

Propuesta Metodológica para la implementación de trinchos de guadua como medida bioingenieril para un tramo de la vía Chía-Zipaquirá



Corporación Regional del Quindío,
2012, Armenia, Quindío.

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
TRINCHOS DE GUADUA COMO MEDIDA BIOINGENIERIL PARA
UN TRAMO DE LA VÍA CHÍA-ZIPAQUIRA**

**WALTER VLADIMIR PRIETO MATEUS
CODIGO 3020820098**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
Ingeniería Civil
Bogotá D.C.
2014**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
TRINCHOS DE GUADUA COMO MEDIDA BIOINGENIERIL PARA
UN TRAMO DE LA VÍA CHÍA-ZIPAQUIRÁ**

PRIETO MATEUS WALTER VLADIMIR

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al
título de Ingeniero Civil**

DIRECTOR

Ing. Christian Camilo Gutiérrez Angulo

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
Ingeniería Civil
Bogotá D.C.
13 de Junio de 2014**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FOTOGRAFÍAS	8
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS	9
1. FORMULACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	10
1.1. Planteamiento Del Problema	10
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos	15
1.3.1 Objetivo General	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1. Antecedentes	16
2.1.1. Introducción a la Bioingeniería	20
2.1.2. Desarrollo de la bioingeniería	22
2.1.3. Aplicaciones de las técnicas y prácticas de bioingeniería	23
2.2. Marco Teórico	24
2.2.1. Procesos de Remoción en Masa	24
2.2.2. Criterios de falla de Mohr-Coulomb	27
2.2.3. Modelos Geotécnicos aplicados a la Estabilidad de Taludes	29
2.2.4. Guadua Angustifolia	31
2.2.4.1. Aspectos Generales de la guadua	34
2.2.4.2. Valores característicos, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad	34
2.2.5. Trinchos en Guadua	35
2.2.6. Naturaleza de la Zona de Estudio	38
2.2.6.1. Geología	38
2.2.6.2. Geología Estructural	38
2.2.6.3. Geomorfología	39
2.2.7. Reconocimiento e Identificación de la Zona de Estudio	42
2.3. Marco Jurídico	46
2.4.1 La Normalización del Bambú-Guadua en Colombia	46
3 DISEÑO METODOLOGICO	48
3.1 Enfoque de la Investigación	48
3.1.1 El Enfoque Cuantitativo	48
3.2 Tipo de Investigación	48
3.3 Fases de la Investigación	49
3.3.1 Recopilación de Información.	49
3.3.2 Análisis de la información existente.	49
3.3.3 Reconocimiento e identificación del sitio.	49

3.3.4	Estudio de las características superficiales del sitio que permitan la caracterización topográfica y geotécnica.	50
3.3.5	Investigación de campo	50
3.3.6	Pruebas de Laboratorio.	51
3.3.7	Análisis de la información obtenida, metodología y diseño.	51
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
4.1	Recopilación de Información.	52
4.2.	Análisis de la información existente.	53
4.3.	Reconocimiento e identificación del sitio	57
4.4	Estudio de las características topográficas y geotécnicas.	60
4.5	Investigación de campo	62
4.6	Pruebas de Laboratorio	65
4.7	Análisis de la información obtenida, diseño y metodología	67
4.7.1.	Método de Talud Infinito	70
4.7.2.	Método de Fellenius	72
4.7.3.	Método de Bishop	74
4.7.4.	Diseño Estructural	86
4.7.5.	Metodología e Implementación	92
4	CONCLUSIONES	98
5	BIBLIOGRAFÍA	100
6	ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de Deforestación Barrio La Sultana (Manizales) (Fuente CRQ)	19
Figura 2. Envoltorio de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb	28
Figura 3. Forma de Construcción de un Trincho en Guadua y resultado final del Diseño e Implementación.	37
Figura 4. Mapa estructural de la Sabana de Bogotá.	40
Figura 5. Mapa Geomorfológico de la Sabana de Bogotá	41
Figura 6. Esquema de ubicación geográfica de la Zona de Estudio	42
Figura 7. Ubicación Geografía y Fotografía del Talud N°3	44
Figura 8. Ubicación Geográfica y Fotografía del Talud N°4	44
Figura 9. Uso de empedrados, geotextiles y geomallas para la estabilización y control de un talud vial en cercanías del municipio de Zipaquirá	45
Figura 10. Distribución Normal aplicada al parámetro Peso Unitario	55
Figura 11. Distribución Normal aplicada al parámetro Cohesión	56
Figura 12. Distribución Normal aplicada al parámetro Fricción	56
Figura 13. Perfil estratigráfico aproximado Talud N°3	64
Figura 14. Perfil Estratigráfico aproximado Talud N°4	64
Figura 15. Talud N°3 con detonantes de Sismo y Lluvia	67
Figura 16. Talud N°4 con detonantes de Sismo y Lluvia	68
Figura 17. Distribución de los valores de F.S para el Talud N°3	76
Figura 18. Distribución de los valores de F.S para el Talud N°4	76
Figura 19. Modelación del Talud N°4 sin implementación de Trincho en la zona de PRM.	77
Figura 20. Modelación del Talud N°4 con implementación de Trincho en la Zona de PRM	78
Figura 21. Modelación del Talud N° 3, implementando un sistema de terrazas, con detonantes de sismo y lluvia.	79
Figura 22. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (1m), y detonantes de sismo y lluvia.	80
Figura 23. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2m), y detonantes de sismo y lluvia.	80
Figura 24. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2,5m), y detonantes de sismo y lluvia.	81
Figura 25. Modelación del Talud N° 4, implementando un sistema de terrazas, con detonantes de sismo y lluvia.	81
Figura 26. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (1m), y detonantes de sismo y lluvia.	82
Figura 27. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2m), y detonantes de sismo y lluvia.	82
Figura 28. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2,5m), y detonantes de sismo y lluvia.	83
Figura 29. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (3m), y detonantes de sismo y lluvia.	83
Figura 30. Distanciamiento vs Factor de Seguridad simulado para el Talud N°3	84
Figura 31. Distanciamiento vs Factor de Seguridad simulado para el Talud N°4	84
Figura 32. Módulos de sección para algunas vigas compuestas	90
Figura 33. Diseño de Trinchos de Guadua para el Talud N°3 y N°4	92
Figura 34. Diseño definitivo de Trinchos de Guadua para el Talud N°3 y N°4	93
Figura 35. Diagrama de flujo para la implementación de Trinchos de Guadua	97

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Técnicas y Prácticas de bioingeniería en taludes, laderas y cauces</i>	23
<i>Tabla 2. Aplicación de la bioingeniería en diferentes proyectos o espacios urbanos</i>	24
<i>Tabla 3. Tipos de movimientos asociados a procesos de remoción en masa.</i>	25
<i>Tabla 4. Movimientos Hidro-gravitacionales asociados a PRM.</i>	26
<i>Tabla 5. Métodos de análisis de estabilidad de taludes</i>	29
<i>Tabla 6. Valores característicos (MPa)</i>	34
<i>Tabla 7. Esfuerzos admisibles (MPa)</i>	35
<i>Tabla 8. Módulo de elasticidad (MPa)</i>	35
<i>Tabla 9. Normas técnicas para el control de la Guadua como material Constructivo</i>	47
<i>Tabla 10. Información Primaria y Secundaria consultada dentro del desarrollo de la investigación</i>	52
<i>Tabla 11. Datos Geomecánicos Formación Arenisca Labor Tierna extraídos de los diferentes estudios y sondeos consultados.</i>	54
<i>Tabla 12. Análisis estadístico mediante Distribución Normal para parámetros Geotécnicos de la Formación Arenisca Labor Tierna</i>	57
<i>Tabla 13. Datos representativos Formación Arenisca Labor Tierna</i>	57
<i>Tabla 14. Parámetros Geotécnicos obtenidos en Laboratorio</i>	66
<i>Tabla 15. Factores de Seguridad para los Taludes N°3 y N°4 obtenidos a través de diferentes métodos de análisis.</i>	76
<i>Tabla 16. Tabla H.2.4-1 “Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos”</i>	85
<i>Tabla 17. Tabla Resumen con Factores de Seguridad obtenidos a través de la Modelación con el programa Slide®</i>	85
<i>Tabla 18. Tabla G.12.7-1 Esfuerzos Admisibles (MPa)</i>	86
<i>Tabla 19. Tabla G.12.7-2 Módulos de Elasticidad (MPa)</i>	86

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

<i>Fotografía 1. Trinchos en guadua como medida de control y terraceo. Palmares del Recreo, Armenia, Quindío (Fuente FONADE)</i>	11
<i>Fotografía 2. Puentes en guadua contruidos por indígenas y pobladores de la región andina colombiana. Tomada de Tropical bambú. Marcelo Villegas</i>	16
<i>Fotografía 3. Viviendas construidas en guadua y bahareque desde la época de la colonización antioqueña. Tomada de tropical bambú, Marcelo Villegas</i>	17
<i>Fotografía 4. Estructuras modernas en guadua desarrolladas por el arquitecto Simón Vélez. Fotografías tomadas por Simón Vélez.</i>	17
<i>Fotografía 5. Guadales en la región del Eje Cafetero - Colombia.</i>	31
<i>Fotografía 6. Guadales en el eje cafetero. Fotografías de César Duque y Marcelo Villegas.</i>	33
<i>Fotografía 7. Trinchos de guadua como medida de control del Talud de la Vía Chía-Zipa</i>	43
<i>Fotografía 8. Vista de perfil de los trinchos de guadua y las terrazas del talud</i>	43
<i>Fotografía 9. Trinchos de guadua combinados con Geotextiles para el control de Taludes viales sobre la variante de la vía Cajica-Zipaquirá</i>	58
<i>Fotografía 10. Taludes viales intervenidos con medidas bioingenieriles a lo largo del tramo Chía-Zipaquirá</i>	58
<i>Fotografía 11. Talud N°3 Trinchos de Guadua en buenas condiciones estructurales.</i>	59
<i>Fotografía 12. Talud N°4 visualmente con problemas de control y presencia de Fenómeno de Remoción.</i>	59
<i>Fotografía 13. Topografía y Geoformas del Sitio.</i>	60
<i>Fotografía 14. Ladera de contrapendiente estructural al Noroeste de la Vía Cajica-Zipaquirá</i>	61
<i>Fotografía 15. Coluviones en la base de las Zonas Escarpadas</i>	61
<i>Fotografía 16. Trinchera superficial para la extracción de bloques de material</i>	62
<i>Fotografía 17. Muestras en Bloque extraídas de la Zona de estudio en la Vía Cajicá-Zipaquirá</i>	63
<i>Fotografía 18. Proceso de Remoción en Masa sobre Talud N°4 (Sept. 2013)</i>	69
<i>Fotografía 19. Evolución del PRM sobre el Talud N°4 (Abril de 2014)</i>	69

