosidad obtenidos antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería se tuvo un aumento en promedio del total de muestras del 1,62%, siendo que el valor inicial fue de 38,53 y el final de 40,15, como se observa en la Tabla 11, lo cual es consistente con los resultados esperados, teniendo en cuenta que la densidad aparente disminuyó, y que esta relación inversamente proporcional da buen indicio de una mejora desarrollo de las raíces encargadas de proteger y amarrar la capa más superficial del suelo a las otras capas (Barrera Gutiérrez, Rivera Posada, & Cadena Romero, 2013).



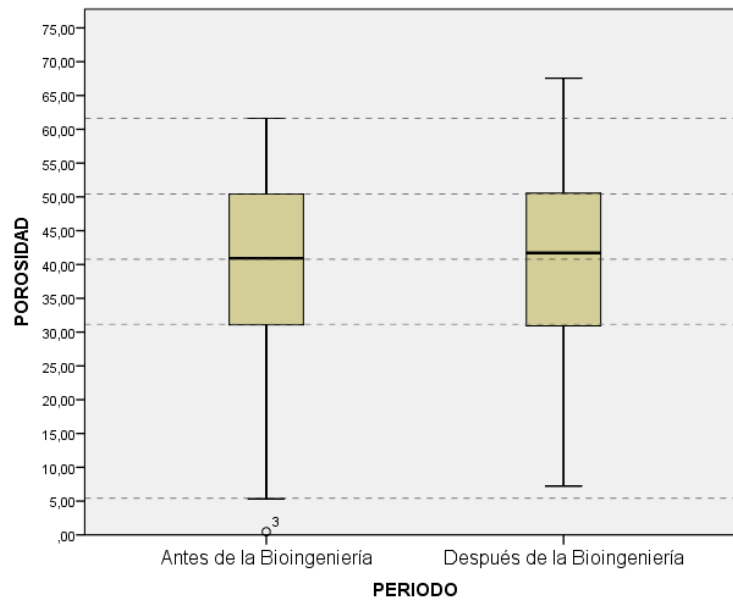
Gráfica 5. Diagrama de cajas Densidad Real

Tabla 11. Estadísticos descriptivos prueba Densidad Real antes de la bioingeniería y Porosidad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Número de Muestras (N)	Mínimo	Máximo	Media	Varianza
Densidad Real (g/cm ³)	31	1,24	3,09	2,1905	0,264
Porosidad Inicial (%)	31	0,47	61,62	38,5268	235,649
Porosidad Final (%)	31	7,21	67,56	40,1477	220,367

El diagrama de cajas presentado en la gráfica 6 indica que aunque el cambio antes y después de la bioingeniería es relativamente pequeño, hay un aumento tanto en la mediana como en los cuartiles 1 y 3, por lo que claramente deja ver la tendencia de las muestras a aumentar su porosidad.

El diagrama también deja ver que los datos no son muy homogéneos debido a su longitud, lo que se corrobora al observar el coeficiente de variación en la Tabla 13, cuyo valor es de 0,398 y 0,370 antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería respectivamente, lo cual indica, al ser ambos mayores de 0,2 (20%), que la variabilidad de las porosidades en cada caso es alta. El dato atípico que se observa en el diagrama de caja antes de la bioingeniería influye en la variabilidad aunque no esté muy alejado del cuartil por lo que probablemente se deba a algún error presentado en la muestra debido a las condiciones del suelo en la zona muestreada.



Gráfica 6. Diagrama de Cajas P

La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, que es la comúnmente utilizada para pruebas con mayor número de datos, obteniendo un sig de 0,340, que al ser mayor de 0,05 refleja normalidad en los datos, lo que permite realizar la prueba paramétrica de muestras relacionadas T pareada cuyos resultados se encuentran en la Tabla 14, reflejando un valor de sig igual a cero, que al ser menor de 0,05 indica que se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las porosidades en los escenarios antes y después de las obras de bioingeniería, lo que evidencia el aumento satisfactorio en la porosidad del suelo 4 meses después de implementadas las obras de bioingeniería.

Tabla 12. Prueba de Normalidad para diferencia de Porosidad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	GI	SIG
Diferencia de Pr antes y después de la bioingeniería	0,963	31	0,340

Tabla 13. Estadísticos de muestras porosidad relacionadas para prueba t pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Media (%)	N	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Pr antes de la Bioingeniería	38,527	31	15,35087	0,398
Pr después de la Bioingeniería	40,148	31	14,84476	0,370

Los resultados de porosidad obtenidos dan buen indicio de una mejora en las condiciones de estabilidad del talud, debido a que una buena porosidad permitirá una aireación adecuada, buen desarrollo de las raíces de las diferentes especies herbáceas, arbustivas y arbóreas y una circulación adecuada del agua. Estas condiciones permiten una adecuada tensión de poros evitando saturación en el talud en eventos de fuertes lluvias. Esto finalmente comprueba que en los cuatro meses después se dio un establecimiento exitoso de la vegetación que evidencia un buen desarrollo en las raíces y que se espera seguirá aumentando con el paso del tiempo para recuperar totalmente el talud.

Tabla 14. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada porosidad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	N	Correlación	Sig
Porosidad inicial y porosidad final	31	0,736	0,000

5.2.5 Contenido de materia orgánica (CMO)

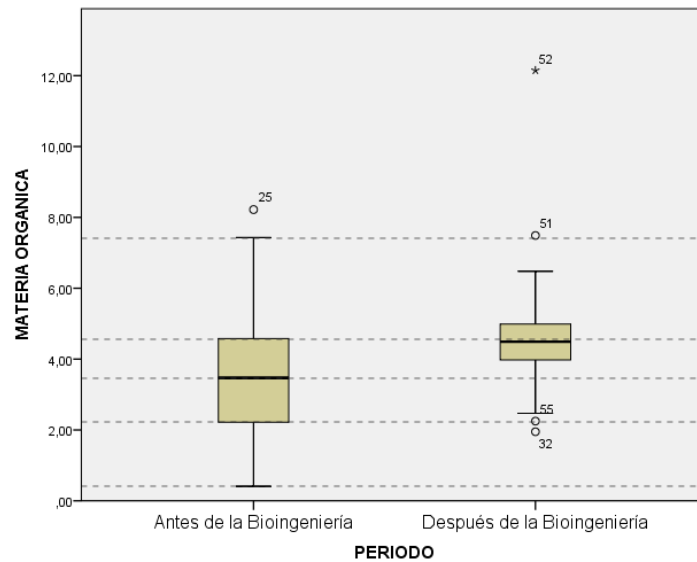
La materia orgánica es un parámetro importante de un suelo ya que condiciona la fertilidad de éste, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Así favorece la estructura del suelo, incrementa la capacidad de retención de agua, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y eleva su capacidad amortiguadora de cambios de pH entre otras muchas propiedades.

La importancia que se le reconoce a la materia orgánica deriva de su intervención en procesos como la formación y estabilización de agregados, el ciclo biogeoquímico de nutrientes, el pH del suelo y el balance de agua y energía.

La metodología empleada en el estudio para la cuantificación de la materia orgánica se presenta en el ANEXO 6, y los resultados en la Tabla A6. Los valores promedio encontrados antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería son de 3,5% y 4,6% respectivamente, indicando un incremento en el contenido de materia orgánica y una disminución en la variabilidad de los datos como se aprecia en el diagrama de cajas de la Gráfica 7, lo cual es muy positivo ya que contribuye en gran medida a la estabilidad de los agregados del suelo mediante su acción cementante, lo que indica una mejora en la estructura y la estabilidad de este.

Al realizar el estudio estadístico se halló un comportamiento normal de las diferencias antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería, al presentar un valor de SIG>0.05 en la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, como

se puede ver en la Tabla 15; sin embargo al realizar la prueba T pareada, se tiene que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores antes de la implementación de las obras y después, debido a que el valor de SIG es mayor a 0,05, sin embargo aunque el aumento del contenido de este constituyente del suelo no es muy elevado, su papel en la estructura y procesos que tienen lugar en suelo y su estructura es fundamental.



Gráfica 7. Diagrama de cajas, resultados de Contenido de materia orgánica (CMO)

Tabla 15. Estadísticos descriptivos prueba Contenido de Materia Orgánica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Numero de muestras (N)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Media (%)	Varianza
CMO antes	31	0,410	8,220	3,520	3,552
CMO después	31	1,950	12,15	4,612	3,350

Por otro lado se tiene una alta variabilidad tanto en las condiciones iniciales o antes de la bioingeniería y después de esta al presentar coeficientes de variabilidad mayores a 0,2 como se ve en la Tabla 17, en lo cual puede influir la presencia de datos atípicos, además de uno extremo después de la implementación de las obras lo cual se pudo presentar por algún error en la prueba o por la heterogeneidad del talud y su constante intervención.

Tabla 16. Prueba de normalidad para diferencia de Contenido de Materia Orgánica antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	GI	Sig.
Diferencia de CMO, antes y después de la bioingeniería	0,953	31	0,193

Tabla 17. Estadísticos de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	Media (%)	N	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
CMO antes de la bioingeniería	3,520	31	1,885	0,536
CMO después de la bioingeniería	4,611	31	1,830	0,397

Tabla 18. Correlaciones de muestras relacionadas para prueba T pareada antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Prueba	N	Correlación	Sig.
CMO antes de la bioingeniería y CMO después de la bioingeniería	31	0,243	0,188

CAPITULO VI. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD ASOCIADA A LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOTÉCNICO.

La estabilidad de un talud respecto a movimientos o remociones en masa, desde el punto de vista geotécnico, es generalmente determinada mediante el cálculo del Factor de Seguridad (F_s), definido por Fellenius (1992), citado por (Suarez Diaz, 2009), como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla.

En el cálculo del F_s se considera la sumatoria de fuerzas o de momentos en el caso de superficies de falla circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes (Suarez Diaz, 2009).

$$F_s = \frac{\textit{Resistencia al cortante disponible}}{\textit{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

$$F_s = \frac{\textit{Momento resistente disponible}}{\textit{Momento actuante}}$$

Existen diferentes métodos para el análisis de la estabilidad de un talud entre los cuales se tienen los métodos numéricos, los métodos dinámicos y los métodos de equilibrio límite (Suarez Diaz, 2009), siendo estos últimos los más comúnmente utilizados debido a su sencillez y a que se obtiene un valor de F_s que no difiere mucho del valor real (Herrera Rodríguez, 2003).

Los métodos de equilibrio límite consisten en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido constituido por el talud y por una superficie de deslizamiento de cualquier forma, bien sea línea recta, arco circular o espiral logarítmica; con tal equilibrio se calculan las tensiones de corte y se comparan con la resistencia disponible valorada según el criterio de rotura de Coulomb (López Pineda, 2012) determinando si tal resistencia es suficiente para soportar los esfuerzos cortantes que tienden a causar la falla o deslizamiento.

Entre los métodos del equilibrio límite, se pueden considerar el equilibrio global del cuerpo rígido los cuales actualmente no se utilizan y los que por motivos de la ausencia de homogeneidad, dividen la masa en rebanadas considerando el equilibrio de cada una. Los métodos de cálculo se resumen en la Figura 33.

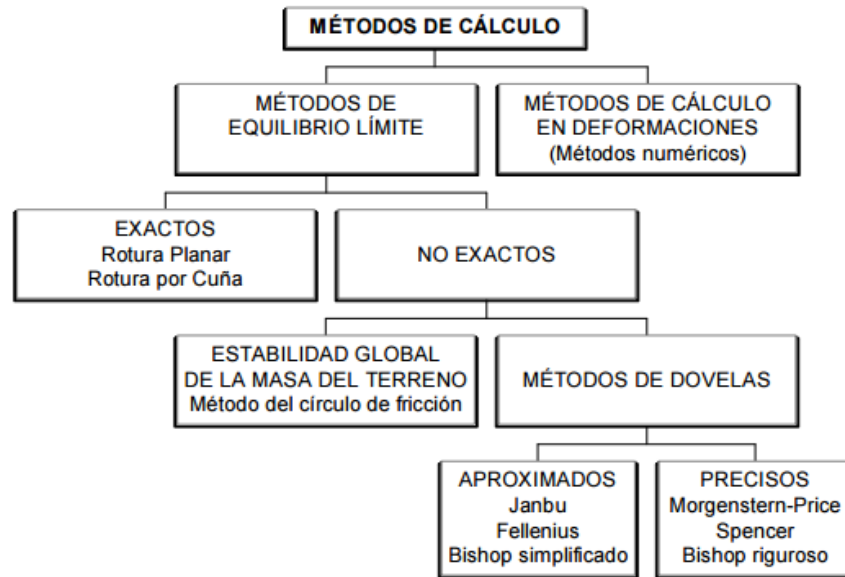


Figura 33: Métodos de cálculo del Fs

Fuente: (Herrera Rodríguez, 2003)

El método de Bishop simplificado, el cual realiza algunas aproximaciones al método riguroso, aunque solo satisface el equilibrio de momentos al ser válido solo para superficie de falla circulares, es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo del Fs de los taludes, debido a que se considera que los resultados son muy precisos teniendo en cuenta que los errores cometidos con respecto al método completo son de alrededor de un 1 % (López Pineda, 2012); por lo que es empleado en el presente estudio para el cálculo del factor de seguridad antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

La ecuación utilizada en el método de Bishop Simplificado es:

$$F_s = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha \tan \phi')} l F_s \right]}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

Donde:

Δl : Longitud del arco de la base de la dovela

W: Peso de cada dovela

c', ϕ' : Parámetros de resistencia del suelo

u: presión de poros en la base de cada dovela

α : Angulo de radio y vertical en cada dovela

Como se observa en la anterior ecuación el término F_s , se encuentra en ambos lados de la misma, por lo que se requiere un proceso de iteración para calcular el factor de seguridad.

6.1 DESARROLLO METODOLOGICO

Para el cálculo del F_s antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería en el polígono de intervención de cordillera sur se emplea el software SLOPE/W versión 2012, un programa sencillo de manejar y bastante completo, con licencia estudiantil, el cual presenta las siguientes opciones para el análisis descritas en su respectivo manual (López Pineda, 2012):

6.1.1 Métodos de cálculo:

El programa permite realizar los cálculos de estabilidad a través de una gran variedad de métodos, sin embargo en la versión de capacidades reducidas con licencia de estudiante no todas estas opciones están disponibles, siendo aplicables solo los métodos: Ordinario (Fellenius), Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer y Morgenstern-Price, que se consideran suficientes para un estudio de cierto nivel de un talud. Para el estudio del polígono en caso se empleó el método de Bishop simplificado, por su simplicidad y precisión.

6.1.2 Geometría y estratigrafía:

En el software la geometría es versátil y adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones, además de permitir la definición de grietas de tracción y modelar suelos parcialmente sumergidos.

Es importante tener en cuenta que para el cálculo del F_s es necesario definir una geometría representativa del talud completo, ya que muchas veces solo se tiene en cuenta la altura y la pendiente del mismo, desconociendo el resto de la geometría, por lo que el manual del software propone una geometría en función de la altura del talud, como se observa en la Figura 34, la cual es aplicable tanto a los métodos de equilibrio límite como a cálculos a través de métodos numéricos.

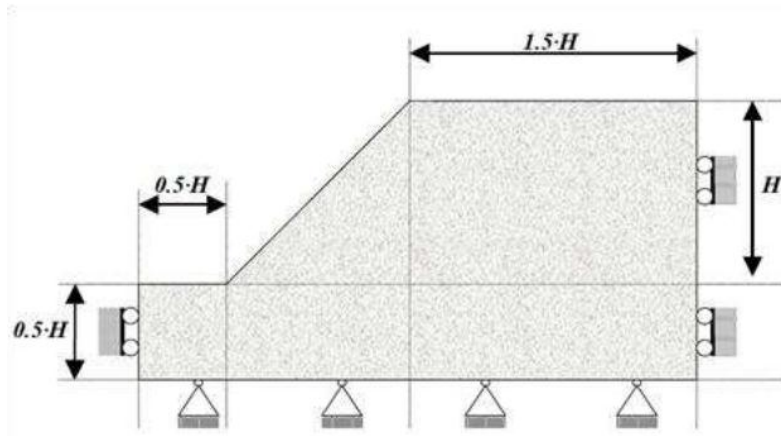


Figura 34: Recomendaciones de la geometría de un modelo

Fuente: (López Pineda, 2012)

En el presente estudio se trazaron 3 perfiles, uno a la derecha del polígono, otro en el centro y el último a la izquierda, como se aprecia en la Figura 35 en zonas consideradas críticas, teniendo en cuenta la geometría de la Figura 34.