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

AIS: Asociación de Ingeniería Sísmica

CAR: Corporación Autónoma Regional

CCNG: Comité Colombiano para la normalización del Bambú/Guadua

CIPAV: Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria

CRQ: Corporación Regional del Quindío

CVC: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca

E: Este

ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

LTDA: Limitada

ONG: Organización No Gubernamental

N: Norte

NSR-10: Norma Sismo Resistente 2010

NTC: Norma Técnica Colombiana

SCB: Sociedad Colombiana del Bambú

SCG: Sociedad Colombiana de Geotecnia

UNAD: Universidad Nacional Abierta y a Distancia

UPES: Unidad de Prevención de Emergencias de Bogotá

USGS: United States Geological Survey (Servicio geológico de Estados Unidos)

C: Cohesión

°C: Grados Centígrados

cm: Centímetros

Cos: Coseno

Cu: Cohesión no Drenada

FS: Factor de Seguridad

γ : Peso Unitario

γ_w : Peso Unitario del Agua

h: Altura

Km: Kilometro

Km²: Kilómetro cuadrado

kN: Kilo Newton

m: metros

min: minutos

MPa: Megapascales

m.s.n.m: Metros sobre el nivel del Mar

Pa: Pascales

Φ : Ángulo de fricción

seg: segundos

Sec: Secante

Sen: Seno

σ : Esfuerzo Normal sobre el plano de falla

Tan: Tangente

Tf: Esfuerzo Cortante sobre el plano de falla

1. FORMULACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

1.1. Planteamiento Del Problema

Debido a la Geomorfología y condiciones del terreno Colombiano, a sus constantes variaciones del Clima y a la imposibilidad de la ejecución de Obras de Ingeniería a lo largo y ancho del país los problemas más generalizados en las zonas de ladera son la presencia de Fenómenos de Remoción en Masa; como consecuencia de una erosión avanzada y severa y la suma de detonantes como movimientos del terreno asociados a fuerzas tectónicas y precipitaciones de diferentes magnitudes y duraciones, con consecuencias catastróficas, tales como: taponamientos de vías, destrucción de cultivos, viviendas y toda clase de infraestructura, inundaciones, damnificados y pérdidas de vidas humanas, entre otros. Estos fenómenos se presentan debido a la mala planificación del uso y manejo de los suelos, al mal manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, obras de infraestructura mal localizadas y a la deforestación indiscriminada, y a la potrerización de las zonas de ladera, principalmente.

La erosión y los deslizamientos avanzan cada año, debido a que han sido afrontados tradicionalmente en forma monodisciplinaria y no integral, con obras empíricas de concreto de la ingeniería convencional, basados en ensayo y error, que solo actúan sobre los efectos de los problema, más no sobre sus causas y a expensas de la eliminación total de la vegetación arbórea, arbustiva y herbácea natural y con ella la biodiversidad genética, posiblemente por desconocimiento de los fenómenos que originan estos procesos degradativos, o por intereses económicos de contratación más no de dar una solución verdadera y definitiva a la problemática de degradación ambiental.

Se ha encontrado como en términos generales, la ingeniería convencional, actúa sólo sobre los efectos de los fenómenos degradativos, convirtiéndose a través del tiempo en problemas crónicos o repetitivos, de difícil solución y a costos demasiado elevados, que ante la imposibilidad de solución con estas tecnologías, se catalogan como problemas de tipo geológico, de no solución, caso de las fallas geológicas.

Entretanto, la bioingeniería es considerada como algo único en el sentido que las mismas partes de las plantas sirven como elementos mecánicos a la estructura principal en los sistemas de protección de laderas, las cuales se transforman a

través del tiempo en obras vivas que cada día son más fuertes. Estas estructuras, se convierten tanto en refuerzo mecánico de los suelos, como en sistemas de drenajes hidráulicos y barreras vivas para prevenir y contener la erosión y los movimientos masales.

Por lo anteriormente visto, no se puede confundir la bioingeniería con la simple siembra de árboles, sino que ella va mucho más allá, buscando y atacando inicialmente las causas de los problemas.

La estabilización con obras de bioingeniería es inmediata, ya que se intervienen las causas y no los efectos, y la vegetación sólo entra a ser un componente biológico complementario en la restauración definitiva del área degradada a través del tiempo, tal como lo hace equilibradamente la naturaleza sin la intervención del hombre.

Los trinchos son estructuras de guadua o madera dispuestas en forma de muro a fin de ayudar a formar terrazas para estabilizar taludes que han sufrido procesos de deslizamientos. Su finalidad es prevenir, controlar, estabilizar o remediar taludes que presenten algún tipo de problemática o inestabilidad a través de amarre de raíces (Fotografía 1).



Fotografía 1. Trinchos en guadua como medida de control y terraceo. Palmares del Recreo, Armenia, Quindío (Fuente FONADE)

La remediación de un deslizamiento o de un talud inestable, generalmente no es una estabilización total y definitiva, sino relativa y en ciertas condiciones, provisional. Ante esta realidad, es importante determinar hasta donde se debe llegar en el proceso de remediación.

Cornforth¹ explica que los factores de seguridad razonables y la magnitud de la estabilización deben determinarse teniendo en cuenta principios como el tamaño del deslizamiento, el tipo de movimiento, la magnitud de los estudios realizados, el potencial de consecuencias. Una vez analizado el talud, definidos los niveles de amenaza y riesgo, el mecanismo de falla y analizados los factores de equilibrio, se puede pasar al objetivo final que es el diseño del sistema de prevención, control o estabilización.

Existen varias formas de enfocar y resolver cada problema específico y la metodología que se requiere emplear en cada caso, depende de una serie de factores técnicos, sociales, económicos y políticos, con una gran cantidad de variables en el espacio y en el tiempo, siendo como resultado al final una obra de Ingeniería pesada convencional o Bioingeniería.

La Ingeniería Convencional del concreto, es puntual, no integral, es monodisciplinaria, producto de ensayo y error, actúa sobre los efectos más no sobre las causas de los procesos degradativos, sus estructuras son rígidas, inertes y perecederas, en el corto y mediano tiempo y muy costosas; la Bioingeniería se refiere a la prevención y control de la erosión de los suelos, y de los movimientos de masa con base en estudios científicos de los Procesos Físicos, Químicos y Biológicos de los fenómenos degradativos.

Lo anterior permite, mediante un inventario y diagnóstico integral, encontrar la relación causa - efecto del problema, para posteriormente recurrir en casos estrictamente necesarios, a la construcción de estructuras totalmente vivas, usando diferentes partes de las plantas, tales como raíces y tallos principalmente que permitan determinar la Relación Causa – Efecto de los procesos degradativos, hasta llegar a la solución de los mismos.

Esto permite la planificación del Uso, Manejo y Conservación de los suelos y el control de problemas de erosión y movimientos en masa, evidenciando los puntos a favor de una bioingeniería amigable con la naturaleza, de bajo costo y perdurable en el tiempo y en el espacio.

Debido a que el sustento teórico para la construcción del trincho se reduce en cuanto a las variables que involucra para su diseño, la mayoría de las veces su proceso constructivo es deficiente y en lugar de dar soluciones a un problema, conduce a acelerar los procesos, sean erosivos o de remoción.

¹ Landslides in Practice”, Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative Opciones in Soil. Jhon Wiley and Sons inc. 596 p.

A partir de las condiciones establecidas se genera el interrogante, ¿Los actuales modelos para el diseño y construcción de trinchos en guadua como medida bioingenieril generan un nivel de confianza y seguridad desde el punto de vista geotécnico y estructural?

1.2. Justificación

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de su solución o remediación. Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad del talud o ladera y caracterizarlos plenamente. Se requiere examinar en particular dos aspectos para evaluar la estabilidad de los taludes en términos de ingeniería: el primer elemento consiste en definir en tres dimensiones las características de la masa inestable con referencia particular a las superficies de cortante y los planos de falla.

Como segundo elemento deben analizarse las propiedades y características de los materiales y de los elementos activadores tales como el régimen hidrogeológico y los eventos sísmicos.

Es de gran importancia detectar los movimientos de o dentro de la masa inestable y monitorearlos. La magnitud y profundidad de las investigaciones depende del tamaño y complejidad del talud o del deslizamiento a estudiar. Para un deslizamiento pequeño donde las causas del movimiento son muy evidentes o para un talud sencillo de poca altura sin problemas importantes, se puede realizar una inspección de campo con un informe relativamente corto.

De otro modo, para los deslizamientos de gran magnitud o geológicamente muy complejos, la investigación puede incluir gran cantidad de perforaciones, instrumentación y análisis por un grupo interdisciplinario de profesionales. Según Cornforth² la misión del Ingeniero es proveer la solución más apropiada a los problemas detectados, con base en los beneficios técnicos, costos, constructividad, limitaciones ambientales, derechos de propiedad y seguridad pública.

² Landslides in Practice”, Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative Opciones in Soil. Jhon Wiley and Sons inc. 596 p.

La necesidad de argumentar y validar el proceso constructivo de las obras de bioingeniería a través de modelaciones y sustentos teórico-matemáticos se convierte en un tema de alta trascendencia al generar un grado de mayor precisión y menor incertidumbre en el momento de implementar estas obras, en el caso específico de esta investigación, los trinchos de guadua, generando un conocimiento científico al involucrar el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo y la estructura, las cuales trabajan en una sola dirección con un mismo fundamento, lo que permite involucrar una serie de concepciones y análisis que entrelazan las características geomecánicas de los materiales presentes y que como resultado generarán un modelo de interacción entre los trinchos y el suelo que permitirá la prevención, control, remediación o estabilización de los deslizamientos donde se utilice esta obra bioingenieril sustentando y/o validando los modelos heurísticos que se han venido trabajando para el diseño de estas obras.