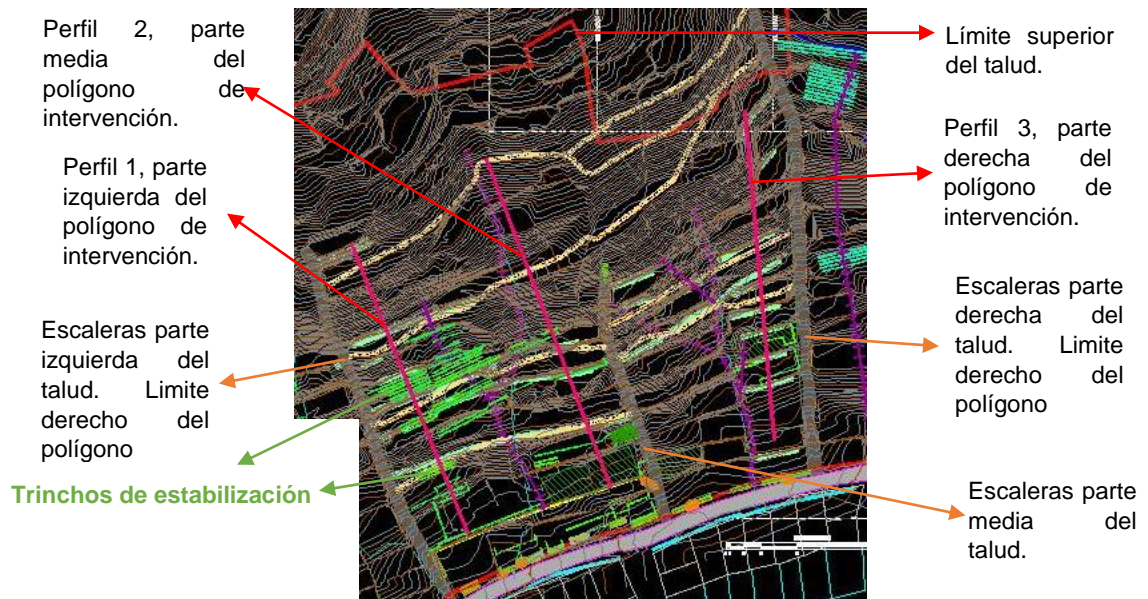


Figura 35. Selección de las tres perfiles representativos del talud

Al mismo tiempo se dividió cada talud en dos tipos de suelo o dos regiones de estudio bien diferenciadas, la primera es la zona superficial, con un tipo de suelo Franco Arenoso, resultado obtenido en un mayor porcentaje con la prueba de textura realizada en campo y respaldado por las planchas del IGAG para Bogotá, y la parte más profunda del talud se representa como una arena limosa.

Se debe tener en cuenta que se buscó una aproximación o una representación general del comportamiento del talud y debido a falta de recursos para realizar estudios más rigurosos sobre el tipo y la variedad de suelos en el mismo por lo que se despreció la presencia de otros materiales granulares y rocosos.

6.1.3 Superficies de deslizamiento:

El software dispone de los métodos malla de centros y límites de radios, y zonas de entrada y salida, acotando los posibles radios de rotura. Para este estudio se empleó el método de malla de centros y límites de radios, los cuales permiten trazar los radios tangentes a los círculos de rotura, así como la malla que representa los centros de los mismos.

6.1.4 Propiedades de los suelos:

Con objeto de modelar el comportamiento de los suelos el programa dispone, entre otros, del modelo de Mohr-Coulomb, para evaluar el comportamiento de los materiales implicados en el problema a solucionar, el cual es el método más comúnmente utilizado para realizar análisis de estabilidad de taludes y el que se empleó en el presente estudio. Por otro lado el programa permite considerar valores de presión hidrostática mediante diferentes sistemas, así como tipos de cargas, sin embargo en el presente estudio no se tienen en cuenta debido a que el nivel freático es despreciable. Se debe tener en cuenta que no se considera el refuerzo generado por los trinchos de estabilización, ya que la versión estudiantil no dispone de opciones que lo permitan.

Por su parte los parámetros de estabilidad, cohesión (C) y ángulo de fricción (Φ), se toman de literatura y el parámetro peso unitario se midió en campo para el suelo franco arenoso, antes y después de la implementación de las obras de Bioingeniería, en base a la densidad aparente del terreno utilizando un valor para la aceleración de la gravedad de 9.78 m/s^2 , característico de la ciudad de Bogotá. Los valores de los parámetros de resistencia utilizados y la fuente o justificación correspondiente se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Parámetros de resistencia del talud

CONDICIONES INICIALES			
Tipo de suelo	Parámetros de resistencia		Fuente y/o justificación
Franco Arenoso	C (Kpa)	25	Dialogo XXIV. Manejo y conservación de suelos (Puignau, 1988)
	Φ (°)	28	
	Peso unitario (KN/m ²)	12,714	Estimado del promedio de la densidad aparente medida en campo antes de la implementación de las obras de Bioingeniería.
Arena Limosa	C (Kpa)	2	Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects (Kuma Kokutsea, Tranquille Temgouaa, & Kavazovic, 2016)
	Φ (°)	32	Se asume el valor intermedio para arena limosa densa establecido en el libro Principios Básicos de Mecánica de Suelos (Polanco Florez, 2009)
	Peso unitario (KN/m ²)	15,2	Classification and Identification of Soils (Casagrande, 1948).
DESPUES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE OBRAS DE BIOINGENIERÍA			
Franco Arenoso	C (Kpa)	45	Se asume un incremento en la C, del 80%, el valor para el máximo desarrollo de las estacas de nacedero y sauco encontrada por (Sanchez Zapata, 2015), a los 8 meses de desarrollo. Se toma el valor máximo debido a que en el software se desprecia la fuerza de contención de la masa de suelo ejercida por los trinchos de estabilización.
	Φ (°)	28	El ángulo de fricción del suelo no se afecta por las raíces ya que no es clara la contribución friccionante de las raíces (Suarez Diaz, 2009).
	Peso unitario (KN/m ²)	12,323	Estimado del promedio de la densidad aparente medida en campo 3 meses después de la implementación de las obras de Bioingeniería.
Arena Limosa	C (Kpa)	2	Se consideran los mismos valores de la condición inicial, debido a que la los parámetros de resistencia se ven directamente afectados por la vegetación, la cual interviene en los primeros metros del suelo, es decir la primera capa.
	Φ (°)	32	
	Peso unitario (KN/m ²)	15,2	

6.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se evaluó cada perfil del talud de estudio de forma individual, antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería; se realizó un análisis del talud de forma global y estudios locales, donde se pudo analizar mejor la efectividad de la bioingeniería para estabilizar la parte superficial del talud.

Primero se estudió la condición global, seguido de las condiciones locales: parte superior, media y baja; las cuales comprenden la parte más superficial del talud, siendo esta la afectada en mayor proporción por las obras de bioingeniería que incluyen la revegetalización del mismo.

Al realizar la modelación en el software se obtienen diferentes círculos de falla con sus correspondientes valores de F_s dependiendo de los radios y cuadrículas seleccionadas, sin embargo el valor de F_s representativo es el más bajo de las superficies de falla, es decir el correspondiente a la más crítica; no obstante estas varían en algunos casos al mantener estable los radios y la cuadrícula de la superficie de deslizamiento antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería en las condiciones locales (las condiciones globales no presentan variaciones significativas de los círculos de falla),

Por lo anterior se estudió inicialmente el F_s en la superficie crítica sin tener en cuenta la variación de los círculos de falla; posterior a ello se analizaron superficies idénticas de falla antes y después de las obras, cuando los círculos de falla presentaron cambios, sin tener en cuenta variaciones en los radios y la cuadrícula de la superficie de deslizamiento y tampoco que fuera o no las más crítica, con el fin de identificar el efecto de la bioingeniería en una zona idéntica.

6.2.1 PERFIL N°1: Parte izquierda del polígono de intervención.

Comprende la zona considerada como crítica y representativa de la parte izquierda del talud. El perfil presenta una altura de 51m y una distancia horizontal de 96m.

Condición Global

Se estudió el F_s en la zona más crítica según ubicación de los radios y la cuadrícula de la superficie de deslizamiento que se pueden apreciar en la Figura 36 para una profundidad de 35m del círculo crítico de falla.

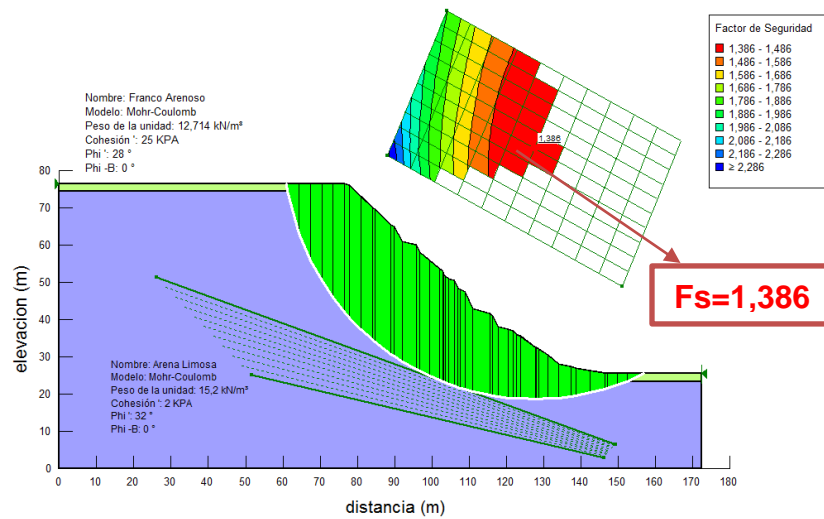


Figura 36. Modelación perfil 1, condición global, condiciones iniciales, iguales radios y cuadrícula.

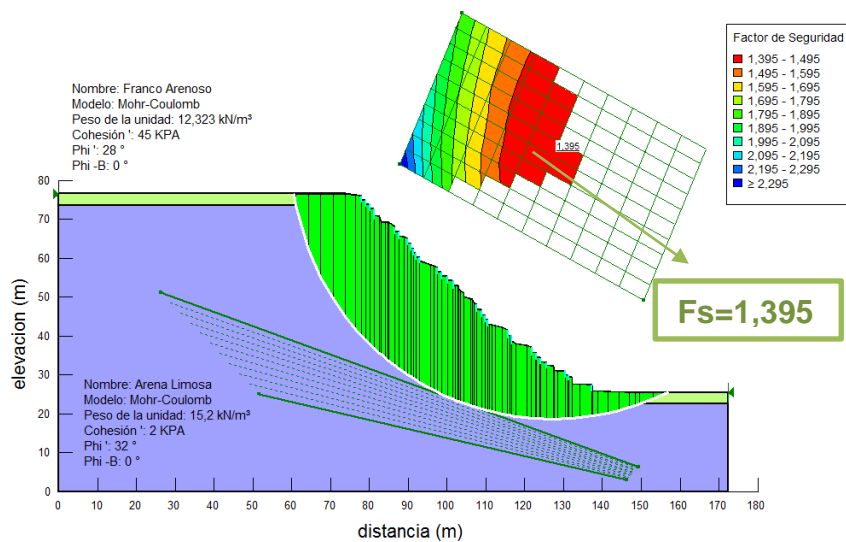


Figura 37. Modelación perfil 1, condición global, con Bioingeniería, iguales radios y cuadrícula.

En la Figura 36 y Figura 37 se pueden apreciar las modelaciones realizadas en el perfil global obteniendo un valor de $Fs=1,386$, según radios y cuadrícula seleccionada, para las condiciones globales iniciales y un valor de $Fs=1,395$ después de la implementación de obras de bioingeniería, representando un incremento del 0.65%, un valor bajo, sin embargo se debe tener en cuenta que es un talud de 51m de altura y la superficie crítica de falla analizada presenta una profundidad de 35m aproximadamente, donde no llega la influencia de las plantas utilizadas en el proceso de revegetalización del talud, es decir que el efecto del amarre de las raíces y el aumento en la cohesión no alcanza a afectar dichas zonas profundas del talud.

Condiciones Locales

Inicialmente se estudió la parte alta del talud, luego la media y finalmente la baja, obteniendo resultados significativos con la implementación de la Bioingeniería.

Condición Local Parte Superior

La condición local en la parte alta presenta una profundidad de la superficie crítica de deslizamiento de 5 m para las condiciones iniciales y de 5m con las obras de bioingeniería para la misma ubicación de los radios y cuadrícula.

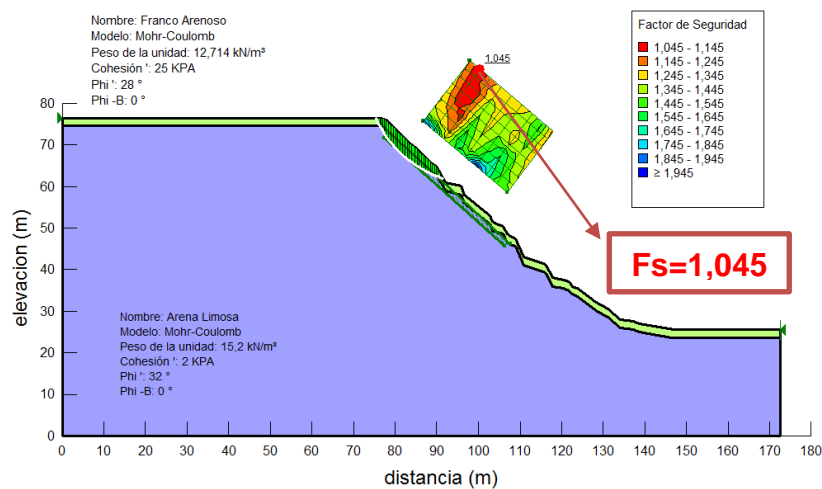


Figura 38. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte superior, mismos radios y cuadrícula.

La modelación del talud para las condiciones iniciales presenta un valor de $Fs=1.045$, como se observa en Figura 38, lo que indica que el talud se encontraba prácticamente en las condiciones mínimas posibles de estabilidad, donde la sumatorias de momentos desestabilizantes son iguales a los de resistencia, por lo que una mínima modificación en estas pudo resultar en un deslizamiento superficial causando graves daños en las viviendas de la zona inferior del talud.

Con la implementación de las obras de bioingeniería se obtuvo un valor de $Fs=1,582$, como se aprecia en la Figura 39, lo que indica un incremento del 51,39%, muy significativo, aumentando las fuerzas de resistencia de la zona hasta el punto de cumplir con la NRS (Norma Sismo Resistente 10, Título H) de estudios geotécnicos, donde se establece un valor mínimo de 1,5 para taludes en condición estática.

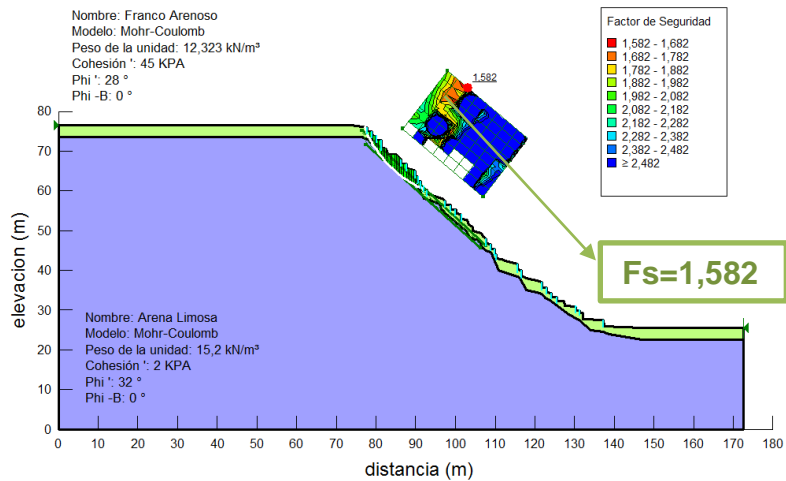


Figura 39. Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte superior, mismos radios y cuadrícula.

Condición Local Parte Media

La superficie crítica seleccionada en la parte media del perfil, presenta una profundidad de 5m, antes y después de la implementación de obras de bioingeniería con los mismos radios y cuadrícula.