Al desarrollar estos análisis cualitativos y cuantitativos se busca implementar una metodología que permita a la comunidad en general que desee utilizar los trinchos de guadua como una obra bioingenieril que mitigue, prevea, controle o remedie un deslizamiento, relacionando la suficiente información que permita modelar, diseñar y construir estas estructuras naturales de la forma y de la manera adecuada, garantizando los beneficios técnicos, la viabilidad económica, la seguridad, y el control de la problemática; y a su vez siendo una prueba piloto para el mejoramiento y homogenización del modelo para su aplicación en otros tipos de estructuras bioingenieriles, lo cual permita un mejoramiento y un complemento más riguroso de la metodología de diseño.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar una metodología aplicada al diseño de trinchos de guadua como medida bioingenieril en el tramo de la vía Chía-Zipacurá.

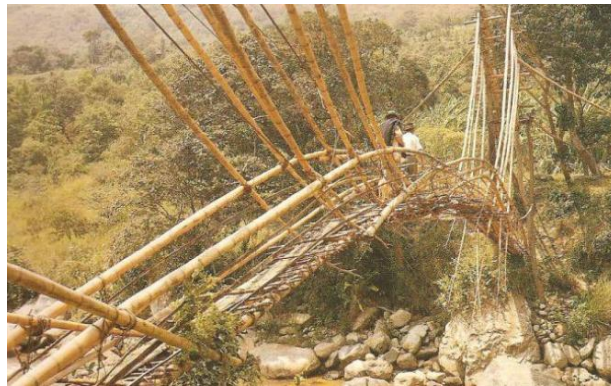
1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los procesos de remoción en masa que inciden en la zona mediante la caracterización geotécnica y las metodologías de estabilidad de taludes.
- Proponer un diseño adecuado de utilización de trinchos de guadua que se adapte a las condiciones de estudio como medida bioingenieril.
- Definir una metodología de diseño, uso e implementación de trinchos de guadua como medida de estabilización de taludes.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

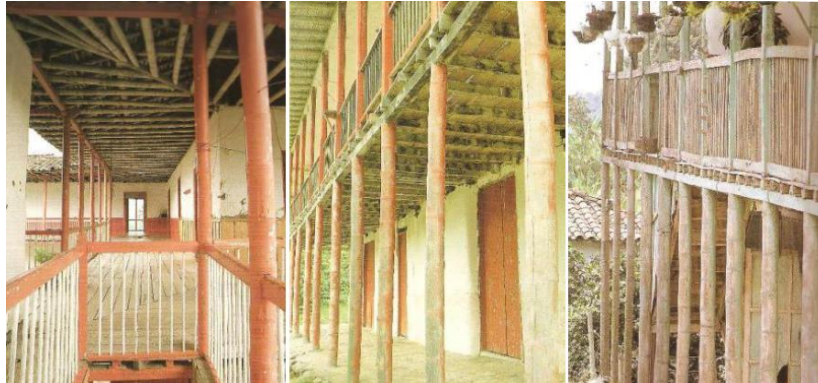
La guadua ha sido utilizada y estudiada desde hace miles de años por los pobladores de Asia y América latina. Su uso fue destinado para la construcción de puentes (Fotografía 2), lugares ceremoniales, viviendas y otros usos como sillas, muebles y otros implementos para el hogar.



Fotografía 2. Puentes en guadua construidos por indígenas y pobladores de la región andina colombiana. Tomada de Tropical bambú. Marcelo Villegas

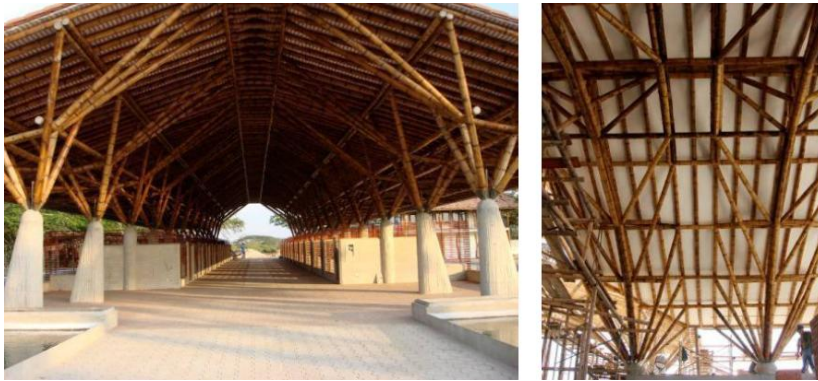
En Colombia, desde la época de la colonización, la guadua fue utilizada para la construcción de viviendas rurales y urbanas. Para los colonizadores antioqueños la guadua fue el símbolo de la civilización en dichas tierras. Este material también ha sido utilizado para la construcción de vivienda tradicional en los sectores menos favorecidos de la población³. A pesar de que la construcción en guadua fue concebida como una construcción pasajera, 150 años después, las construcciones en bahareque y guadua, pueden observarse en diferentes ciudades que conservan intacta su arquitectura, en cercanía a las plazas de algunos municipios de Antioquia, el norte del valle y en el eje cafetero (Fotografía 3).

³ GARZÓN CAICEDO, JENNY V. Optimización de uniones en guadua. Trabajo estructural de uniones a tensión. Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá. Colombia: 1996,



Fotografía 3. Viviendas construidas en guadua y bahareque desde la época de la colonización antioqueña. Tomada de tropical bambú, Marcelo Villegas

La Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS), a raíz del buen desempeño que presentaron las edificaciones en guadua durante el terremoto del eje cafetero en 1999, elaboró el capítulo E.7 “Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado” de la Norma Colombiana de construcciones sismorresistentes (NSR-98) (Decreto 052 del 2002). Por primera vez se avaló la guadua como un material de construcción, pero se limitó su uso a este tipo de edificaciones, dejando fuera del alcance otras estructuras con guadua rolliza como cerchas, puentes, o edificios que se salen del alcance del mismo (Fotografía 4).



Fotografía 4. Estructuras modernas en guadua desarrolladas por el arquitecto Simón Vélez. Fotografías tomadas por Simón Vélez.

El uso de los métodos bioingenieriles datan en China desde antes del siglo XII cuando fueron utilizados gran cantidad de arbustos para estabilizar taludes. Al comienzo del siglo XX, técnicas similares fueron usadas en China para controlar inundaciones y erosión a lo largo del Río Amarillo.

El uso de la bioingeniería en los Estados Unidos, data de 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 de piedra combinados con recortes de madera y muros con incrustaciones de vegetación. En los últimos 20 años, la bioingeniería ha sido reconocida como una técnica reemergente para el control de la erosión, por ser estructuras estéticamente agradables y ambientalmente seguras.

La bioingeniería ha sido practicada ampliamente y en forma exitosa en Europa, especialmente en Alemania, donde los métodos bioingenieriles han sido usados por más de 150 años.

La tala completa de la vegetación arbórea para el establecimiento de pastos y cultivos genera una inestabilidad de las formaciones superficiales expresada por una gran cantidad de movimientos en masa. En pendientes fuertes, parte de la estabilidad de las laderas, se debe al enraizamiento tanto por el anclaje vertical como por el horizontal (Figura 1).



Figura 1. Secuencia de Deforestación Barrio La Sultana (Manizales) (Fuente CRQ)

Se observa la tala indiscriminada de la vegetación nativa, denudación del terreno con azadón y el arranque de raíces de los árboles protectores de la ladera, para establecer una pantalla de concreto, con costos superiores a los 700 Millones de pesos (Diciembre 31 de 2005 a Septiembre 14 de 2006).

Resultados exitosos con la bioingeniería, en cuanto al control de la erosión severa y los movimientos masales en todo tipo de suelos climas y topografías, se obtuvieron, a través de convenios Interinstitucionales, entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (C.V.C.) y el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), con participación de la comunidad y las ONG's de los diferentes municipios, a través de programas de socialización, sensibilización concientización y capacitación, entre ellas la ONG Ecoambientes del Municipio de Argelia Valle.

2.1.1. Introducción a la Bioingeniería

Según Yet Temple y Rapp citados por Morgan⁴ menos del 1% de las cicatrices de deslizamientos se presentan en áreas boscosas, 47% están en terrenos cultivados y otro 47% en terrenos en barbecho. La asociación de la erosión y los deslizamientos con la tala del bosque para la agricultura, queda así muy clara. La tala del bosque para pasturas, causa una declinación sobre la resistencia al cortante tangencial de los suelos en un período de 5 a 10 años, necesarios para la pudrición de las raíces. Como resultado, los deslizamientos en suelos bajo pasturas en Nueva Zelanda, son activados por tormentas con períodos de retorno de 30 años, mientras que una tormenta con período de retorno de 100 años es requerida para producir deslizamientos en una zona boscosa.

Ya que la resistencia al cortante tangencial afecta la resistencia del suelo al arranque por el impacto de la gota de lluvia y la susceptibilidad de los suelos a la erosión en surcos, como también la probabilidad de fallar la masa de suelo, demuestra que los sistemas radicales pueden tener una influencia considerable sobre todos estos procesos. El efecto máximo sobre la resistencia al fallamiento de un suelo ocurre cuando la resistencia a la tensión de las raíces es movilizadas completamente, y que bajo estrés, el comportamiento del suelo y las raíces es compatible.

El efecto de la tensión es limitado con vegetación de raíces superficiales, donde las raíces fallan al ser haladas, por ejemplo deslizamientos debido a pérdidas de ligamentos entre las raíces y el suelo, antes de la fuerza de tensión pico ser alcanzada. El efecto de la tensión es más marcado con árboles donde las raíces penetran varios metros en el suelo y su camino tortuoso alrededor de las piedras y otras raíces proveen buen anclaje.

El fallamiento de las raíces puede ocurrir por ruptura, como por ejemplo cuando su fuerza de tensión es excedida. El efecto de refuerzo de las raíces, pueden también ser minimizados cuando el suelo es sostenido en compresión en lugar de tensión, ejemplo, en la pata del talud.

La vegetación arbórea y arbustiva permite que se presenten sistemas radicales de anclaje mayor en lo profundo y hacia los lados en el perfil del suelo, aumentando su resistencia a la ruptura, fracturación o fallamiento y con ello la estabilidad del terreno a los movimientos masales.

⁴ MORGAN R.P.C. 1986. Soil Erosion Conservation. John Wiley &, Inc., 605 third Avenue, New York. 298 p.