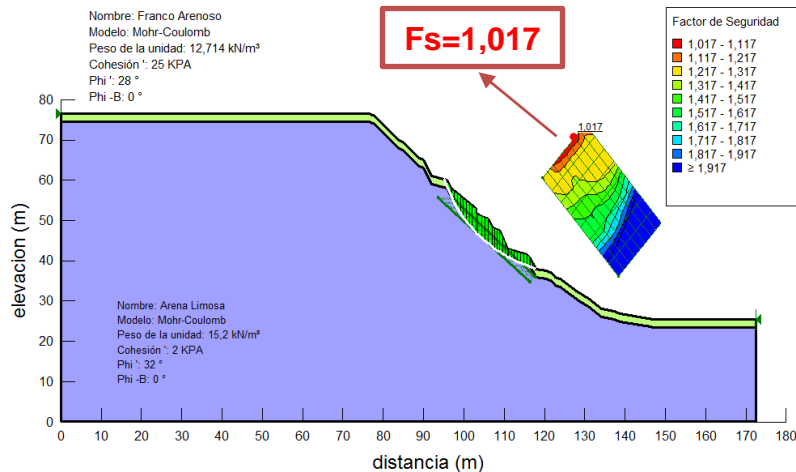


Figura 40. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.

La superficie media del talud presenta un resultado del $Fs=1,017$, como se puede apreciar en la Figura 40, en la zona más crítica, lo que indicó al igual que la parte superior la inestabilidad y urgencia de intervención de dicha zona del talud; gracias a las obras de bioingeniería se logró un valor de $Fs= 1,568$, según se observa en la Figura 41, lo que indica un incremento del 54,18%, bastante importante, ya que logra la estabilidad según requerimientos establecidos por la NRS.

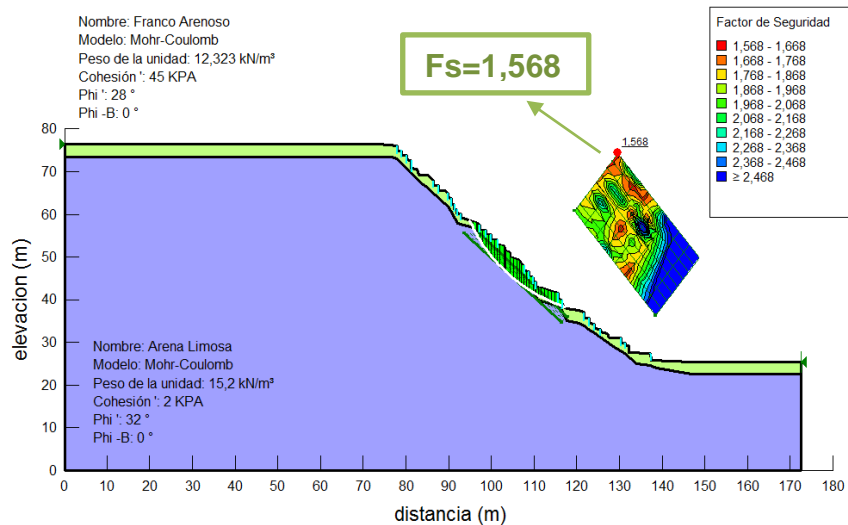


Figura 41. Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte media, mismos radios y cuadrícula.

Condición Local Parte Baja

En la Figura 42 se tiene la modelación de la condición local de la parte baja, presentando una profundidad de la superficie crítica de falla de 7m y un $Fs=1,692$

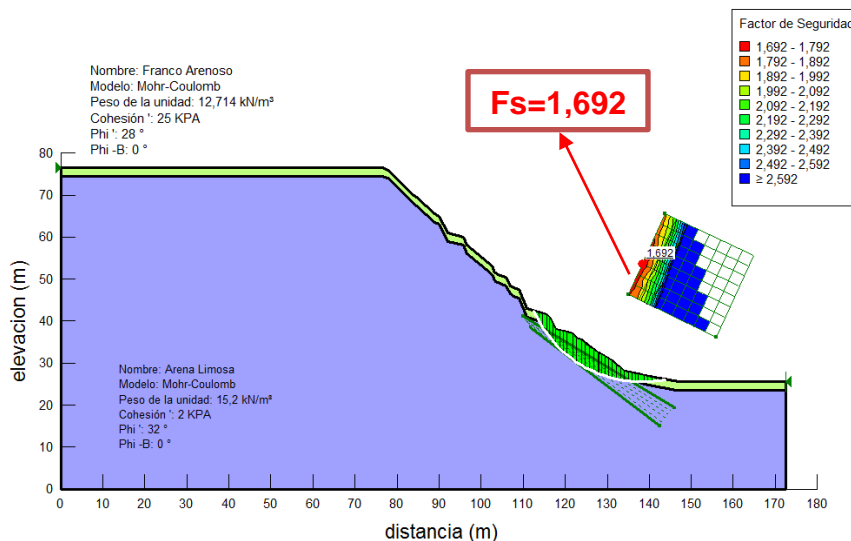


Figura 42. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte baja, mismos radios y cuadrícula.

Según lo establecido en la NRS la zona es estable, sin embargo se intervino, lo que ayuda a incrementar la seguridad en la parte superficial al ser inestable las condiciones globales, obteniendo un valor de $Fs=2,013$, según se observa en la

Figura 43, es decir un incremento del 18,97%, relativamente bajo en comparación a lo encontrado en las condiciones locales de la parte alta y media.

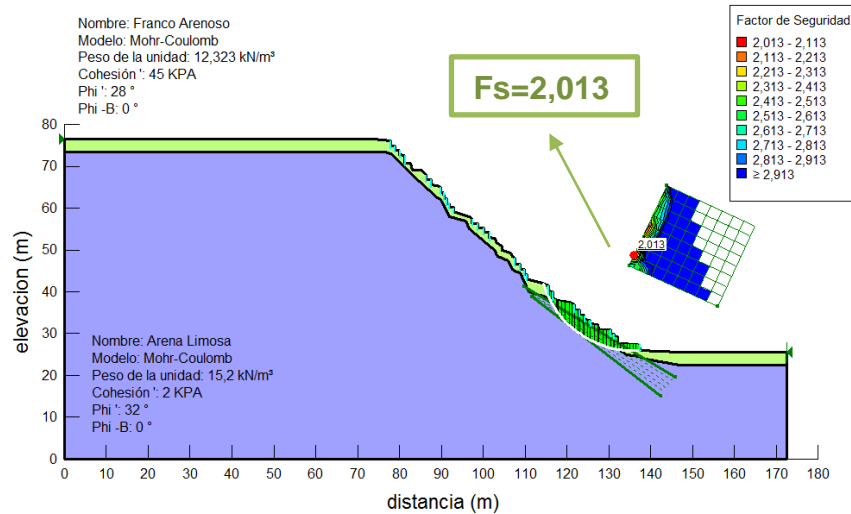


Figura 43. Modelación perfil 1, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.

El círculo crítico de falla obtenido después de la implementación de las obras de bioingeniería es diferente al de las condiciones iniciales, lo cual no permite evaluar el cambio exacto en el perfil antes y después de la implementación de estas en un mismo lugar, por lo que se realizó nuevamente la modelación obteniendo idénticos círculos de falla con una profundidad de la superficies de deslizamiento de 5 m en la parte más profunda, como se puede apreciar en las figuras 44 y 45.

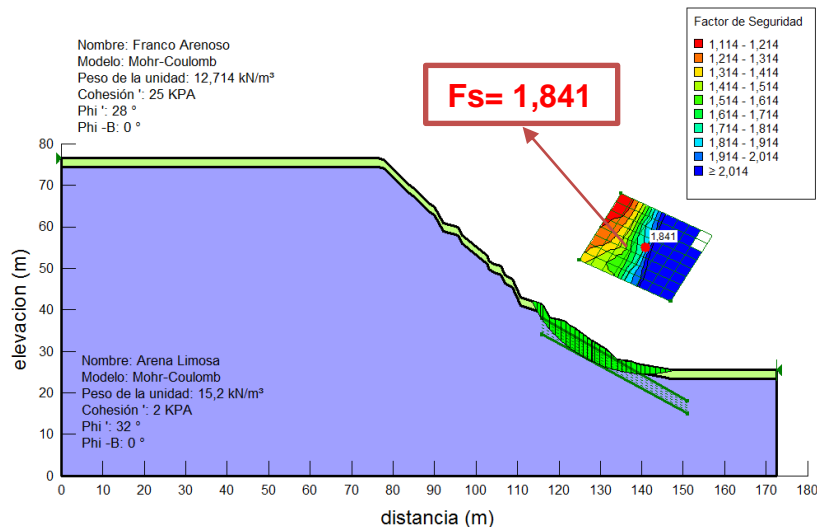


Figura 44: Modelación perfil N°1, condición local inicial, parte baja, igual circulo de falla

Para la condición inicial se obtuvo un valor de $Fs=1,841$ y con la implementación de las obras de bioingeniería un valor de $2,672$ como se ve en la Figura 45, obteniendo un incremento del $45,1\%$, muy significativo que además es similar al obtenido en la parte alta y baja, siendo este más representativo del efecto en la estabilidad causado por la implementación de las obras.

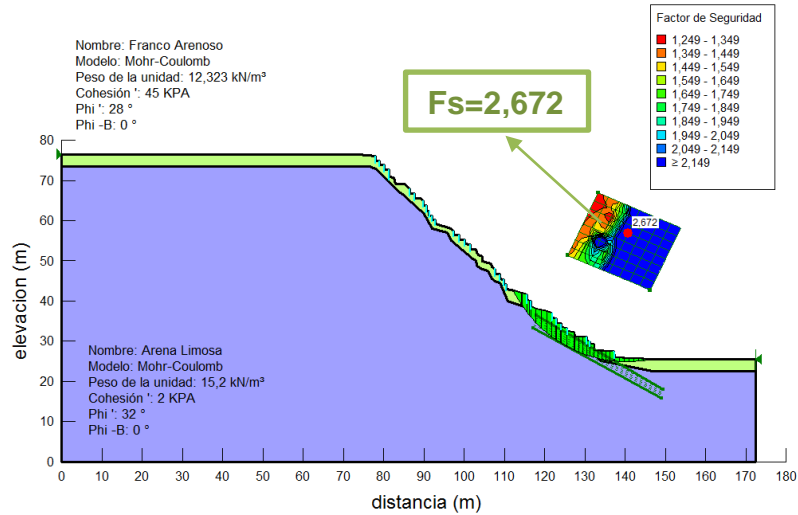


Figura 45: Modelación perfil 1, condición local con Bioingeniería, parte baja, igual círculo de falla.

6.2.2 PERFIL N°2: Parte media del polígono de intervención.

Este perfil presenta una altura de 59m y una distancia horizontal de 129,7m. Se realizaron modelaciones solo para iguales radios y cuadrícula de la superficie de falla debido a que los círculos de falla obtenidos en estas condiciones son iguales antes y después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Condición Global

Al modelar las condiciones globales del perfil 2, se obtiene un valor de $Fs=1,340$ en las condiciones iniciales como se aprecia en la Figura 46 y de $1,368$, según se observa en la figura 47 después de la implementación de las obras de bioingeniería, un incremento del $2,1\%$.

El incremento en el Fs es un poco mayor en comparación al del perfil 1, resultado de la profundidad de la superficie crítica de falla ya que en el perfil 2 es de 30m y la del perfil 1 de 35m, y el aumento en el Fs disminuye con la profundidad.

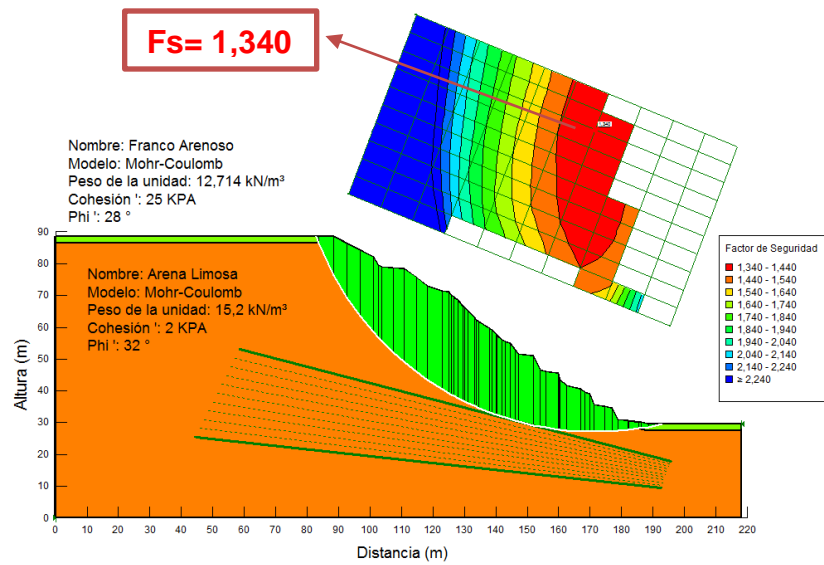


Figura 46. Modelación perfil 2, condición global, condiciones iniciales, mismos radios y cuadrícula.

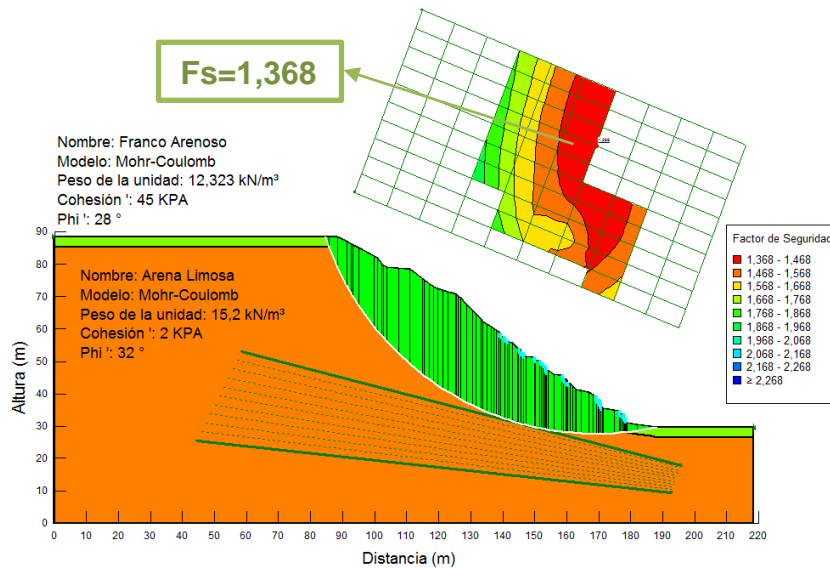


Figura 47. Modelación perfil 2, condición global, con Bioingeniería, mismos radios y cuadrícula.

Condiciones Locales

Condición Local Parte Superior

La condición local en la parte alta del perfil tiene una profundidad de la superficie crítica de deslizamiento de 10 m antes y después de las obras de bioingeniería para la misma ubicación de los radios y cuadrícula.

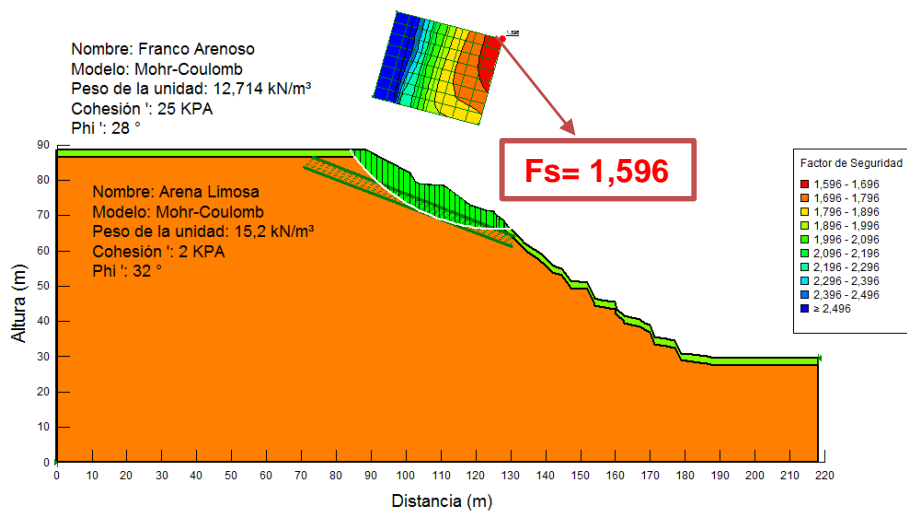


Figura 48. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte superior, mismos radios y cuadrícula.

La modelación de la parte alta del perfil presenta un valor de $F_s=1,596$ en las condiciones iniciales y de 1,702 después de la bioingeniería, un incremento del 6,6% el cual es muy bajo comparado con las condiciones locales del perfil 1, generado por la no construcción de estructuras de contención como los trinchos de estabilización, además de no remover suelo ni mejorar la geometría del mismo, por lo que su efecto directo es el incremento en la cohesión (C) generado por las raíces de las plantas, además de que las superficie de falla es más profunda.