Esto ha sido corroborado por trabajos reportados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), realizados por Flórez (1986) en el área comprendida entre Manizales y Chinchiná, mediante seguimiento aerofotográfico y comprobaciones de campo, de zonas con sistemas agroforestales (cultivos y árboles) que pasaron a monocultivos, en suelos inestables pedregosos, de pendientes fuertes y longitudes largas. Se comprobó que después de dos a seis años de transformado el sistema agroforestal, con eliminación de las especies forestales arbóreas, se presentaron en épocas lluviosas ocho derrumbes por Km², debido a la pérdida de estabilidad de los suelos como consecuencia de la suspensión del anclaje y amarre ejercido por los sistemas radicales de los árboles forestales, ya que al cortarlos se inicia un proceso de pudrición de las raíces.

Lo anterior es confirmado por varios autores quienes aseveran que un tiempo después de remover la vegetación en zonas montañosas, aumenta la frecuencia y la cantidad de deslizamientos y derrumbes.

Las raíces de las plantas aumentan la resistencia a la ruptura del suelo, en forma directa por reforzamiento mecánico e indirectamente por la extracción del agua del suelo por transpiración, haciendo que este permanezca en condición de campo, es decir con un contenido de humedad que permita el desarrollo normal de las plantas. El refuerzo mecánico se manifiesta en un aumento considerable en el componente cohesivo, debido al peso de la vegetación y a la interacción entre el suelo y las raíces. De ahí, que la vegetación al remover cantidades considerables de agua del suelo por evapotranspiración, disminuye su presión de poros. Por consiguiente cuando se remueve la vegetación se acelera la ocurrencia de deslizamientos, debido a que se aumentan las presiones intersticiales que disminuyen la resistencia a la ruptura del suelo en un 60%.

Suárez⁵ afirma que en lo referente a control de erosión se ha encontrado que donde hay árboles altos la erosión es menor que en el caso de arbustos. Además, se ha descubierto que las hierbas o malezas protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos. Resultados similares son reportados por Nordin citado por Suárez, quién afirma que en Malasia, la mejor protección contra la erosión y los deslizamientos, se obtiene estableciendo conjuntamente todos los sistemas de vegetación, incluyendo los musgos y demás variedades. “No hay mejor evidencia que mirar la naturaleza y observar cómo se conserva y protege ella misma”.

El efecto protector de la vegetación maderable en la estabilidad de laderas ha sido un tema muy debatido y estudiado en los últimos años y ha ganado un

⁵ SUÁREZ, D. J. 1998. Deslizamientos y estabilización de laderas en zonas tropicales. Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). Bucaramanga. 548 p.

reconocimiento considerable, especialmente en el reforzamiento dado por las raíces de los árboles a la resistencia a la ruptura del suelo.

La mayoría de estudios relacionados con el tema, se han desarrollado en Austria, Canadá, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Japón, Nepal y Alemania y ahora último por Rivera y Barrera en la Zona Cafetera Colombiana.

Los movimientos masales se han constituido en uno de los fenómenos naturales más destructivos que afectan a los humanos en el mundo, causando grandes catástrofes, víctimas humanas y pérdidas por miles de millones de dólares cada año tanto en zonas urbanas como rurales.

2.1.2. Desarrollo de la bioingeniería

Si bien, el uso de la vegetación para estabilizar taludes y laderas es muy antiguo, las primeras experiencias documentadas del uso de la vegetación se dieron en Alemania, Suiza y Austria, en Europa y Estados Unidos y Canadá, en América. Aunque el uso de la bioingeniería ha sido exitoso, el volumen de casos documentados parece aun reducido para conocer el verdadero potencial de estas técnicas.

Morgan y Rickson⁶ entre otros, consideran que las técnicas usadas tradicionalmente en ingeniería para estabilizar taludes con muros de gaviones y otras estructuras inertes, conocidas como “soluciones grises”, no son sostenibles en el largo plazo debido a su alto costo inicial incrementado con los costos de reparación y mantenimiento, debido al deterioro de los materiales; comparadas estas técnicas con las de bioingeniería, identificadas como “soluciones verdes”, las cuales han demostrado ser más rentables, si se tiene en cuenta el menor costo inicial de la vegetación por tratarse de material del sitio y su capacidad de regenerarse y responder dinámicamente y de manera natural a los cambios en las condiciones del sitio sin comprometer o perder las propiedades mecánicas. Se mencionan muchos ejemplos en los cuales las soluciones con muros o concreto han sido reemplazadas por técnicas que usan vegetación, tanto en estabilización de taludes como en canalización o fijación de cauces en torrentes y ríos, con efectos aparentemente más ventajosos desde el punto de vista hidráulico, estético y económico. Dados esos resultados hoy día se percibe un creciente interés de los ingenieros por el papel potencial de la vegetación en trabajos de ingeniería.

⁶ MORGAN R.P.C.; RICKSON R.J. 1995. Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach. E & FN Spon London.271 p.

Por lo demás es importante destacar que la diferencia en costo de las “soluciones grises” convencionales y el uso de “soluciones verdes” con vegetación puede ser significativo en zonas donde la disponibilidad de materiales como el concreto, tablestacas, recubrimientos ligeros, gaviones, es relativamente restringido e inaccesible económicamente como ocurre en algunos países en desarrollo, donde además persisten condiciones de atraso en el nivel tecnológico.

2.1.3. Aplicaciones de las técnicas y prácticas de bioingeniería

La bioingeniería se originó en el campo forestal con diferentes tipologías y criterios de intervención, para proteger suelos de ladera, recuperar ambientalmente las minas, controlar la erosión en botaderos y otras áreas degradadas y embellecer el paisaje. Se usan las plantas, combinadas o no con materiales inertes, con el fin de proteger de la erosión o reforzar los taludes, revegetalizar las laderas y recuperar los cauces frente a socavación, mediante obras de fijación de orillas o control torrencial.

Como un valor agregado muy atractivo, además de servir para recuperar o preservar la estabilidad del terreno, la bioingeniería reduce el impacto visual de las obras de ingeniería en general, con beneficios ecológicos, paisajísticos, económicos (menor costo) y sociales (mayor mano de obra), y en algunos casos con el aprovechamiento de los cultivos incorporados.

En la Tabla 1, se describe la manera como las técnicas y prácticas de bioingeniería contribuyen a recuperar el terreno afectado por erosión o por movimientos en masa en taludes, laderas o cauces, con algún valor agregado.

En la Tabla 2, se ilustran algunos Proyectos o Espacios de zonas urbanas donde se aplica la bioingeniería para diferentes propósitos.

Tabla 1. Técnicas y Prácticas de bioingeniería en taludes, laderas y cauces

Elementos del Relieve	Técnicas o Practicas	Efecto	Valor Agregado
Taludes	Coberturas vegetales combinadas o no con materiales inertes	Protección del suelo en superficie con algún reforzamiento en profundidad.	Contribución paisajística, ecológica, económica y social.
Laderas	Revegetalización o Reforestación.	Preservación de la capa vegetal y protección del suelo, control de la humedad	

Elementos del Relieve	Técnicas o Practicas	Efecto	Valor Agregado
	Prácticas de uso y manejo del suelo.	superficial y subsuperficial y refuerzo del suelo con incremento de la resistencia	
Cauces de torrentes y ríos	Obras de Corrección Torrencial y fijación de orillas	Reducción de la socavación de fondo y lateral con recuperación de orillas y vertientes.	

Fuente: Propia

Tabla 2. Aplicación de la bioingeniería en diferentes proyectos o espacios urbanos

Proyectos o Espacios	Propósitos
Carreteras y Caminos	Estabilización de taludes de cortes, terraplenes y rellenos de disposición, principalmente en zonas de ladera. Reducción de aporte de sedimentos a los canales de drenaje y cauces en general
Extracciones Mineras	Recuperación Ambiental
Parques, Senderos Peatonales y otras zonas de recreación	Ambientación, Paisajismo, Protección
Zonas de pantanos y otras degradadas	Recuperación y rescate para el desarrollo

Fuente: Propia

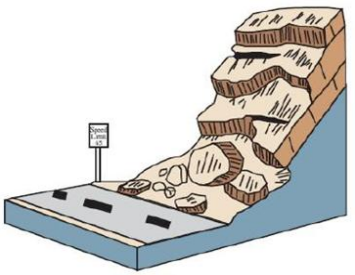
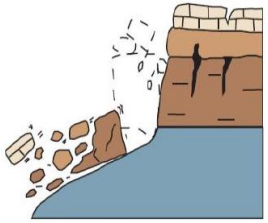
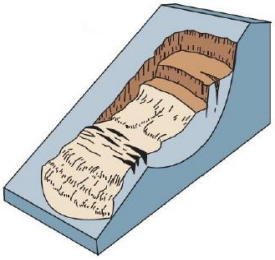
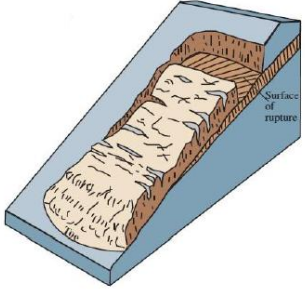
2.2. Marco Teórico

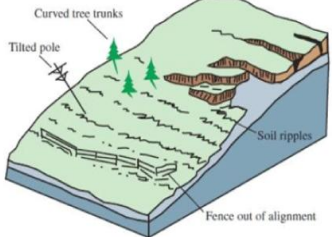
2.2.1. Procesos de Remoción en Masa

Para entender el papel de la vegetación en la prevención y control de la erosión es indispensable conocer la naturaleza de los procesos a combatir, comprender las propiedades de la vegetación que tienen que ver con los tratamientos y tratar de cuantificar el efecto combinado de las plantas y las estructuras para diferentes situaciones.

La Remoción en Masa comprende la transferencia de materiales de la tierra por acción directa de la gravedad, con alguna contribución de los agentes de transporte. Al respecto se consideran en este escrito cinco tipos de movimientos

Tabla 3. Tipos de movimientos asociados a procesos de remoción en masa.