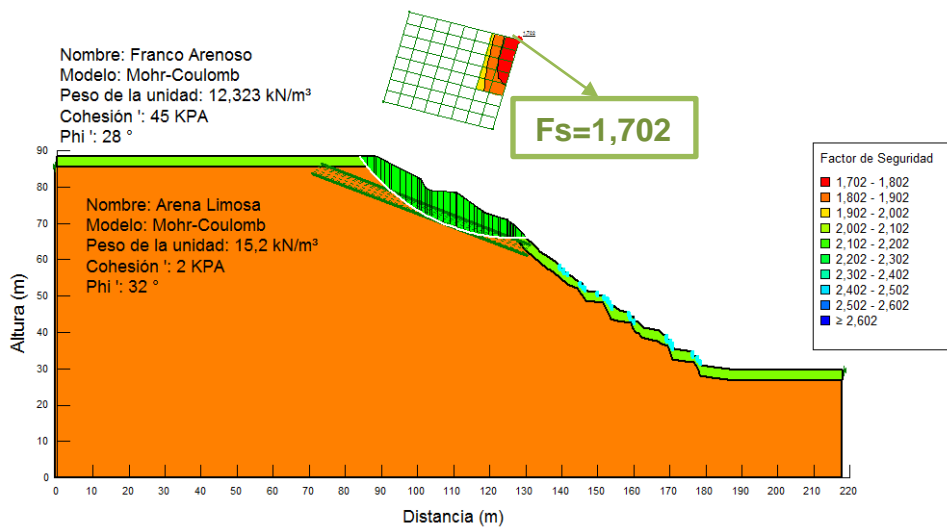


Figura 49. Modelación perfil 2, condición local con bioingeniería, parte superior, mismos radios y cuadrícula.

Condición Local Parte Media

Se tomó una profundidad de la superficie de deslizamiento de 4m en la parte más profunda del círculo de falla, como se ve en las figuras 50 y 51. La condición inicial superficial presenta un $F_s=1,125$; con la implementación de las obras de bioingeniería el sector presentó un aumento en su estabilidad muy considerable, ya que se obtuvo un valor de $F_s=1,611$, por encima de 1,5 como se puede apreciar en la Figura 51, mostrando un incremento del 43,2%

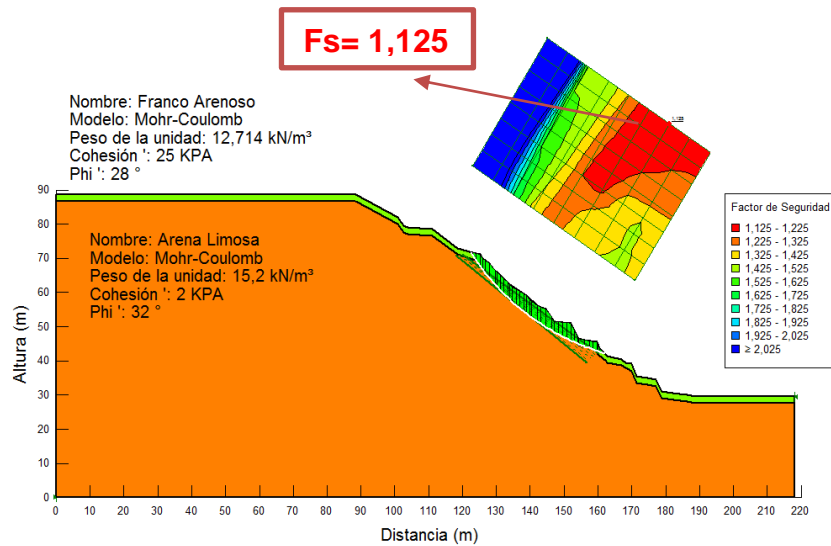


Figura 50. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte media, mismos radios y cuadrícula.

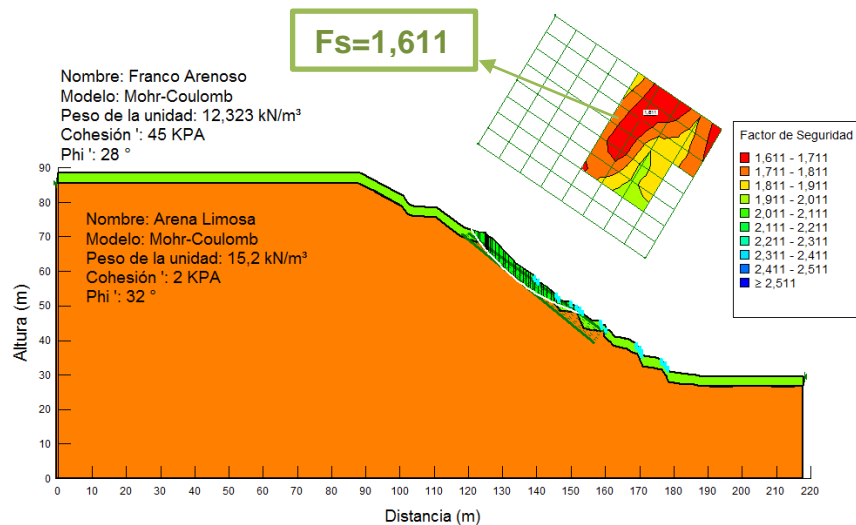


Figura 51. Modelación perfil 2, condición local con Bioingeniería, parte media, mismos radios y cuadrícula.

Condición Local Parte Baja

En la Figura 52 se tiene la modelación de la condición local de la parte baja, presentando una profundidad de la superficie crítica de falla de 6m y un $F_s=1,430$ antes de la implementación de las obras de bioingeniería.

Después de la bioingeniería se tiene un $F_s=1,653$, como se puede apreciar en la Figura 53 lo que representa un incremento del 15,6%, un poco menor al obtenido en la parte media, derivado de la longitud del círculo de falla el cual abarca un número bajo de obras de bioingeniería mostrando el efecto importante de la longitud y profundidad de los círculos de falla en el valor de F_s .

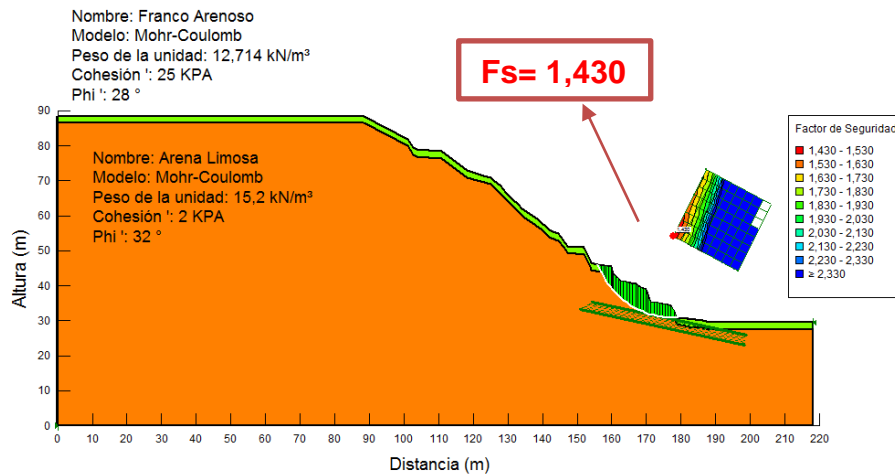


Figura 52. Modelación perfil 2, condición local inicial, parte baja, mismos radios y cuadrícula.

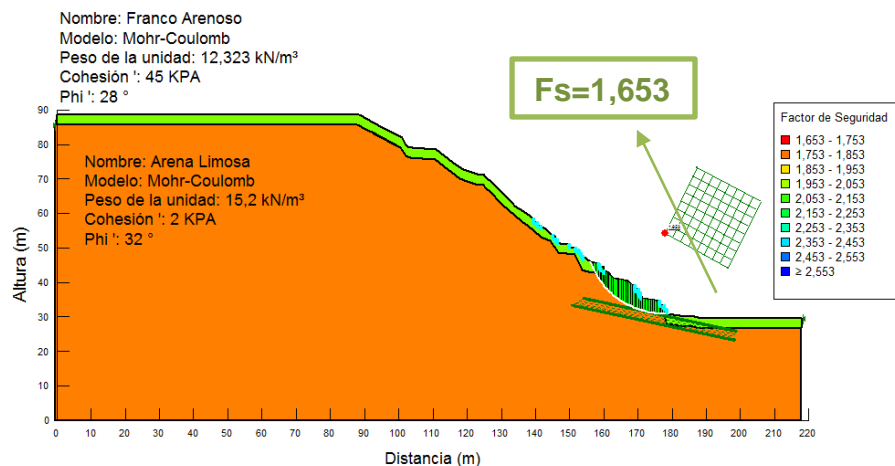


Figura 53. Modelación perfil 2, condición local con Bioingeniería, parte baja, mismos radios y cuadrícula.

6.2.3 PERFIL N°3: Parte derecha del polígono de intervención.

Este perfil presenta una altura de 47,5m, una distancia horizontal de 130,4m, siendo este el más bajo de los tres perfiles.

Condición Global

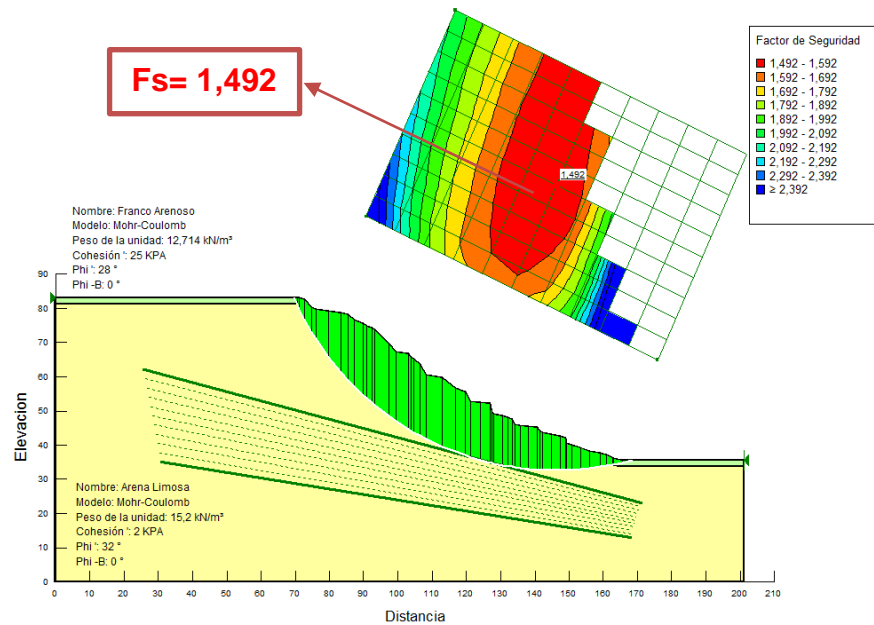


Figura 54. Modelación perfil 3 global, condiciones iniciales, radios y cuadrícula iguales

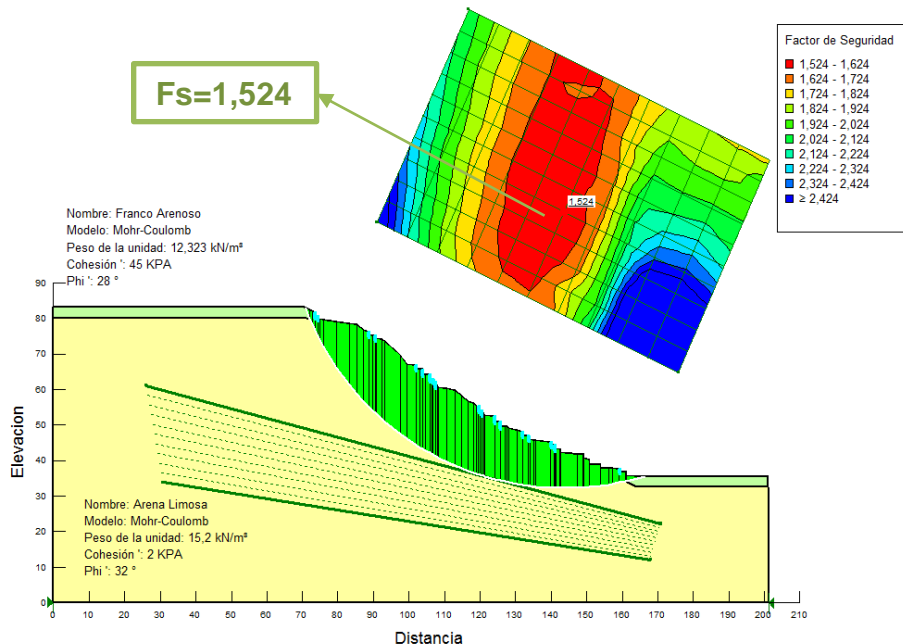


Figura 55. Modelación perfil 3 global, con Bioingeniería, radios y cuadrícula iguales

Se obtuvo un valor de $F_s=1,492$ en las condiciones iniciales como se aprecia en la Figura 54 y de 1,524, según se observa en la Figura 55, después de la implementación de las obras de bioingeniería, un incremento del 2%, que contribuye al logro de la estabilidad del talud mediante lo establecido en la Norma Sismoresistente (NSR 10).

Condiciones Locales

Las modelaciones realizadas para iguales radios y cuadrícula de la superficie de falla presentaron diferencias en los círculos críticos de falla obtenidos, por lo que se realizó la modelación para las tres condiciones locales con iguales círculos de falla sin tener en cuenta que no fuera la más crítica.

Condición Local Parte Alta

Las modelaciones realizadas se pueden apreciar en las figuras Figura 56 y Figura 57.

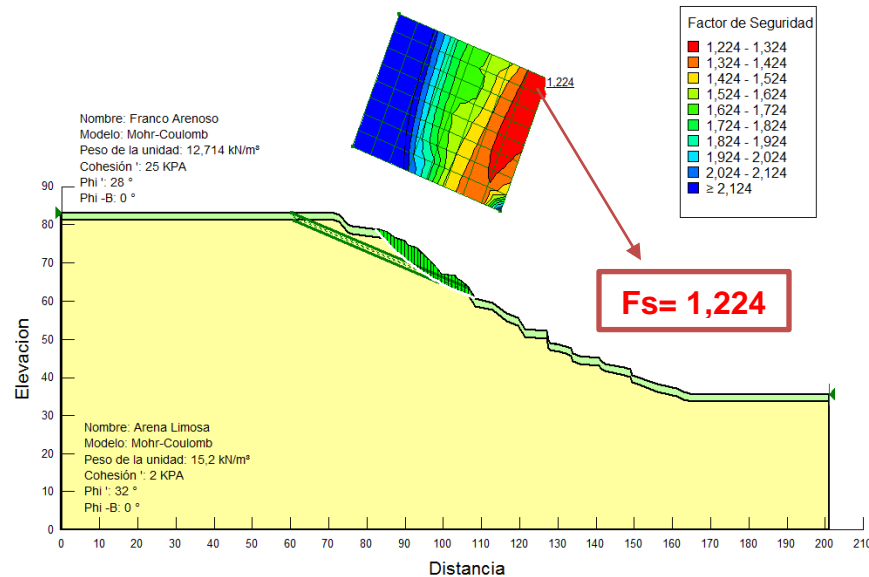


Figura 56. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte alta, igual radio y cuadrícula.

Para la condición inicial se obtuvo un valor de $F_s=1,224$ y con la implementación de las obras de bioingeniería un valor de 1,808, obteniendo un incremento del 41,7%, muy significativo que contribuye al cumplimiento del criterio de estabilidad, sin embargo los círculos de falla obtenidos difieren en la profundidad ya que después de la bioingeniería se obtiene un círculo crítico de falla más profundo como se aprecia en la Figura 57, por lo que se realiza nuevamente la modelación con iguales círculos de falla, obteniendo un valor de $F_s=1,479$ en las condiciones

iniciales y de 2,091 después de la implementación de las obras, como se puede ver en las figuras 58 y 59, lo que equivale a un incremento del 41,4%.