TIPOS DE MOVIMIENTOS	DEFINICIÓN	FIGURA
<p>CAIDAS</p>	<p>En este tipo de movimiento una masa rocosa de cualquier tamaño se desprende de un talud empinado, a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre muy poco o ningún desplazamiento, descendiendo principalmente a través del aire por caída libre, a saltos, rondando, etc.</p>	
<p>VOLCAMIENTOS</p>	<p>Consiste en la rotación hacia delante de una unidad o varias, con respecto a un punto en su parte inferior, por acción de la gravedad y de fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos en las grietas.</p>	
<p>DESIZAMIENTO ROTACIONAL</p>	<p>Son deslizamientos de masas de suelo a lo largo de una superficie cóncava bien definida, es en esencia una rotación alrededor de un eje paralelo al talud</p>	
<p>DESIZAMIENTO TRANSLACIONAL</p>	<p>Consiste en el movimiento de cualquier tipo de material a lo largo de superficies casi planas, conformadas por discontinuidades de cualquier tipo, ya sea estratificación, diaclasamiento, perfil de meteorización o cualquier cambio en las propiedades mecánicas en la continuidad del material</p>	

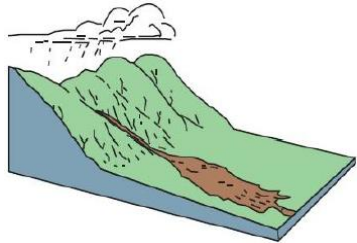

TIPOS DE MOVIMIENTOS	DEFINICIÓN	FIGURA
<p style="text-align: center;">CREEP</p>	<p>Movimiento imperceptiblemente lento, intermitente o continuo de las laderas bajo esfuerzos de corte suficientes para producir deformación permanente, pero inferiores a los requeridos para superar la resistencia al corte.</p>	

Fuente: Propia, Imágenes USGS.

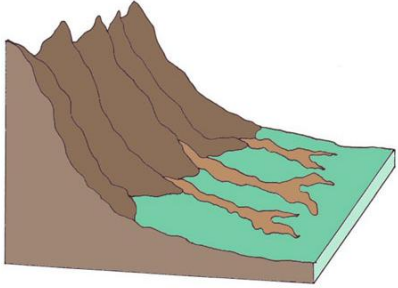
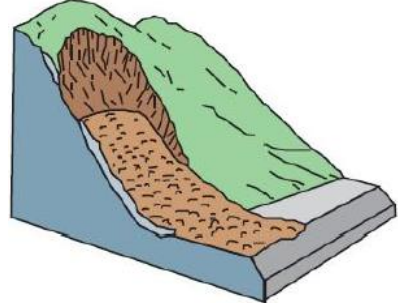
a. Movimientos en masa Hidro-gravitacionales

Se trata de movimientos de tipo viscoso en los cuales la mayor parte de los materiales se desplazan en condición húmeda. Los tipos más comunes de flujos se describen a continuación según los definen Jakob, M. and Hungr O⁷ :

Tabla 4. Movimientos Hidro-gravitacionales asociados a PRM.

TIPOS DE MOVIMIENTOS	DEFINICIÓN	FIGURA
<p style="text-align: center;">FLUJOS DE DETRITOS</p>	<p>Flujo muy rápido (3 m/min - 180 m/hora) a extremadamente rápido (5 m/seg – 18 Km/hora) de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor que 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada.</p>	
<p style="text-align: center;">FLUJO DE TIERRAS</p>	<p>Se forman en suelos o materiales provenientes de meteorización de las rocas, que pierden su estabilidad estructural por efectos del agua, originando desplazamientos con forma alargada, lobuladas en su extremo inferior.</p>	

⁷ JAKOB, M. AND HUNGR, O., Eds., 2005, *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer Verlag, Heidelberg, Germany, in association with Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK. (27 chapters, 720 pages).

TIPOS DE MOVIMIENTOS	DEFINICIÓN	FIGURA
<p align="center">FLUJO DE LODOS</p>	<p>Flujo canalizado muy rápido (3 m/min) a extremadamente rápido (5 m/seg) de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad mayor al 5%).</p>	
<p align="center">AVALANCHAS</p>	<p>Flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos (3 m/min) a extremadamente rápidos (5 m/seg), sobre una ladera de pendiente fuerte.</p>	

Fuente: Propia. Imágenes USGS.

2.2.2. Criterios de falla de Mohr-Coulomb

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Los ingenieros deben entender la naturaleza de la resistencia cortante para analizar los problemas de la estabilidad del suelo, tales como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

Mohr (1900) presentó una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante. Así entonces, la relación funcional entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla se expresa en la forma:

$$T_f = f(\sigma)$$

donde

T_f = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

σ = esfuerzo normal sobre el plano de falla

La envolvente de falla definida por la ecuación anterior es una línea curva, como muestra la Figura 2. Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776). Esta relación se escribe como:

$$T_f = C + \sigma \tan \varphi$$

donde

C = Cohesión

φ = ángulo de fricción interna

La ecuación precedente se llama *criterio de falla de Mohr-Coulomb*.

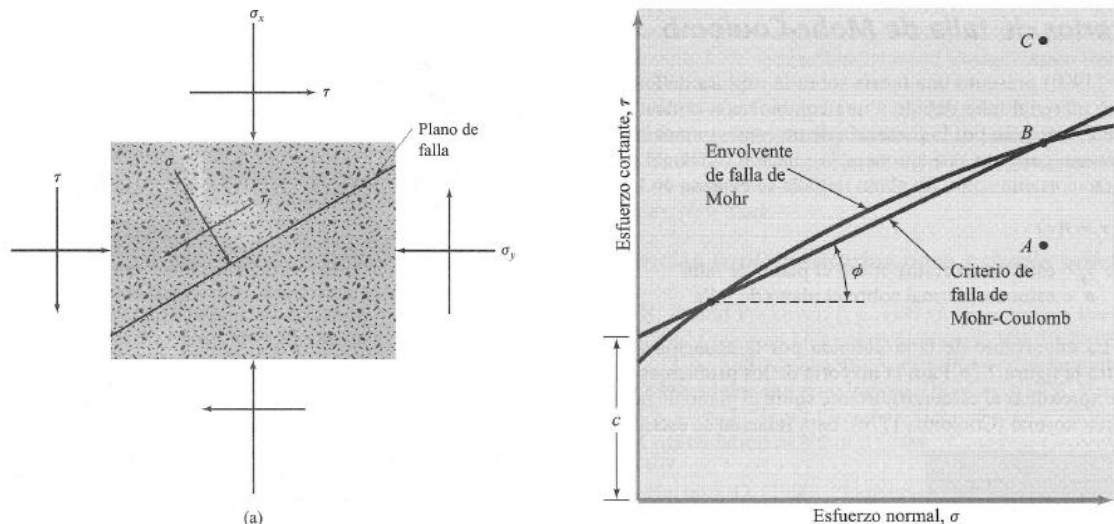


Figura 2. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb

Fuente: Adaptado de "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.1998"

El significado de la envolvente de falla se explica como sigue: si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A en la Figura 2, entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano.

Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto B (que se encuentra sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Un estado de esfuerzo sobre un plano representado por el punto C no existe porque éste queda por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habría ocurrido en el suelo.

2.2.3. Modelos Geotécnicos aplicados a la Estabilidad de Taludes

2.2.3.1. Técnicas de Análisis

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad 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:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al Corte}}{\text{Esfuerzo Cortante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$FS = \frac{\text{Momento Actuante}}{\text{Momento Resistente}}$$

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. Generalmente, los métodos (Tabla 5) son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

Tabla 5. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Bishop Simplificado (Bishop 1995)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado U.S. Army Corps of Engineers-1970	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Método del talud infinito	Superficie de Falla paralela a la superficie del Talud	De fuerzas	Es un sistema muy rápido y sencillo para determinar el Factor de seguridad de un talud, suponiendo un talud largo con una capa delgada de suelo, en el cual cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud. Suposiciones: Suelo isotrópico y homogéneo, Talud infinitamente largo y Superficie de falla paralela al talud

Fuente: Adaptado de “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.1998”

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie.

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$FS = \frac{\Sigma \text{ Resistencia al Corte}}{\Sigma \text{ Esfuerzo Cortante}}$$

2.2.4. *Guadua Angustifolia*

La *Guadua Angustifolia* es una gramínea gigante de América. Taxonómicamente pertenece a la familia *Poaceae*, a la subfamilia *Bambusoideae* y al género *Guadua*, curiosamente esta planta no es un árbol y es preferible catalogarla como un pasto gigante. Esta especie se distingue de los demás bambúes por los culmos largos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares de forma triangular. Es un bambú endémico de América y fue descrito por primera vez por Kunth en 1822.

Esta especie ha sido seleccionada como uno de los 20 mejores bambúes del mundo debido a sus excelentes propiedades físico-químicas y es considerada como la más importante especie nativa de Colombia. Sus características físicas y mecánicas, su resistencia al ataque de muchos insectos y hongos y la gran cantidad de aplicaciones que puede tener en la vida diaria, han hecho que sea calificada como una de las especies más importantes del mundo. Desde 1966 autores como Maclure han ratificado a la *Guadua Angustifolia* como el bambú nativo más sobresaliente del hemisferio occidental.



**Fotografía 5. Guadales en la región del Eje Cafetero - Colombia.
Fotografía de César Duque y Marcelo Villegas.**

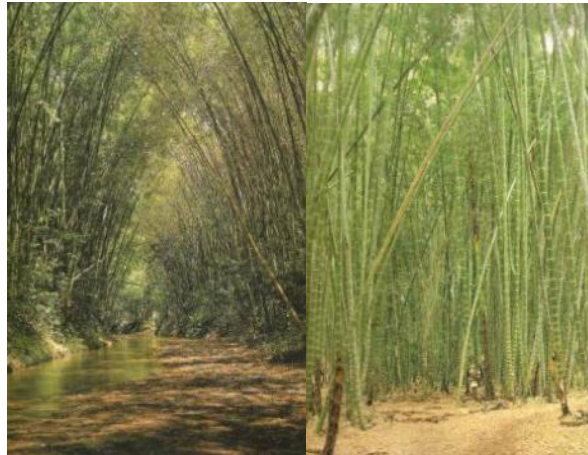
El género guadua se puede encontrar desde México a los 23° latitud Norte, hasta Argentina a los 35° latitud sur, y en alturas sobre el nivel del mar comprendidas entre los 0 m.s.n.m. a los 2800 m.s.n.m. En Colombia esta especie se encuentra principalmente en la cordillera central, exactamente en las zonas de ladera y en las riberas de los ríos y quebradas. El rango óptimo de temperatura varía entre los 20°C y los 26°C. Los suelos que más favorecen su desarrollo son los suelos fértiles, aluviales, derivados de cenizas volcánicas, ricos en materias orgánicas e irrigadas por fuentes naturales de agua⁸. Es una planta pionera, invasora y exigente en luz en su etapa de crecimiento. Las plantas provenientes de rebrotes en un guadua ya establecido, toleran la sombra tenue y los episodios de sol.