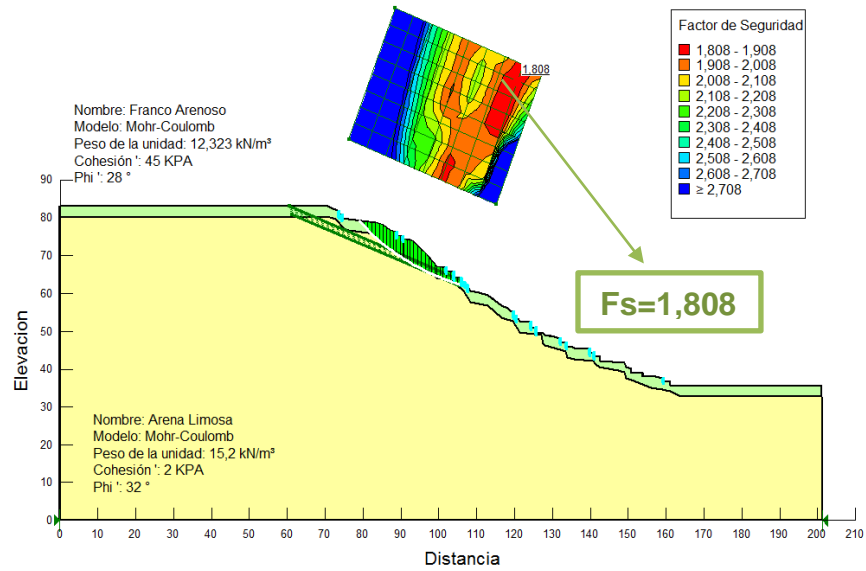


Figura 57. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte alta, igual radio y cuadrícula.

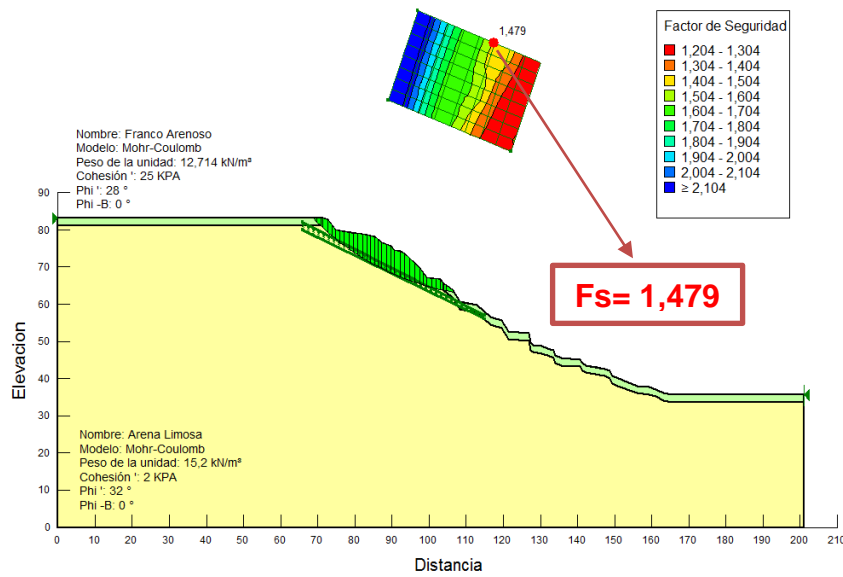


Figura 58. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte superior, igual circulo de falla

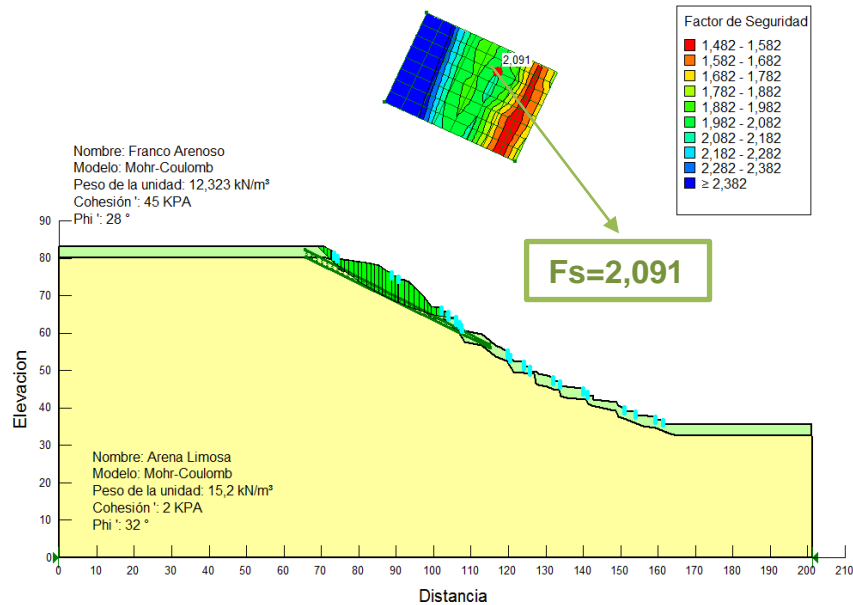


Figura 59. Modelación perfil 3, condición local con Bioingeniería, parte superior, igual círculo de falla

Condición Local Parte Media

En la modelación obtenida para la condiciones iniciales se tuvo un valor de $Fs=1,462$ y después de la implementación de las obras de bioingeniería un valor de 1,606, obteniendo un incremento de 9,9%, bajo en comparación a lo esperado; sin embargo similar a lo ocurrido en la parte baja del perfil 1, no se considera representativo del efecto de la bioingeniería ya que como se aprecia en las figuras 60 y 61, los círculos de falla difieren en la profundidad y la longitud.

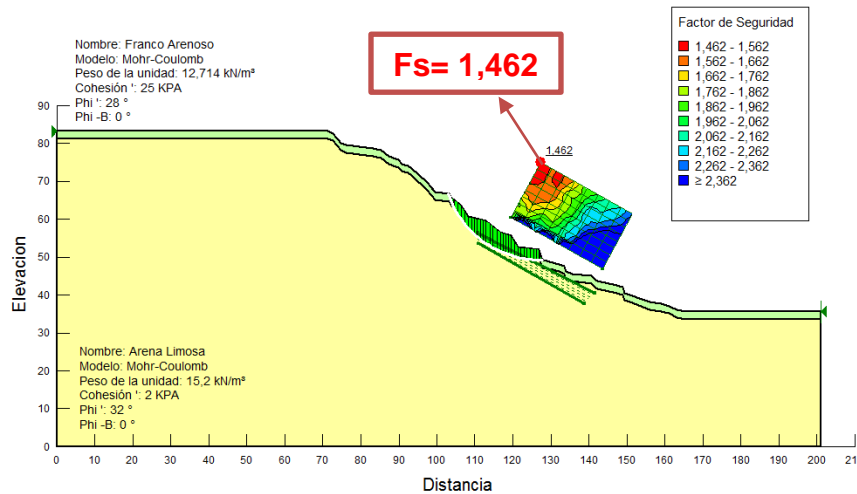


Figura 60. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte media, igual radio y cuadrícula.

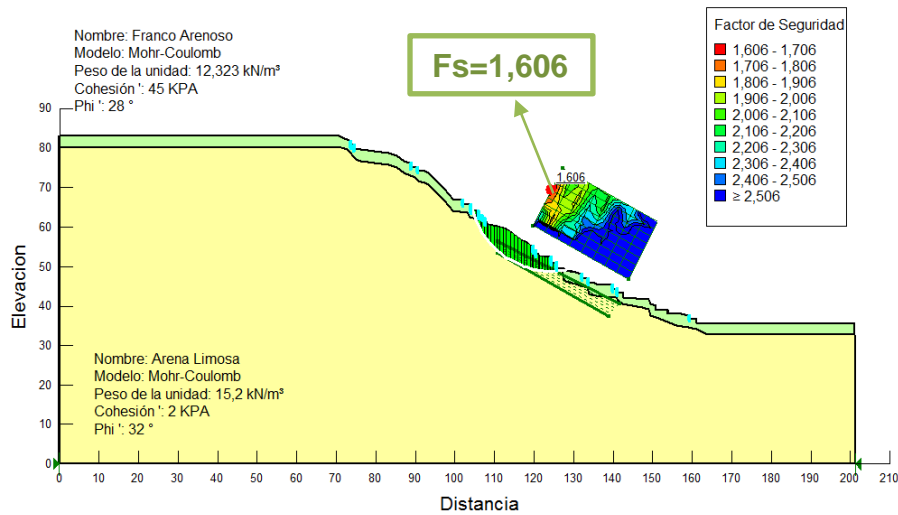


Figura 61. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte media, igual radio y cuadrícula.

Con iguales círculos de falla se obtiene un incremento del 36,5%, para superficies de 5 m de profundidad y que a su vez comprenden mayor cantidad de obras de bioingeniería, como se ve en las figuras 62 y 63.

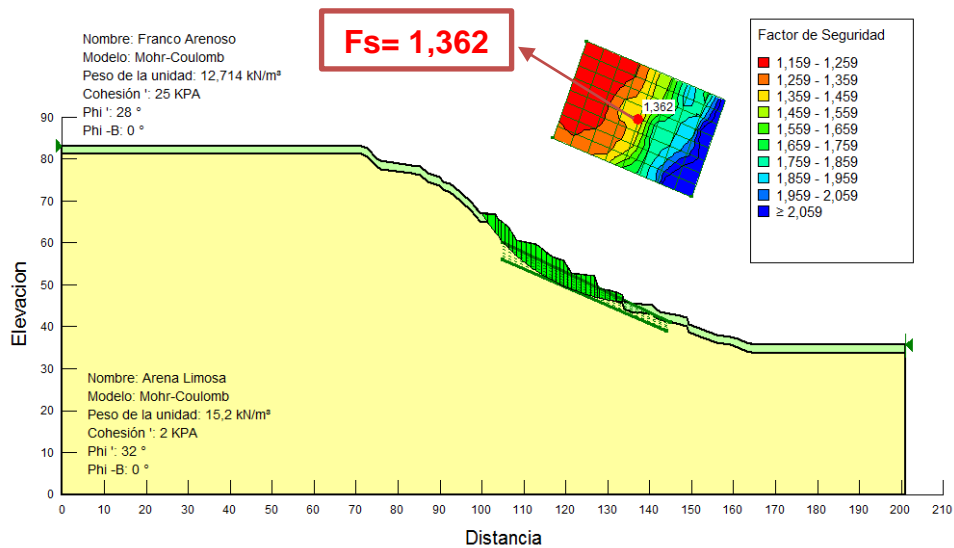


Figura 62. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte media, iguales círculos de falla

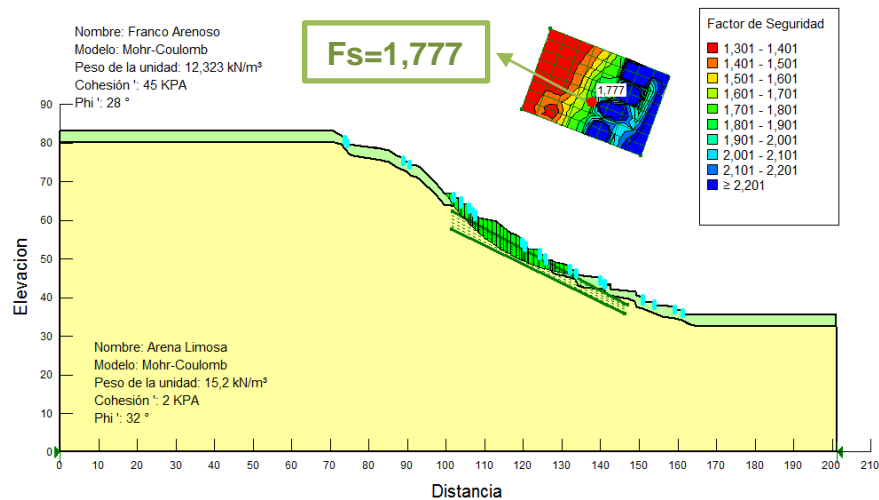


Figura 63. Modelación perfil 3, condición local con Bioingeniería, parte media, iguales círculos de falla

Condición Local Parte Baja

En condiciones iniciales se obtuvo un valor de $F_s=2,438$ y después de las obras de bioingeniería de 3,568, para iguales radios y cuadrícula de la zona de deslizamiento, lo que equivale a un incremento del 46,4%, el cual se encuentra dentro del rango de los otros incrementos encontrados en otros sectores locales del talud, sin embargo los círculos de falla difieren por lo que se realiza nuevamente la modelación para iguales círculos de falla, obteniendo un incremento de 47,7%.

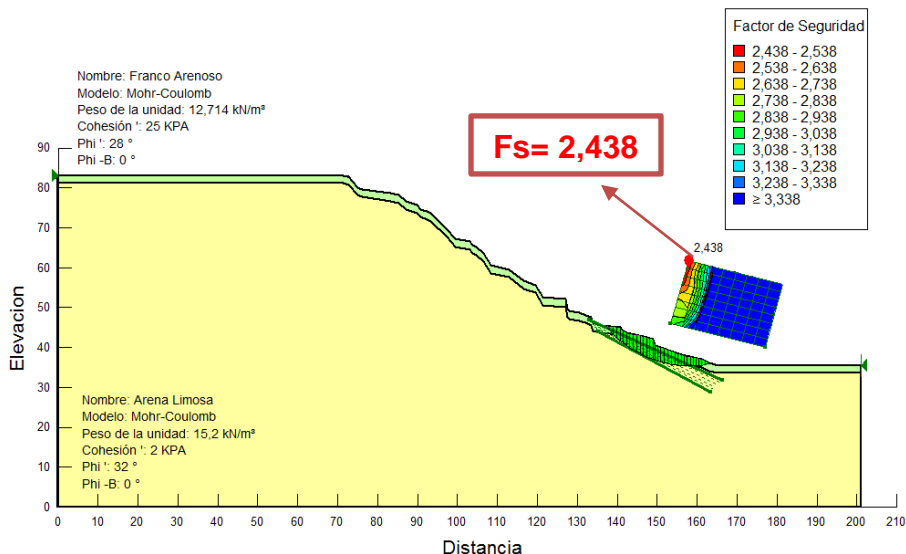


Figura 64. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte baja, igual radio y cuadrícula.

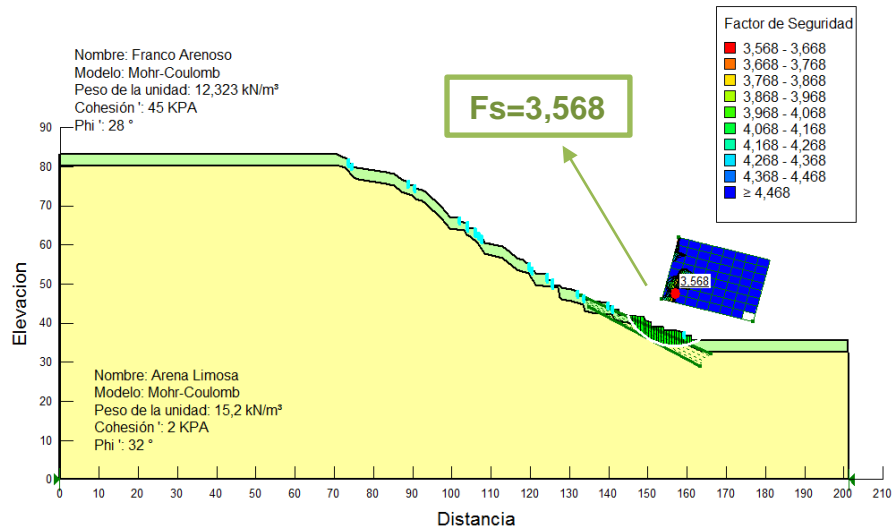


Figura 65. Modelación perfil 3, condición local con bioingeniería, parte baja, igual radio y cuadrícula.