El bambú es un material que alcanza rápidamente, en cuestión de pocos meses o años, la resistencia necesaria para comportarse adecuadamente ante diferentes solicitaciones de carga. A pesar de no ser un material isotrópico, es posible conocer algunas características básicas como la resistencia última, el módulo de elasticidad, la densidad, el contenido de humedad natural, entre otros. Sin embargo para definir cualquiera de sus propiedades, en especial las propiedades mecánicas, es necesario conocer la orientación de las fibras de acuerdo a la propiedad que se esté analizando.

La guadua se encuentra compuesta en su tallo, por nudos y entrenudos, que en el caso de la guadua son huecos. Los culmos pueden tener hasta 25 m de altura y las distancias entre los entrenudos pueden variar entre los 10 y los 40 cm. Su corteza es delgada, pulida, lisa y brillante, de color verde amarilloso, aunque tiende a un amarillo opaco cuando se encuentra en su etapa madura. Cuando el tallo brota del suelo, este se encuentra con el máximo diámetro que tendrá en toda su vida, y a medida que aumenta en altura, el diámetro del culmo y el espesor de la pared, empiezan a disminuir hasta que alcanza la altura máxima.

Estas propiedades físicas de la guadua son una respuesta natural lógica a las cargas impuestas por el viento ya que la guadua debe resistir un momento flector más grande en el empotramiento, similar a lo que le sucede a una columna empotrada con voladizo. Por otra parte, el estado de esfuerzos que presenta la sección transversal de la columna indica que los mayores esfuerzos a compresión y tensión debidos a la flexión que impone el viento, se encuentran en las capas o paredes externas del material y es precisamente en esta zona donde hay una mayor presencia de fibras, las cuales son las que aportan en mayor grado, la resistencia mecánica del material.

⁸ OSORIO, Lina, TRUJILLO DE LOS RIOS, Efraín. Caracterización Físico Química de la fibra de Guadua Angustifolia Kunth. Universidad Nacional de Colombia. Colombia: Manizales, 2004.



**Fotografía 6. Guadales en el eje cafetero.
Fotografías de César Duque y Marcelo
Villegas.**

La guadua es un material natural, con un comportamiento mecánico bastante favorable para el uso estructural. La disposición de sus fibras, permite que el comportamiento a fuerzas axiales ejercidas en el sentido de las fibras sea muy bueno. Las fibras, y los conductos vasculares por los cuales la planta transporta sus nutrientes, presentan una alta resistencia mecánica a la tracción. Los vasos conductores, se encuentran revestidos por un tejido denominado parénquima, la cual aumenta la resistencia del material. Las propiedades físicas y mecánicas del bambú, dependen en gran parte de varios factores entre los que se encuentran, la edad, el culmo, el tipo de suelo, las condiciones climáticas, las épocas de cultivo y de corte, la clasificación de las muestras en función de la altura, la presencia de nudos y la aplicación de la carga.

Durante su crecimiento, la guadua reemplaza el CO₂ por oxígeno, los impactos ambientales que se generan durante su extracción son mínimos y sus tasas de renovación son mucho más altas que las de otros materiales similares como la madera, lo que la convierte en un material amigable con el ambiente. El bambú guadua, se ha constituido en un importante material para ser utilizado con fines estructurales, y se posiciona como una opción económica y ambientalmente viable para la fabricación de viviendas y demás obras civiles⁹

⁹ GHAVAMI, Khosrow. Propiedades físicas e mecánicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. PUC-Rio. Brasil: 2002.

2.2.4.1. Aspectos Generales de la guadua

La guadua es un material natural y por lo tanto sus propiedades físicas y mecánicas varían de acuerdo con su edad; según estudios realizados (Hidalgo, 2003), guaduas con edades entre 3 y 6 años se consideran maduras o “hechas”, es decir, su resistencia está completamente desarrollada y son aptas para la conformación de elementos estructurales. De igual forma cada guadua utilizada en la construcción de edificaciones debe contar con algún procedimiento de preservación, los procedimientos de preservación permitidos son los contemplados en la Norma Técnica Colombiana NTC5301 (ICONTEC, 2007).

Debido a que la guadua es un material higroscópico (atrae agua), es susceptible de cambios dimensionales y su resistencia se ve afectada de acuerdo con la variación de su contenido de humedad; así, el contenido de humedad de los culmos de guadua en el momento de la construcción debe estar cercano al contenido de humedad de equilibrio del lugar donde será usada, sin sobrepasar el 20% ni ser inferior al 10%. Esta práctica trae entre otros los siguientes beneficios: disminución de los cambios dimensionales y de forma de los culmos, aumento de la resistencia mecánica, disminución de la masa y por tanto de la densidad de los culmos, tornándolos en un material liviano apto para la construcción de estructuras sismorresistentes y aumento de la resistencia biológica de los culmos, disminuyendo su vulnerabilidad ante la pudrición y manchas causadas por hongos y mohos.¹⁰

2.2.4.2. Valores característicos, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad

La Tabla 6 presenta los valores característicos y la Tabla 7 los valores de esfuerzos admisibles para diferentes solicitaciones que serán usados para el diseño de los elementos de la estructura, presenta valores para diferentes condiciones de carga, en donde la fila A corresponde a los valores de esfuerzos admisibles para carga muerta, la fila B para carga muerta más carga viva y la fila C para carga muerta más carga viva más carga de viento o sismo.

Tabla 6. Valores característicos (MPa)

Flexión F_{kb}	Tensión II F_{kt}	Compresión II F_{kc}	Tensión \perp F_{kp}	Corte II F_{kv}
37.4	40.7	20.3	1.7	3.5

Fuente: Adaptado de “Revista en educación de ingeniería” ACOFI.

¹⁰ DESIGN METHODOLOGY FOR STRUCTURES THAT USE GUADUA ANGUSTIFOLIA AS STRUCTURAL MATERIAL BY ALLOWABLE STRESSES. Patricia Luna, Caori Takeuchi, Gustavo Granados, Fabian Lamus, Jorge Lozano. UN, Bogotá (Colombia)

Tabla 7. Esfuerzos admisibles (MPa)

	Flexión F_b	Tensión II F_t	Compresión II F_c	Tensión \perp F_p	Corte II F_v
A	8.3	9.0	4.5	0.4	0.8
B	10.4	11.3	5.6	0.5	1.0
C	12.5	13.6	6.8	0.6	1.2

Fuente: Adaptado de "Revista en educación de ingeniería" ACOFI.

La Tabla 8 muestra los valores de módulo de elasticidad. El valor usado para el análisis de los elementos estructurales debe ser $E_{0.5}$; en el caso de tener condiciones de servicio críticas o que requieran un nivel de seguridad superior, las deflexiones deben ser calculadas usando el $E_{0.05}$. En todo caso, la escogencia del módulo de elasticidad adecuado dependerá del criterio del ingeniero calculista y deberá corresponder a alguno de los valores mostrados.

Tabla 8. Módulo de elasticidad (MPa)

Módulo Promedio $E_{0.5}$	Módulo Percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo Mínimo E_{min}
13900	7800	3000

Fuente: Adaptado de "Revista en educación de ingeniería"

2.2.5. Trinchos en Guadua

Los trinchos son estructuras de guadua o madera dispuestas en forma de muro a fin de ayudar a formar terrazas para estabilizar taludes que han sufrido procesos de deslizamientos o en donde hay procesos de cárcavas. En estos casos su finalidad es estabilizar el terreno para ayudar a que la vegetación se establezca nuevamente y acabe de estabilizar el talud de forma permanente por el amarre de raíces.

También se utilizan para disipar la energía cinética del agua de escorrentía, de acequias, quebradas y ríos, en donde la fuerza del agua provoca socavamiento de los cauces y bordes. Muchos de los trinchos construidos para estabilizar taludes terminan por colapsar a causa del mal anclaje en profundidad y un exceso de altura en superficie. Realmente el amarre que debe hacerse es por debajo del nivel del suelo y los anclajes deben trabajarse sobre el horizonte B del suelo que es el horizonte firme. En caso de existir horizontes endurecidos, hardpan o

esquistos, es necesario perforar el horizonte hasta encontrar suelo firme en donde anclar las obras.

Es decir que debe excavarse en zanjas a una profundidad de por lo menos 1,4 a 2m. Sobre el fondo de esa zanja, se clavan los postes verticales de sostén, que deben quedar anclados como mínimo 1,2 m por debajo del nivel inferior de la zanja.

En superficie estas estructuras no deben ser mayores de 50 cm, Incluso pueden quedar totalmente enterradas. Cuanto mayor es la pendiente y la profundidad a la que se encuentra el suelo firme, mayor será la profundidad de anclaje.

En terreno de pendiente leve los trinchos pueden tener un anclaje de 50 a 70 cm. Pero en pendiente fuerte y terreno inestable la profundidad de anclaje puede llegar a ser de 2,5 m.

Cuando se utiliza guadua verde, las guaduas más profundas al quedar enterrada y en contacto con la humedad del suelo, limos y arcillas, se va petrificando hasta formar en el tiempo una estructura mineral debido a que los finos del suelo empiezan a invadir los microporos vegetales hasta fosilizar la estructura por completo. Las guaduas más superficiales y las estacas de nacedero y matarratón, pueden rebrotar dando origen a un guadual que amarrará el terreno de forma natural.

Dependiendo de la pendiente del terreno, será el distanciamiento entre trinchos, el cual se calcula según la ecuación:

$$D \text{ Trincho} = \frac{\text{Altura efectiva del trincho}}{\% \text{ Pendiente}} \times 100$$

Si la altura máxima del trincho en superficie es de 0.4m y la pendiente del terreno es de 50%:

$$Dt = \frac{0.4m \times 100}{50}$$

$$Dt = 0.8m$$

Es decir, que cada 80 cm será necesario colocar un trincho. Como puede resultar antieconómico, se construyen a 80 cm en las zonas más inestables y en el resto del área se hacen a una distancia mayor, cuidando de chequear en las temporadas de lluvia y reforzando en los sitios en donde se sigan presentando

surcos. No existen fórmulas infalibles y en el cálculo de este tipo de obras cuenta mucho en el sentido común y la experiencia en campo de quien las dirige.

La Figura 3 ilustra las especificaciones de trinchos para estabilización de taludes:

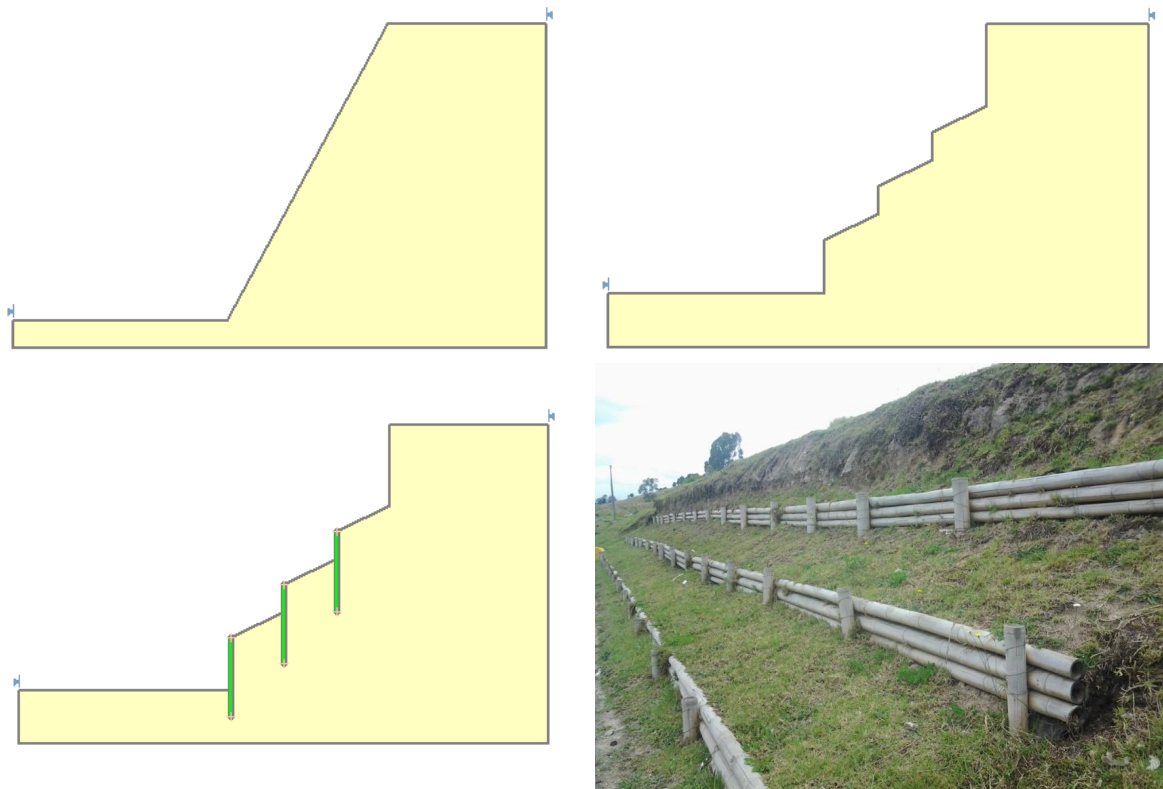


Figura 3. Forma de Construcción de un Trincho en Guadua y resultado final del Diseño e Implementación.

Según sea el proceso que se pretende estabilizar, puede o no ser necesario, dejar un vertedero en el centro del trincho.

Si se pretende estabilizar una cárcava en un clima más bien seco donde el régimen de lluvia es unimodal y no hay escurrimiento permanente de agua, los trinchos se construyen sin vertedero, pues su función es formar con el tiempo, terrazas de estabilización.

2.2.6. Naturaleza de la Zona de Estudio

2.2.6.1. Geología

1. Arenisca Labor Tierna (Ksgs).

Aflora ampliamente conformando los bordes de los anticlinales, mostrándose siempre en forma notoria en el paisaje con los escarpes pronunciados y zonas altas que separan las subcuencas y estrechan los valles y cauces de las corrientes, dando origen a los “Boquerones”.

La composición de las areniscas es de grano fino a medio, cuarzosas, con cemento calcáreo, localmente friables, presentando algunas intercalaciones limosas. Hacia la base de la secuencia se encuentran aproximadamente 20 m. de Plaeners que no fueron diferenciados. Debido a la formación de escarpes y taludes inclinados, se presentan desprendimientos de suelos y roca que dan lugar a formación de coluviones hacia el pie de los taludes.

La presencia de areniscas explica los relieves más fuertes en las divisorias altas y medias. Como la red de drenaje secundaria fluye perpendicularmente a los escarpes, es común encontrar formas de disección, en sentido perpendicular a la estructura, denominadas gargantas o clusas.

2.2.6.2. Geología Estructural

1. Falla El Porvenir

Estructura que es la continuación por debajo de los depósitos cuaternarios de la falla que bordea por el occidente a la serranía de Chía – Cota y que se extiende hacia el norte hasta Zipaquirá.

Es una falla inversa con vergencia al occidente, en su parte sur se localiza debajo de depósitos cuaternarios, pero es la responsable del levantamiento de la serranía de Chía colocando la Formación Conejo al nivel de los depósitos cuaternarios. En el sector norte desde la carretera Tabio-Cajicá, hacia Zipaquirá, su trazo entra a afectar rocas de las formaciones Dura, Plaeners y Labor-Tierna, esta última cabalga sobre la Formación Guaduas, en este sentido su desplazamiento va siendo menos importante y en Zipaquirá queda involucrada en el complejo bloque fallado que existe a causa del diapirismo de sal.

2. Anticlinal de Zipaquirá

Nombre utilizado inicialmente en la cartografía del Cuadrángulo K11. Está localizado en la parte norte de la Sabana y se extiende desde el límite norte del área hasta el sur de la localidad de Zipaquirá, en el cruce de la carretera Cajicá –

Tábío. El rumbo preferencial del eje es N400E, pero sufre algunas variaciones debido a las fallas de Zipaquirá y del Neusa, ésta última desplaza el anticlinal en sentido sinextral por 3 km. Su núcleo está desarrollado sobre rocas de la Formación Conejo y sus flancos por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor-Tierna y Guaduas. Al norte de la Falla del Neusa el anticlinal de Zipaquirá termina en la Falla de Carupa. Aunque la estructura completa solo es identificable hasta el cruce de la carretera Cajicá – Tábío, al sur de este se puede prolongar el flanco oriental del anticlinal hasta el sector de Liberia, en la parte central de la Sabana.

2.2.6.3. Geomorfología

1. Unidades Geomorfológicas de origen Estructural Denudativo

Corresponde a las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes en el área de Chía y Zipaquirá. Se presentan afectadas por procesos erosivos de moderada a baja intensidad y se caracterizan por su relieve montañoso a colinado de pendientes abruptas y escarpadas localmente.

Conforman el armazón estructural en dirección N-NE de la sabana de Bogotá, dejando valles amplios colmatados posteriormente por sedimentos fluviales y lagunares que constituyen en la actualidad las amplias planicies, hoy localmente colonizadas.

1.1. Cuchillas de Alta Montaña

Son geoformas de alta montaña que constituyen cuchillas, filos y altiplanos elongados, de relieve relativo bajo a moderado, de pendientes suavemente inclinadas a escarpadas de longitud larga a extremadamente larga, de formas predominantemente rectas y convexas. Desarrollan patrones de drenaje subparalelos a subdendriticos de moderada intensidad.

1.2. Relieves de Colinas Suaves

Comprenden un relieve de colinas suaves y planos denudacionales localizados en la región de la Sabana de Bogotá, particularmente en los municipios de Tabío, Cajicá, Sopo y Chía. Son de relieves de altitud relativa muy baja a baja, suavemente inclinada, a inclinada muy cortas a moderadamente largas a extremadamente largas, y de formas convexas y rectas. Desarrolla un patrón de drenaje subdendritico de densidad baja.

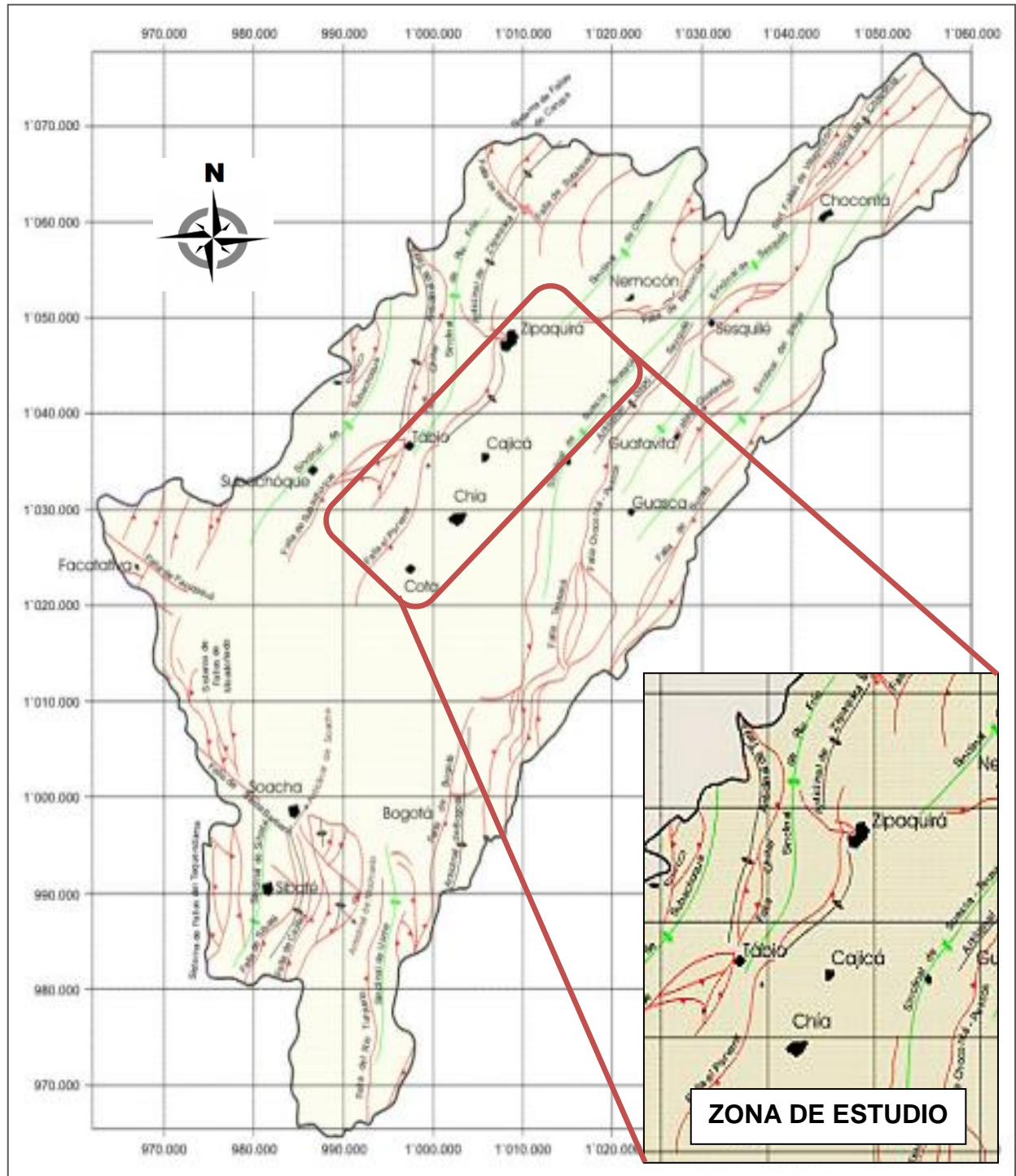


Figura 4. Mapa estructural de la Sabana de Bogotá.
Fuente: Adaptado de “Geología de la Sabana de Bogotá “