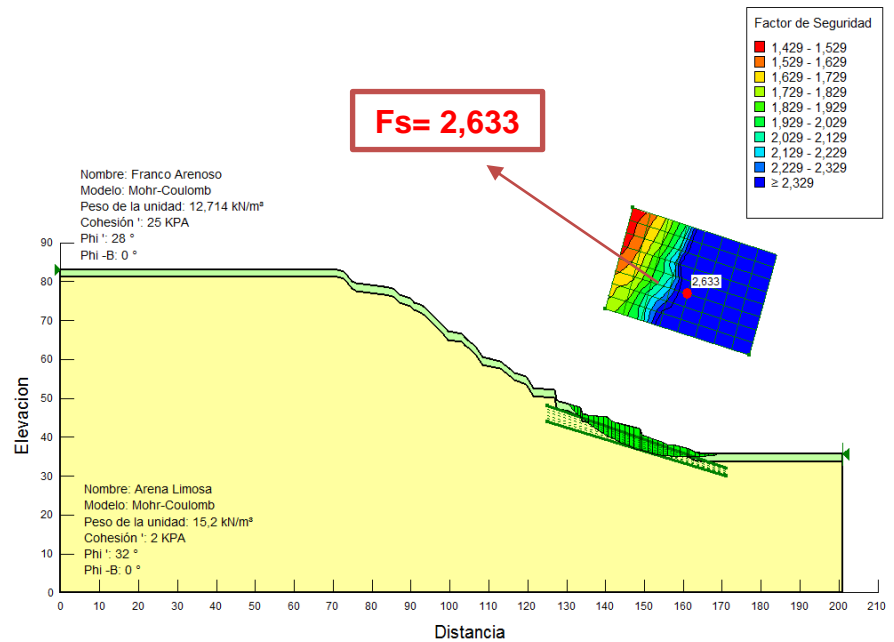


Figura 66. Modelación perfil 3, condición local inicial, parte baja, iguales círculos de falla

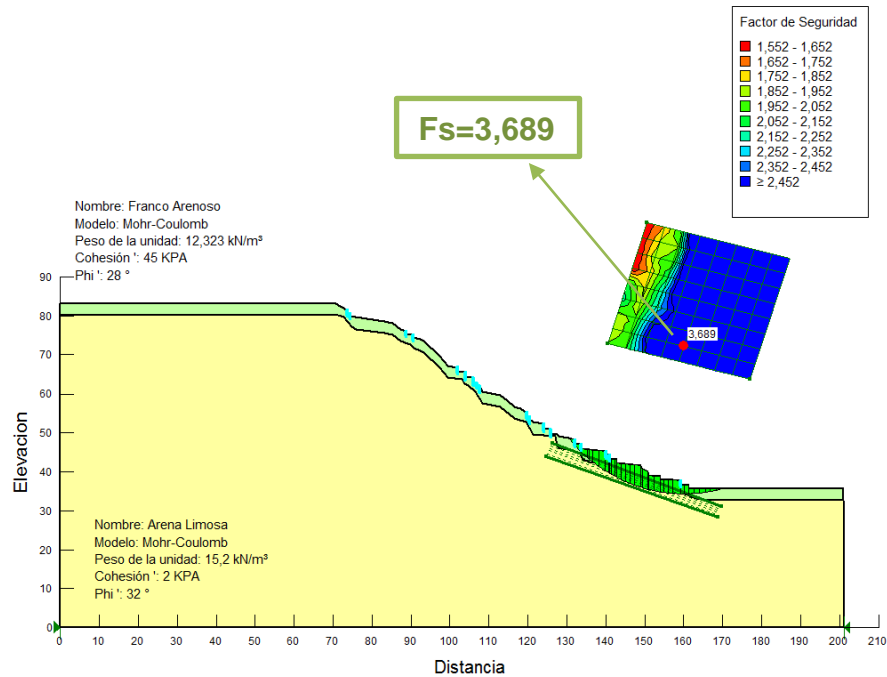
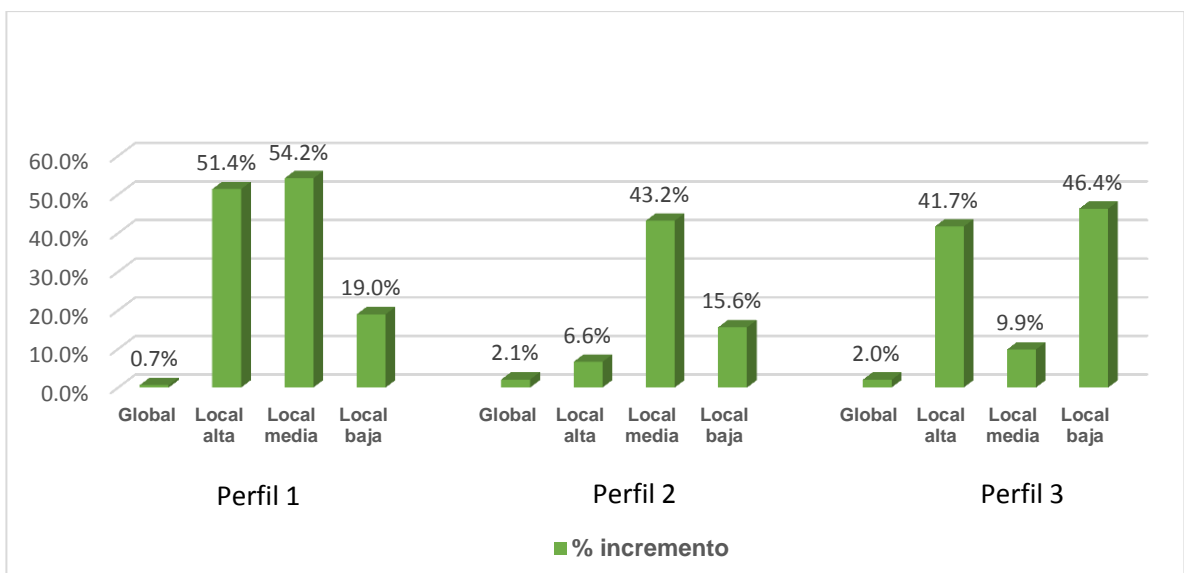
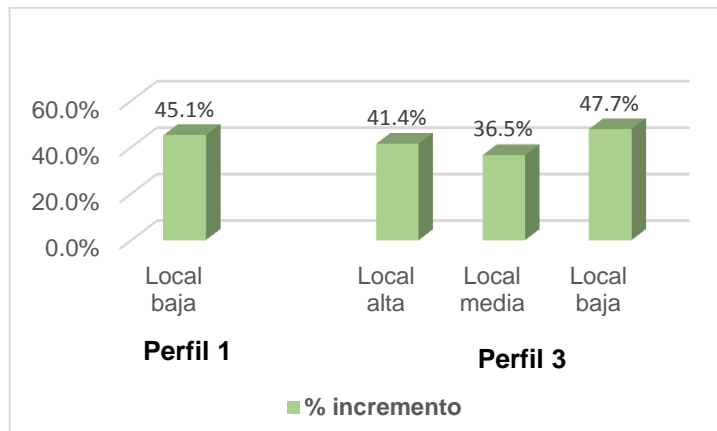


Figura 67. Modelación perfil 3, Condición local con Bioingeniería, parte baja, iguales círculos de falla.

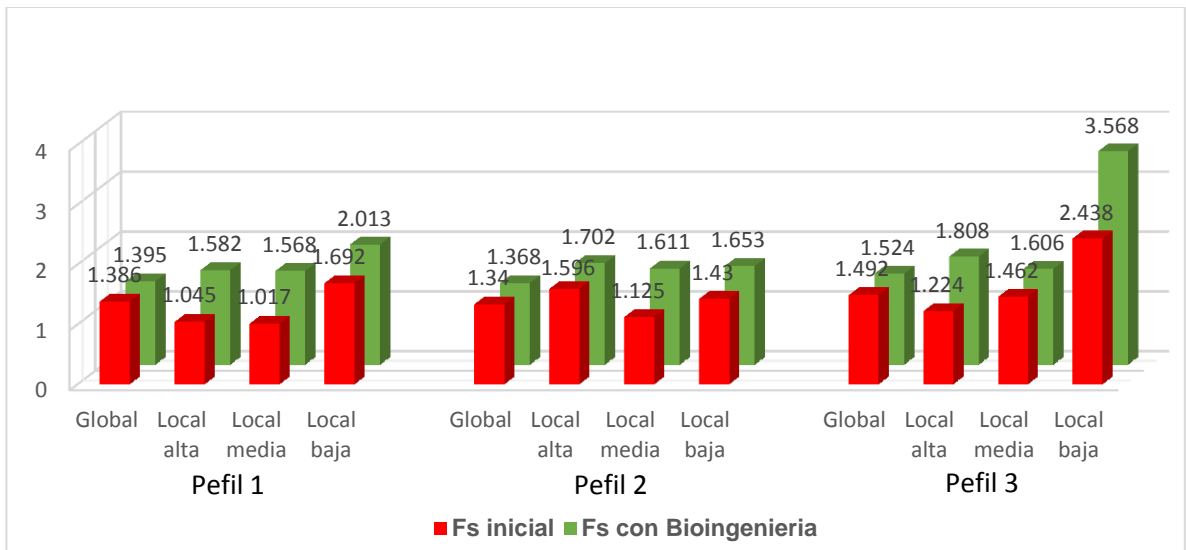
El resumen de los incrementos en porcentaje del Fs obtenidos con la implementación de obras de bioingeniería en el talud de Cordillera Sur para radios y cuadrículas, y círculos de falla exactos, se presentan en las gráficas 8 y 9 respectivamente y los resultados tanto para las condiciones iniciales como después de la bioingeniería en las gráficas 10 y 11.



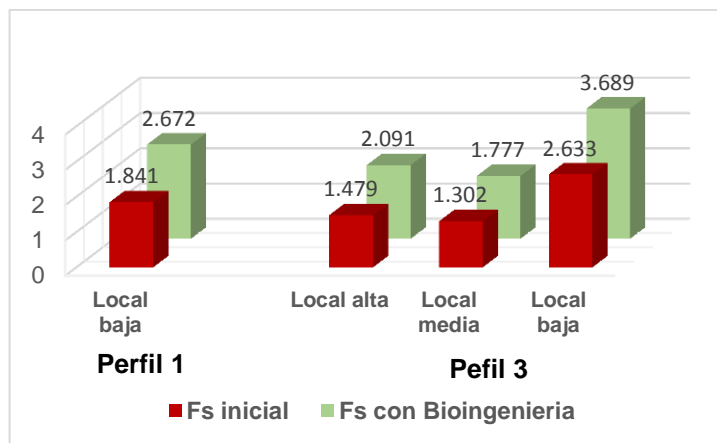
Gráfica 8. Incrementos en porcentaje (%) del Fs con iguales radios y cuadrícula de la superficie de deslizamiento.



Gráfica 9. Incrementos en porcentaje (%) del Fs con iguales círculos de falla



Gráfica 10: Fs antes y después de la implementación de obras de Bioingeniería, radios y cuadrícula iguales.



Gráfica 11: Fs antes y después de la implementación de obras de Bioingeniería, círculos de falla iguales

Cabe destacar que los resultados de Fs varían de un lugar a otro del talud, ya que dependiendo del modelo que se utilice, el tipo de suelo, la pendiente, las condiciones climáticas y la vegetación el Fs cambia. Por su parte Suarez (2009), afirma que generalmente se obtienen aumentos inferiores al 30% para casos normales de vegetación densa y superficies de falla de hasta 2m de profundidad, sin embargo estudios realizados en taludes de poca altura, como los llevados a cabo por Greenway (1997) y Yagi y acompañantes (1994), citados por Suarez (2009), reportaron un aumento del 33%, para el primero, en un talud con árboles de aproximadamente 10 m de altura, 3 m de profundidad de sus raíces y una profundización de la superficie crítica de falla de 2,5 m; los segundos, para dos casos presentaron un aumento de 10 a 13,5% para niveles altos de densidad de vegetación y fallas de poca profundidad. Por su parte Morgan y Rickson (1995) y Barrera (2003), citados por ECOAMBIENTES (1999), demostraron un aumento del 55% y 30%, respectivamente, del factor de seguridad con la influencia del sistema radical de las plantas, y Rivera (2008), citado por Sánchez (2015), demostró un incremento del 54,9%.

CONCLUSIONES

Los registros fotográficos permitieron demostrar el proceso de restauración y estabilización del terreno mediante una mejora en la geometría del talud, controlando las pendientes y generando un mejor sostenimiento del empuje del suelo, además de un embellecimiento paisajístico.

La vegetación se comporta como un manto protector de las capas más profundas del talud y a su vez genera un refuerzo mecánico en el suelo, incrementando la cohesión y el Factor de seguridad.

La hidrología del talud no fue considerada en el estudio, lo que contribuye a posibles subvaloraciones del efecto de la bioingeniería en el talud, teniendo en cuenta su efecto positivo en la presión de poros generada por la presencia de agua y la influencia de la vegetación en la misma.

El estudio estadístico realizado para la pruebas físicas de suelo indica que aunque algunas no tuvieron una diferencia estadísticamente significativa entre un antes y un después de la implementación de las obras, demuestran una mejora en las condiciones de estabilidad de la capa superficial del talud teniendo en cuenta el corto tiempo de evaluación.

Cuando las diferentes especies vegetativas implementadas alcancen su máximo desarrollo, los parámetros físicos evaluados presentaran un cambio de mayor magnitud con respecto a las condiciones iniciales hasta alcanzar un equilibrio, donde es probable que la diferencia se vuelva estadísticamente significativa.

La modelación realizada es muy estimativa, al no considerar puntualmente el tipo de vegetación y el tipo de raíces, parámetros muy importantes para obtener un valor más real en cuanto al incremento de la cohesión.

El incremento en el Factor de seguridad dado por la implementación de las obras de bioingeniería varía de acuerdo a la cantidad de estas, a la profundidad y longitud del círculo de falla, de la extracción de suelo o disminución en la masa del talud y de los parámetros de resistencia y peso unitario.

A pesar de las variaciones de cada caso en particular en los tres perfiles analizados con sus correspondientes zonas (alta, media y baja) se obtuvieron incrementos en el F_s que permitieron pasar de condiciones inestables a condiciones estables de acuerdo a la norma sismo resistente, demostrando un efecto muy significativo en la bioingeniería.

La bioingeniería aunque no afecta de manera significativa la masa global del talud, actúa de manera considerable en la parte superficial del mismo contribuyendo a su estabilidad y a la vez protegiendo las capas más profundas de quedar expuestas a futuros procesos de erosión y remoción en masa.

El cumplimiento de los tres objetivos planteados permite demostrar la efectividad de las obras de bioingeniería implementadas en la estabilización y restauración del talud en el polígono de estudio.

RECOMENDACIONES

Se sugiere en próximas investigaciones realizar el estudio del comportamiento de las diferentes especies implementadas, y sus implicaciones en la calidad del suelo y en las obras de bioingeniería.

Se aconseja realizar las pruebas físicas en un mayor periodo de tiempo cuando las raíces de las especies implementadas hayan llegado a su máximo desarrollo para demostrar cambios más significativos en la mejora de la estructura del suelo y la estabilidad del talud.

Realizar estudios que permitan obtener valores de los parámetros de resistencia propios del talud de Cordillera Sur con el fin de obtener menor incertidumbre en los valores de F_s .

Realizar el estudio hidrológico que permita evidenciar la funcionalidad de los diferentes drenajes instaurados dentro de las obras de bioingeniería.

Se recomienda continuar con el estudio a largo plazo en diferentes periodos, con el fin reportar en la literatura la mayor cantidad de resultados que evidencien y demuestren el éxito de la bioingeniería en Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, S. d., Alcázar Torralba, M., Cermeño Martín, F. I., & Barbero Abolafio, F. (2011). Erosión y Manejo del Suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. *Agricultura Ecológica*, 13-38.
- ANDEX. (s.f.). Geomallas. Lima, San Borja, Peru. Obtenido de ANDEX: <http://www.andex.com.pe/web/productos/geomallas.html>
- Anstead, L., Boar, R. R., & Tovey, N. K. (2012). The effectiveness of a soil bioengineering solution for river bank stabilisation during flood and drought conditions: two case studies from East Anglia. *Royal Geographical Society*, 479–488.
- Barrera Gutiérrez, J. E., Rivera Posada, J. H., & Cadena Romero, M. E. (2013). Influencia del sistema Radical de Cuatro Especies Vegetales en la Estabilidad de Laderas a Movimientos Masales. *Revista Cenicafè*, 2, 59-77.
- Burylo, M., Hudek, C., & Rey, F. (2010). Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena*, 84, 70-78.
- Burylo, M., Hudek, C., & Rey, F. (2011). Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena*, 70-78.
- Cao, Y., Wang, J., Bai, Z., Zhou, W., Zhao, Z., Ding, X., & Li, Y. (2015). Differentiation and mechanisms on physical properties of reconstructed soils on open-cast mine dump of loess area. *Environmental Earth Sciences*, 6367-6380.
- Cárdenas, E. (s.f.). Trinchos vivos escalonados en vertedero con nacedero.
- Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. *Transactions ASCE*, 901-992.
- Cavallé, P., Ducasse, L., Breton, V., Dommanget, F., Tabacchi, E., & Evette, A. (2015). Functional and taxonomic plant diversity for riverbank protection works: Bioengineering techniques close to natural banks and beyond hard engineering. *Journal of Environmental Management*, 151, 65-75.
- CENICAFE. (2011). Sistemas de Drenaje con Filtros Vivos para la Estabilización y Restauración de Movimientos Masales en Zonas de Ladera. Chinchina, Caldas, Colombia.

- Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos – CEELAT. (2014). *Laboratorio de Mapeo*. Recuperado el 28 de Enero de 2016, de <http://ceelat.org/mapas/amenaza-por-remocion-en-masa-en-colombia/>
- Chang Fan, C., & Feng, S. C. (2008). Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. *Ecological Engineering*, 157–166.
- Comino, E., & Marengo, P. (2010). Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*. Soil reinforcement estimation by laboratory tests. *Catena*, 82, 227-235.
- Convenio-494. (2014). Bogotá.
- Coppin, N., & Stiles, R. (1990). The Use of Vegetation in Slope Stabilization. En B. Clouston, *Landscape Design with Plants* (Segunda ed., págs. 212–234). Newnes.
- Correal, J. F., Echeverry, J. S., Ramírez, F., & Yamín, L. E. (2014). La evaluación experimental de las propiedades físicas y mecánicas de los laminada encolada *Guadua angustifolia* Kunth. *Construcción y materiales de construcción*, 105-112.
- Dhital, Y. P., & Tang, Q. (2015). Soil bioengineering application for flood hazard minimization in the foothills of Siwaliks, Nepal. *Ecological Engineering*, 458–462.
- Dhital, Y. P., & Tang, Q. (2015). Soil bioengineering application for flood hazard minimization in the foothills of Siwaliks, Nepal. *Ecological Engineering*, 458–462.
- Docker, B., & Hubble, T. (2008). Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology*, 100, 401–418.
- ECOAMBIENTES. (1999). *La Web De La Bioingeniería Y La Restauración Ecológica*. Recuperado El 27 De 06 De 2016, De Estabilidad De Las Laderas A Los Movimientos Masales: <http://ecoambientes.tripod.com/id10.html>
- Evette, A., Labonne, S. R., Liebault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 972–984.
- Evette, A., Labonne, S., Freddy, R., Liebault, F., Jancke, O., & Jacky, G. (2009). History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. *Environmental Manangement*, 972-984.

- Eyherabide, M., Hsaínz, E., Barbieri, P., & Echeverría, H. (2014). Comparación De Métodos Para Determinar Carbono Orgánico En Suelo. *Ciencia del Suelo*, 13-19.
- Fan, C.-C., & Su, C.-F. (2008). Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. *Ecological Engineering*, 33, 157-166.
- Fernandes, J. P., & Guiomar, N. (2016). Simulating the stabilization effect of soil bioengineering interventions in Mediterranean environments using limit equilibrium stability models and combinations of plant species. *Ecological Engineering*, 122–142.
- Florez, G. d. (2014). Efectividad De La Bioingenieria Para El Tratamiento De La Erosion Y Los Movimientos En Masa En Laderas. Manizales, Caldas, Colombia.
- García, M. A. (14 de Noviembre de 2007). *Zanja de coronacion*. Obtenido de Doble via: <https://doblevia.wordpress.com/2007/10/23/practica-diseno-de-vias-ibague-armenia-pereira-cali/zanja-de-coronacion/>
- Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J., & Mickovski, S. (2008). Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management*, 1517–1526.
- Giadrossicha, F., Cohenc, D., Schwarzd, M., Seddaiua, G., Contranb, N., Lubinob, M., . . . Nieddaa, M. (2016). Modeling bio-engineering traits of *Jatropha curcas* L. *Ecological Engineering*, 40–48.
- Grajales A., B. M., Botero G., M. M., & Ramírez Q., J. F. (2015). Características, manejo, usos y beneficios del saúco (*Sambucus nigra* L.) con énfasis en su implementación en sistemas silvopastoriles del trópico alto. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 155-168.
- Gray, D. H., & Leiser, A. T. (1982). Biotechnical slope protection and erosional control. *Van Nostrand Reinhold*, 271.
- Guohua, W., Wenzhi, Z., Hu, L., Gefei, Z., & Fang, L. (2015). Changes in soil and vegetation with stabilization of dunes in a desert-oasis ecotone. *Ecological Research*, 639-650.
- Herrera Rodríguez, F. (2003). *Introducción A La Estabilidad De Taludes, Vi Curso De Geotecnia*. Zaragoza.

- Hossne, A., Mayorca, Y., Salazar, L., Subero, F., & Zacillo, A. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del. *UDO Agrícola*, 937-950.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2008). *Metodos Analiticos de Auelos, Sexta Edicion*. Bogota, Colombia.
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín.
- Kołodziej, B., Bryk, M., Jurkiewicz, A. S., Otremba, K., & Gilewska, M. (2016). Soil physical properties of agriculturally reclaimed area after lignite mine: A case study from central Poland. *Soil and Tillage Research*, 54–63.
- Kuma Kokutsea, N., Tranquille Temgouaa, A. G., & Kavazovic, Z. (2016). Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects. *Ecological Engineering*, 146-153.
- Lammeranner, W., Rauch, H. P., & Laaha, G. (2005). Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at landslide in the middle mountains of Nepal. *Plant and Soil*, 159-170.
- Li, X., Zhang, L., & Zhang, Z. (2006). Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 304–314.
- Li, X., Zhang, L., & Zhang, Z. (2006). Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 304–314.
- López Pineda, G. (2012). *Introducción Al Uso Del Programa Slope/W Versión 2012-Student*. Cordoba.
- Mickovski, S., Bengough, A., Bransby, M., Davies, M., Hallett, P., & Sonnenberg, R. (2006). The effect of roots on soil reinforcement. *Journal of Biomechanics*, 39, 353.
- Organizacion de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma.
- Pawlik, Ł., Phillips, J. D., & Šamonil, P. (2016). Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes—A critical literature review. *Earth-Science Reviews*, 142–159.

- Polanco Florez, M. (2009). *Principios Basicos de Mecanica de Suelos, Capitulo 11: Resistencia al Corte de los Suelos*. Popayan.
- Polen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 197–205.
- Porta, J., & López Acevedo, M. y. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Preti, F., Dani, A., & Laio, F. (2010). Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecological Engineering*, 305–316.
- Puignau, J. P. (1988). *Dialogo XXIV, Manejo y Conservacion de Suelos*. Montevideo, Uruguay.
- Rivera Posada, J. H. (2001). *Construcción de trinchos vivos para conducción de aguas de escorrentía en zonas tropicales de ladera*. Manizales.
- Rivera Posada, J. H. (2008). *Experiencias de Casos Exitosos con el uso de la Bioingeniería en el control de problemas de Erosión y Movimientos Masales*. Manizales.
- Rivera Posada, J. H. (2011). *Sistemas de drenaje con filtros vivos para la estabilización y restauración de movimientos masales en zonas de ladera. Avances Técnicos Cenicafé*.
- Rivera Posada, J. H. (2015). *Experiencias Practicas En Manejo De Margenes Y Socavaciones De Cauces En Drenajes Naturales Con Técnicas De Bioingeniería. II Seminario de Bioingeniería: Experiencias de Adaptacion Social y Territorial Frente a los Riesgos y el Cambio Climatico*. Bogota.
- Romero, M. P., Santamaría, D. M., & Zafra, C. A. (2009). Bioingeniería y Suelo: Abundancia Microbiológica, pH y Conductividad Eléctrica Bajo tres Estratos de Erosión. *Umbral Científico*(15), 67-74.
- Romero, M. P., Santamaría, D. M., & Zafra, C. A. (2009). Bioingeniería Y Suelo: Abundancia Microbiológica, Ph Y Conductividad Eléctrica Bajo Tres Estratos De Erosión. *Umbral Científico*, 67-74.
- Rubio Gutiérrez, A. M. (2010). *La Densidad Aparente En Suelos Forestales Del Parque Natural Los Alcornocales, Tesis De Grado, Escuela Universitaria De Ingeniería Técnica Agrícola, Universidad De Sevilla*. Sevilla.

- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo, Uruguay.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo: Facultad de Agronomía Universidad de la República.
- Salazar Gutiérrez, L. F., & Hincapié Gómez, E. (2015). Tratamientos biológicos para la mitigación de movimientos en masa en la zona cafetera central. *Cenicafé*.
- Sanchez Zapata, F. (2015). Validación De La Contribución De Las Obras De Bioingeniería A La Estabilidad De Taludes Y Laderas En Terrenos Montañosos Afectados (Amenaza) O No (Susceptibilidad) Por Procesos Denudativos – Convenio Universidad De Caldas Car Cundinamarca. // *Seminario de Bioingeniería: Experiencias de Adaptación Social y Territorial Frente a los Riesgos y el Cambio Climático*. Bogota.
- Scalone Echave, M. A. (2008). *Propiedades Fisicoquímicas de los Suelos*.
- Serrato Suarez, J. A. (2015). Manejo de Riesgo de Deslizamientos con Obras de Bioingeniería. // *Seminario de Bioingeniería: Experiencias de Adaptación Social y Territorial Frente a los Riesgos y el Cambio Climático*. Bogota.
- Singh, P., Ram, S., & Ghosh, A. (2015). Changes in physical properties of mine soils brought about by planting trees. *Ecology, Environment and Conservation*, 187-193.
- Suárez D., J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: división editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- Suarez Diaz, J. (1998). Vegetación y Bioingeniería. En J. Suarez Diaz, *Deslizamientos y Estabilidad de taludes en zonas tropicales* (págs. 275-302). Bucaramanga.
- Suarez Diaz, J. (1998). Control de aguas superficiales y subterráneas. En J. Suarez Diaz, *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (págs. 429-472). Bucaramanga.
- Suarez Diaz, J. (2009). *Deslizamientos, Volumen I: Analisis Geotecnico*. Bucaramanga, Colombia.
- Suarez Diaz, J. (2009). *Deslizamientos, Volumen II: Tecnicas de Remediacion*. Bucaramanga, Colombia.

- Tardío, G., & Mickovski, S. (2016). Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *Ecological Engineering*, 138–147.
- Tardío, G., & Mickovski, S. B. (2015). Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes. *Ecological Engineering*, 82, 222-230.
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87, 268–283.
- UNAD. (2011). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Obtenido de Propiedades y Contaminación del suelo: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin_1_0_contenido_de_materia_orgnica_y_fertilidad.html
- Veeck, G., Zhou, L., & Ling, G. (1995). Terrace construction and productivity on loessal soils in Zhongyang County, Shanxi Province, PRC. *Chinese Academy of social science, Economical and environmental economics division*, 450-467.
- Villamil, Y. P. (2015). *Propiedades de los Suelos*.
- Yunwei, Z., Xuan, Z., & Tingguo, Z. (2011). Evaluation for Traction Effect of Yunnan Pine Lateral Roots on Soil. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 192 – 197 .
- Zanuzzi, A., Arocena, J., Mourik, J., & Faz Cano, A. (2009). Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, 69-75.
- Zhou, Y., Watts, D., Li, Y., & Cheng, X. (1998). A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*, 107-120.

ANEXOS

ANEXO 1. Algunas Obras de bioingeniería Comunes.

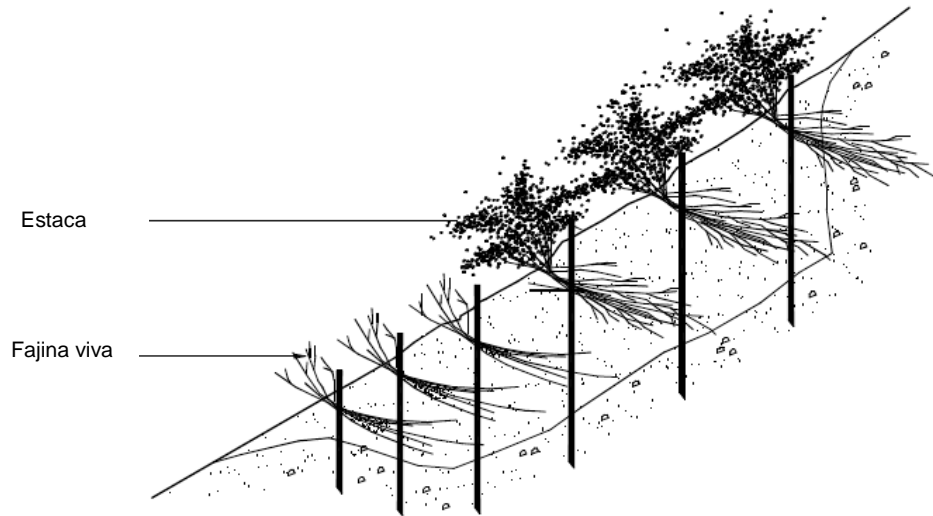


Figura A1. 1. Fajina viva en talud

Fuente: (Suarez Diaz, Vegetación y Bioingeniería, 1998)



Figura A1. 2. Muros de criba o Cribwall con estacas vivas

Fuente: (Coppin & Stiles, 1990)



Figura A1. 3. Geomallas de multifilamentos de poliéster de alto peso molecular.

Fuente: (ANDEX)



Figura A1. 4. Técnica de Willow Spiling

Fuente: (Anstead, Boar, & Tovey, 2012)



Figura A1. 5. Zanja de corona

Fuente: (García, 2007)

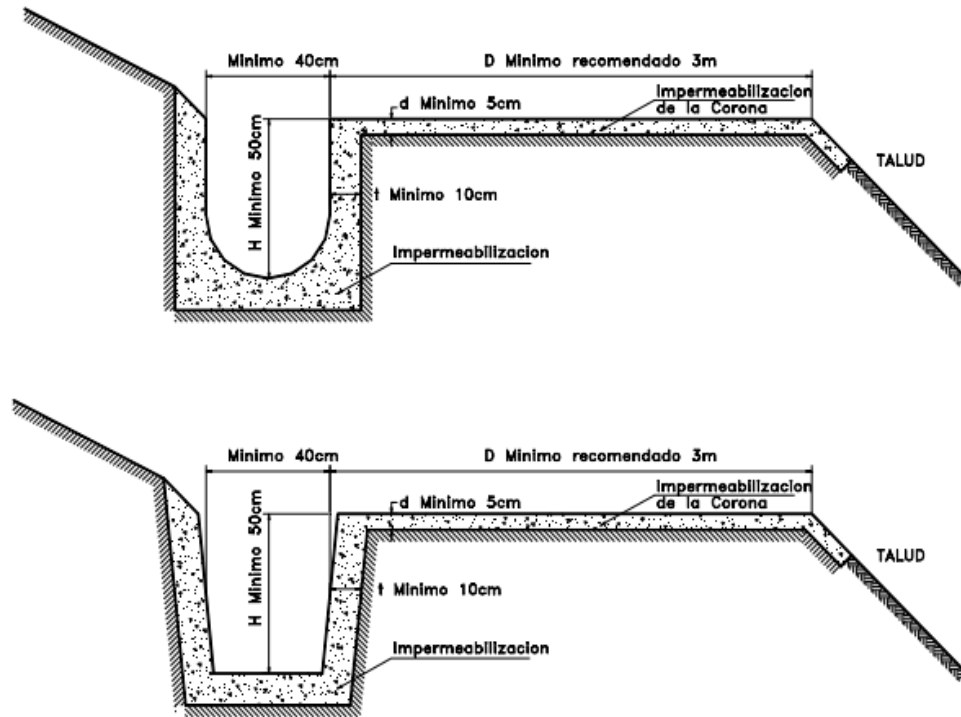


Figura A1. 6. Detalle de las zanjas de corona para el control de aguas superficiales en un talud.

Fuente: (Suarez Diaz, 1998)

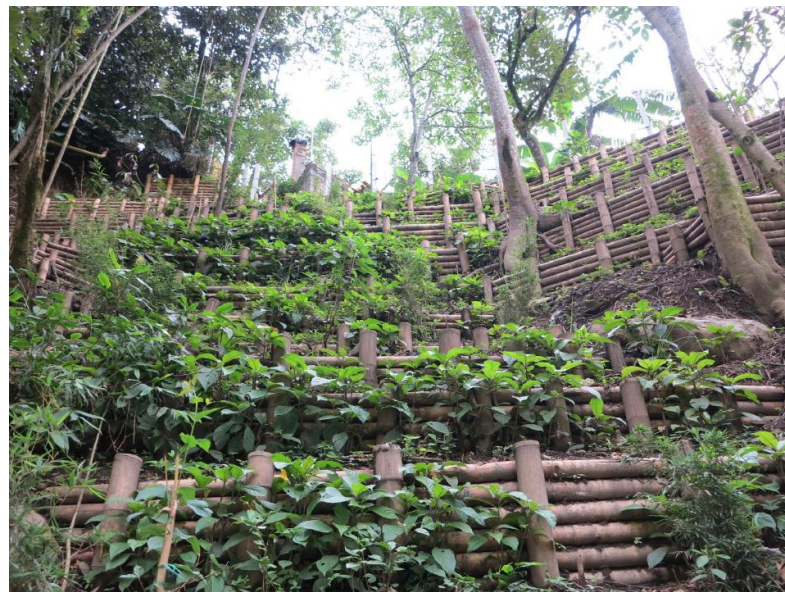


Figura A1. 7. Trinchos de Estabilización con estacas Vivas

Fuente: (Serrato Suarez, 2015)

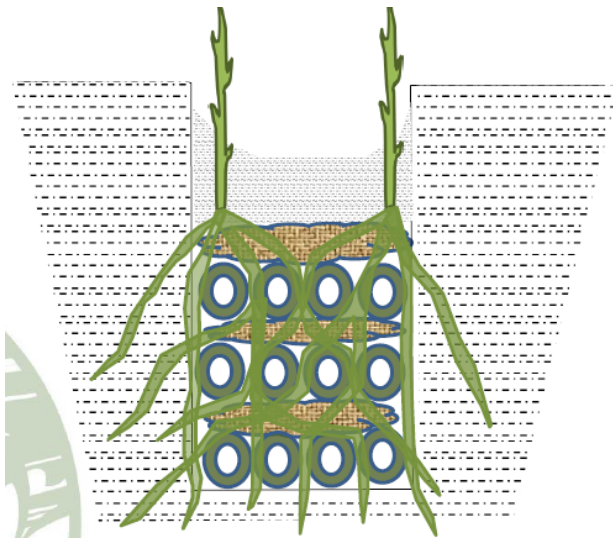


Figura A1. 8. Filtros Vivos
Fuente: (Serrato Suarez, 2015)



Figura A1. 9. Trinchos de disipación en filtros vivos
Fuente: Trabajo de Campo, Cordillera Sur.

ANEXO 2. Determinación de la textura

MÉTODO: Bouyoucos, según metodología propuesta por el manual para estudios de suelos del IGAC.

1. la muestra de suelo fue secada al ambiente, (Figura A2. 2) para posteriormente ser tamizada por el tamiz número 10 o de 2 mm como se ve en la Figura A2.2. De la muestra de fin obtenida se pesaron 50 gramos, y se colocaron en un frasco tetero de 8 oz aproximadamente.



Figura A2. 2. Secado de las muestras de suelo



Figura A2. 1. Tamizado de muestras por tamiz de 2 mm

2. Se agregó agua destilada hasta una altura de 2/3 del frasco, se taparon los frascos y se le agregaron 10 ml de dispersante (solución de hexametáfosfato de sodio), y se colocó en un agitador durante un periodo de dos horas, como se aprecia en la Figura A2.3.



Figura A2. 3. Agitación de las muestras

3. Una vez completadas las dos horas de agitación se agregó la muestra cuantitativamente a una probeta o cilindro aforado de 1000 ml y se completó su volumen con agua destilada, como se ve en la imagen N°4A.



Figura A2. 4. Muestras en el cilindro aforado de 1000 ml y medición con hidrómetro

4. se agitó vigorosamente la muestra con una varilla de vidrio por 30 segundos, e inmediatamente se sumergió el hidrómetro suavemente y se registró el valor de lectura; se dejó sedimentar la muestra durante dos horas más y se tomó la lectura nuevamente con el hidrómetro, como se ve en la Figura A2.4.

5. Se pusieron a secar al horno a 105 °C, 10 gramos de suelo para determinar la humedad gravimétrica y así realizar la corrección de los 50 g de suelo con humedad del ambiente, tomados inicialmente.
6. Se tomó la temperatura de cada muestra, y se procede a realizar los cálculos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ arena (2 - 0.05 mm)} = 100 - \frac{\text{Lectura corregida por T}^\circ (40s) * 100}{\text{g masa d esuelo secp a 105 }^\circ\text{C}}$$

$$\% \text{ arcilla (0.002 mm)} = \frac{\text{Lectura corregida por T}^\circ (2h) * 100}{\text{g masa d esuelo secp a 105 }^\circ\text{C}}$$

$$\% \text{ Limos (0.05 - 0.002 mm)} = 100 - (\% \text{ arenas} + \% \text{ arcillas})$$

Tabla A1. 1.Resultados Prueba de Textura

Muestra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
7	60,0	14,2	25,8	franco arcilloarenoso
8	70,2	16,2	13,6	franco arenoso
9	53,9	24,3	21,7	franco arcilloarenoso
10	66,1	14,2	19,7	franco arenoso
11	70,0	12,2	17,7	franco arenoso
12	68,1	12,2	19,7	franco arenoso
13	63,9	14,3	21,8	franco arcilloarenoso
14	70,2	14,2	15,6	franco arenoso
15	65,9	16,3	17,8	franco arenoso
16	64,0	18,3	17,7	franco arenoso
17	64,1	16,2	19,7	franco arenoso
18	63,9	16,3	19,8	franco arenoso
19	67,6	20,3	12,2	franco arenoso
20	75,2	14,2	10,6	franco arenoso
21	71,3	16,2	12,5	franco arenoso
22	71,2	16,2	12,6	franco arenoso
23	69,2	18,2	12,6	franco arenoso
24	59,9	18,3	21,8	franco arcilloarenoso
25	51,8	16,3	31,9	franco arcilloarenoso
26	65,9	16,3	17,8	franco arenoso
27	55,4	16,4	28,2	franco arcilloarenoso
28	57,7	16,4	26,0	franco arcilloarenoso
29	58,8	14,4	26,8	franco arcilloarenoso
30	62,9	12,4	24,7	franco arcilloarenoso
31	65,3	12,4	22,3	franco arcilloarenoso
32	45,0	20,0	35,0	franco arcilloarenoso
33	51,0	22,5	26,6	franco arcilloarenoso

Muestra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
34	60,4	8,1	31,5	franco arcilloarenoso
35	64,5	16,2	19,3	franco arenoso
36	64,0	16,4	19,5	franco arenoso
37	56,1	18,4	25,5	franco arcilloarenoso

ANEXO 3: Prueba de humedad de campo y densidad aparente (DA)

Método: Tubos biselados, establecido en el Manual de Estudios de Suelos del IGAC

1. Se utiliza un juego de cilindros biselados que son introducidos de manera vertical en el suelo con la ayuda de un martillo chipote. Después de retirado el cilindro, se verificó que estuviese completamente lleno y se retiró el exceso de los bordes, se envolvió en papel vinipel, con el fin de conservar la humedad, y se introdujo en un maletín especial para guardar los tubos, junto con las demás muestras.



Figura A3. 1. Toma de muestras inalteradas mediante tubos biselados

2. Ya en laboratorio se pesó cada cilindro con la muestra de suelo inalterada, se retiró totalmente la muestra y se pesó de nuevo la muestra sola y el cilindro solo, registrando a su vez su longitud y diámetro interno, con los cuales se calcula el volumen.
3. La muestra fue llevada al horno a 105°C durante 24 horas, para finalmente ser pesada de nuevo y hallar la humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo.
4. Se determinó la humedad gravimétrica mediante la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{\text{Peso Suelo Húmedo} - \text{Peso Suelo Seco}}{\text{Peso Suelo Seco}} * 100$$

5. se determinó la densidad aparente mediante la siguiente fórmula:

$$Densidad\ Aparente = \frac{Masa\ Suelo\ Seco}{Volumen\ Cilindro\ Vacio}$$

ANEXO 4. Prueba de densidad real (DR) y porosidad (P)

Método: Picnómetro, establecido en el Manual de Estudios de Suelos del IGAC

1. Se tomó una muestra de aproximadamente 10 gr de suelo seco previamente a 105°C durante 24 horas, se pasó por el tamiz No. 10 y posterior a ello se tomaron picnómetros de 10 ml, a los cuales se les adicionó 2 gr del suelo seco y tamizado, Se tomó y registró su peso.



Figura A4. 1. Picnómetro con muestra de suelo seco

2. A cada picnómetro con los 2 gramos de suelo ya incorporados se le adicionó agua destilada hasta una tercera parte del volumen del picnómetro, se registró cada peso y se introdujeron en la cámara de vacío durante dos horas.



Figura A4. 3. Picnómetro con muestra de suelo seco y 1/3 de agua destilada

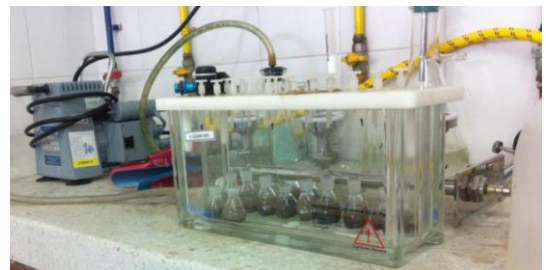


Figura A4. 2. Extracción de aire en cámara de vacío

3. Pasadas las dos horas se adicionó agua hasta las dos terceras partes de volumen del picnómetro, dándose golpecitos en el mismo para terminar de eliminar las burbujas de aire del suelo, introduciéndose de nuevo en la campana por 1 hora más con el fin de terminar de eliminar el resto de aire del suelo.
4. Se extrajo cada picnómetro de la campana, se tomó el peso con los picnómetros más el agua, luego se vaciaron los picnómetros y se llenaron de nuevo con agua destilada, para pesarlos y determinar la densidad del agua en los picnómetros.
5. Finalmente se determinó la densidad real de cada muestra de suelo empleando el volumen de cada picnómetro y la masa de suelo obtenida sin aire en su interior.

ANEXO 5. Prueba de contenido de materia orgánica (CMO)

MÉTODO: CALCINACIÓN O PÉRDIDA POR IGNICIÓN (LOI)

El método de calcinación o pérdida por ignición (loss on ignition, LOI) cuantifica directamente el contenido de MO y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas. Existen numerosos trabajos donde se utilizan temperaturas de ignición que van desde los 250 a los 600 °C en mufla y diferentes períodos de tiempo, desde 2 hasta 24 h, sin embargo diferentes autores han reportado que temperaturas mayores a 500 °C pueden implicar importantes errores en la determinación de MO por pérdida de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ión ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos.

Schulte y Hopkins en 1996, para muestras de suelo de la región central del norte de los EEUU, desarrollaron el método de LOI como una técnica la técnica exacta y de bajo costo para determinar MO. Este método cuantifica directamente el contenido de MO y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas. Se pesa una muestra de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se coloca en crisoles de porcelana, posteriormente se seca el conjunto (la muestra y el crisol) en horno a 105 °C, durante 24 horas, a continuación se retira del horno y se deja enfriar en desecador, y luego se pesa.

En seguida se calcina la muestra en una mufla a 360 °C, durante 2 horas. Se retira de la mufla el conjunto, se deja enfriar en desecador y se pesa nuevamente como se ve en la Figura A5.3. Se calcula la diferencia de peso entre las medidas

antes y después de calcinar; esta diferencia de peso equivale a la cantidad de materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la calcinación. Se expresa la diferencia de peso en porcentaje, con respecto al peso inicial de la muestra (seca a 105 °C).



Figura A5. 1. Pesaje de la muestra de suelo seco al aire y tamizado de la misma

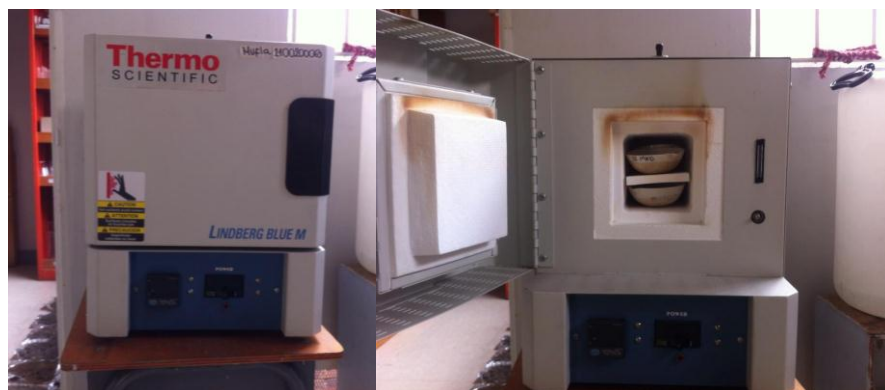


Figura A5. 2. Ignición de la muestra en la Mufla 360 °C



Figura A5. 3. Enfriado de las muestras en el desecador

ANEXO 6. Resultados de pruebas físicas

En la Tabla A6.1., se presentan los resultados de las pruebas realizadas en las condiciones iniciales del talud, y las condiciones finales o después de la implementación de las obras de bioingeniería.

Tabla A6. 1. Resultados de pruebas físicas HG, HV, DA, DR, P, MO.

MUESTRA	HUMEDAD GRAVIMÉTRICA (HG)		HUMEDAD VOLUMÉTRICA (HV)		DENSIDAD APARENTE (DA)		DENSIDAD REAL (DR)	POROSIDAD (P)		MATERIA ORGANICA (MO)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final		Inicial	Final	Inicial	Final
7	13,37	9,28	16,09	11,47	1,20	1,24	1,99	39,57	37,89	1,90	1,95
8	7,35	7,81	9,47	8,18	1,29	1,05	1,93	33,3	45,75	3,00	5,05
9	7,41	13,19	10,21	15,57	1,38	1,18	1,38	0,47	14,66	3,47	4,05
10	6,56	3,89	8,16	5,59	1,24	1,44	2,35	47,03	38,71	3,40	4,49
11	15,74	14,55	22,98	15,86	1,46	1,09	2,50	41,56	56,38	3,31	3,71
12	2,66	8,74	3,09	11,99	1,16	1,37	2,50	53,53	45,21	1,63	3,95
13	7,89	6,07	11,60	7,82	1,47	1,29	2,13	31,05	39,59	2,41	2,47
14	4,84	5,75	5,93	6,84	1,22	1,19	3,09	60,41	61,53	0,93	4,53
15	9,66	6,19	12,27	7,63	1,27	1,23	2,15	41,02	42,82	2,52	2,98
16	6,30	6,12	9,50	8,09	1,51	1,32	2,86	47,28	53,84	2,03	3,09
17	13,54	5,41	14,19	6,95	1,05	1,29	2,26	53,72	43,27	2,52	3,25
18	6,98	8,57	9,44	10,71	1,35	1,25	3,08	84,13	85,33	3,50	6,32
19	8,78	5,47	11,88	6,49	1,35	1,19	2,03	33,49	41,7	4,08	4,22
20	5,66	4,57	7,39	6,20	1,31	1,36	2,23	41,43	39,15	2,73	4,23
21	7,05	9,19	8,64	11,26	1,23	1,23	2,59	52,58	52,66	4,83	5,34
22	3,53	9,69	5,39	11,03	1,53	1,14	1,62	5,33	29,47	4,77	5,02
23	7,14	7,35	9,92	10,02	1,39	1,36	2,02	31,09	32,38	4,26	4,96
24	7,01	7,99	9,77	10,06	1,39	1,26	1,69	17,64	25,61	1,57	6,48
25	8,27	8,59	11,05	11,75	1,34	1,37	1,47	9,38	7,21	3,81	4,00
26	9,21	10,38	10,45	13,23	1,13	1,28	2,95	61,62	56,85	4,03	7,49
27	16,27	14,52	19,19	19,33	1,18	1,33	1,82	35,21	26,92	5,83	12,15
28	10,69	9,86	14,60	12,01	1,37	1,22	1,91	28,43	36,19	4,08	4,00
29	10,13	14,16	12,91	19,04	1,27	1,35	2,38	46,51	43,53	4,52	4,13
30	12,93	14,68	14,52	107,73	1,12	0,73	2,26	50,36	67,56	5,67	2,25
31	3,44	6,00	2,61	5,88	0,76	0,98	1,29	40,92	23,81	8,22	5,40
32	13,84	8,43	18,01	11,49	1,30	1,36	2,78	53,12	50,91	7,43	4,07
33	8,35	12,27	13,41	15,16	1,61	1,24	2,37	32,16	47,81	1,39	4,90
34	12,46	15,66	17,53	20,33	1,41	1,30	2,00	29,59	35,03	0,41	4,60
35	10,26	4,98	14,95	7,25	1,46	1,46	2,06	29,3	29,3	4,64	4,55
36	10,74	5,71	10,45	8,99	0,97	1,57	1,24	39,64	8,29	5,81	4,64
37	5,93	5,51	8,65	8,09	1,46	1,47	2,95	50,51	50,23	0,42	4,69
PROMEDIO	8,84	8,73	11,43	13,94	1,30	1,26	2,19	39,40	40,95	3,52	4,61