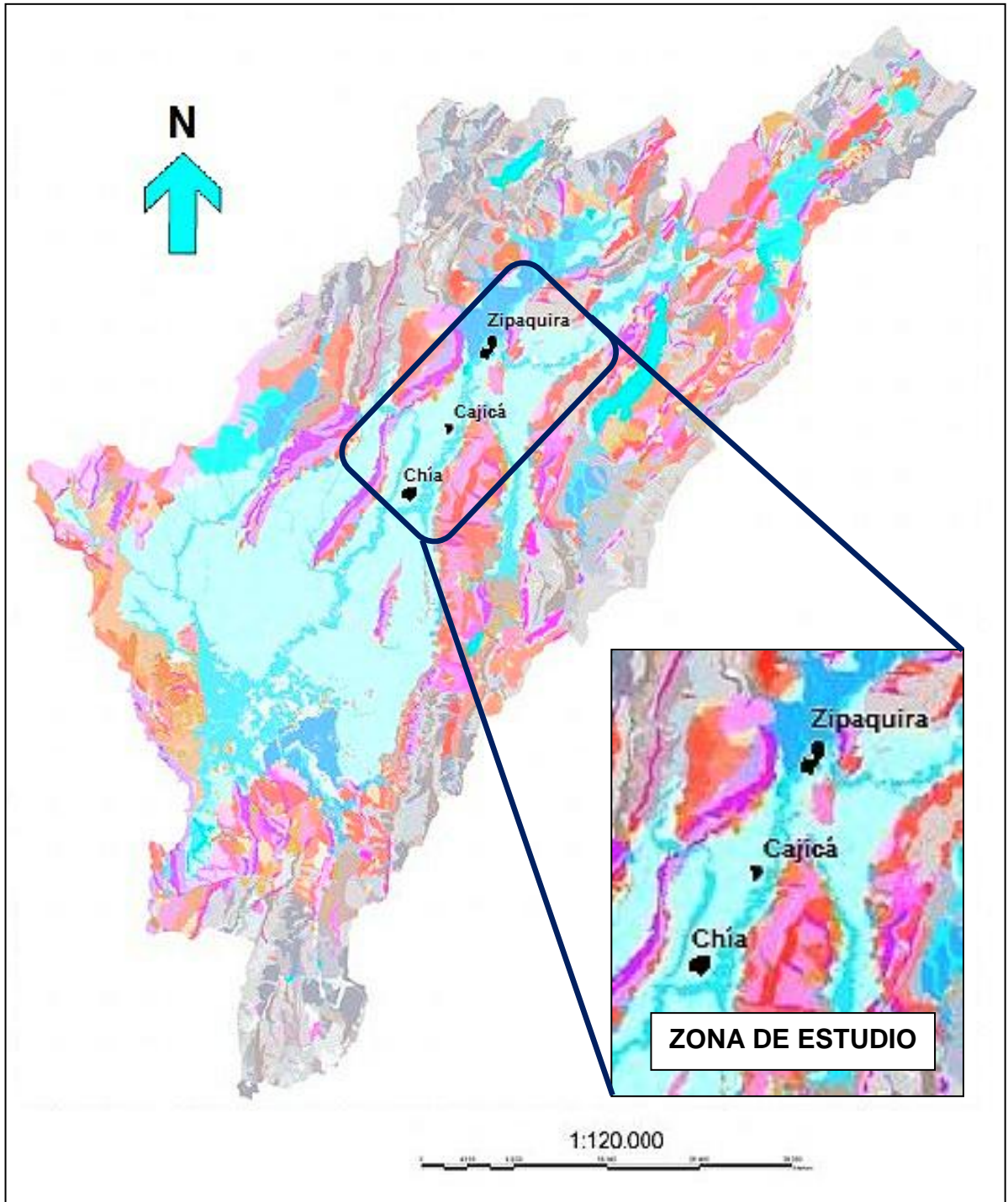


Figura 5. Mapa Geomorfológico de la Sabana de Bogotá
Fuente: Adaptado de “Geomorfología de la Sabana Vol.1 “

2.2.7. Reconocimiento e Identificación de la Zona de Estudio

La Zona de estudio se encuentra a la altura de la Vía que conduce de Chía a Zipaquirá pasando por el municipio de Cajica. La vía en su gran mayoría es concesionada, un tramo que pertenece a la Red Nacional de Vías que corresponde a la salida de Chía y un tramo de la conexión de Cajica con la variante principal que une a la vía perteneciente a la Concesión Devinorte (Figura 6).

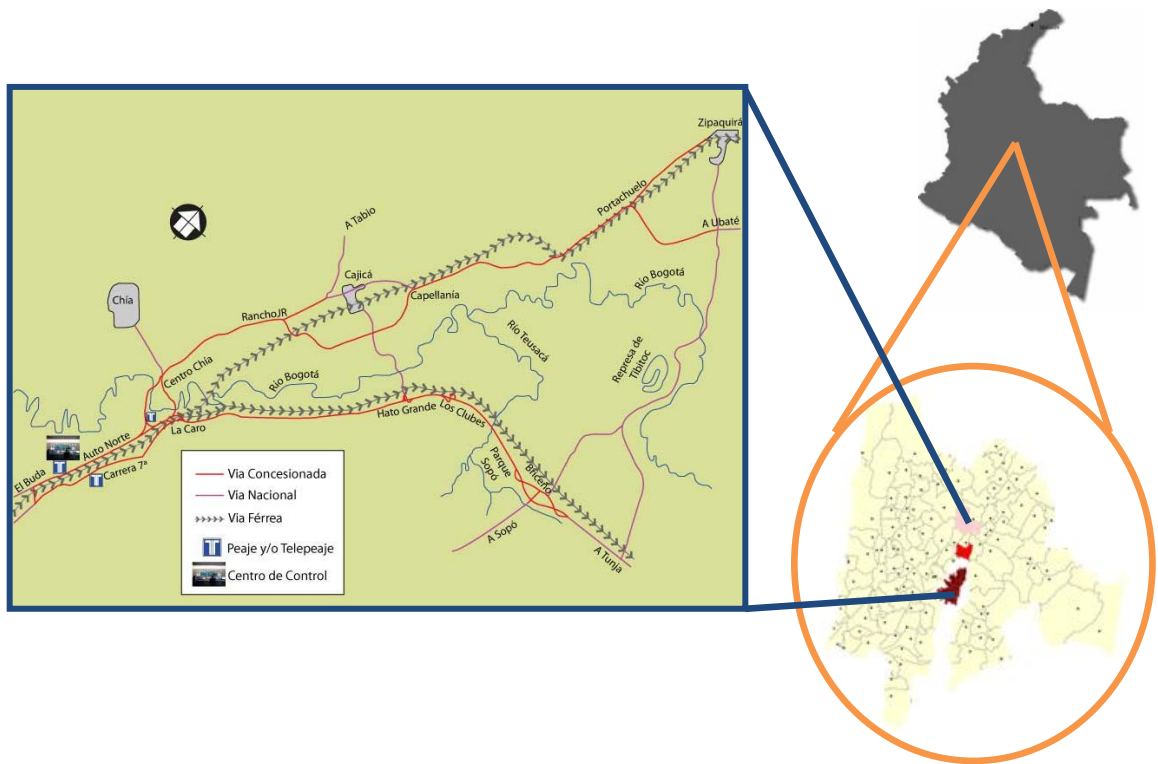


Figura 6. Esquema de ubicación geográfica de la Zona de Estudio
Fuente: Propia

En el recorrido de la vía se observó la presencia de diferentes tipos de industria y de canteras de explotación de material pétreo; también se encontró un gran número de zonas donde el principal uso del suelo era de tipo agrícola, cultivo de plantas y zonas de criadero de animales.

Los trinchos de guadua presentes en tramo vial correspondían a zonas de transición entre una serie de formaciones montañosas que finalizaban en un talud vial de poca altura para el cual se habían implementado los trinchos de guadua como medida de contención (Fotografía 7).

Estos trinchos se localizaban en la parte oriental del trazado vial y su sección longitudinal no excedía los 100m, conteniendo una gran cantidad de material previamente estabilizado mediante una serie de terraceos para reducir el riesgo de movimiento del talud.



**Fotografía 7. Trinchos de guadua como medida de control del Talud de la Vía Chía-Zipa
Fuente: Propia**



**Fotografía 8. Vista de perfil de los trinchos de guadua y las terrazas del talud
Fuente: Propia**

Las zonas identificadas como “pilotos” (Figura 7 y Figura 8) de las cuales se tomaría muestras de material, a través de una exploración superficial (Bloques y material suelto) fueron ubicadas mediante coordenadas geográficas (Latitud, Longitud) para obtener un posicionamiento exacto del lugar, lo que al momento de analizar la zona desde el punto de vista geomorfológico y geotécnico añadiría un detalle de precisión y un primer acercamiento a las características de la zona y al comportamiento del material en campo.

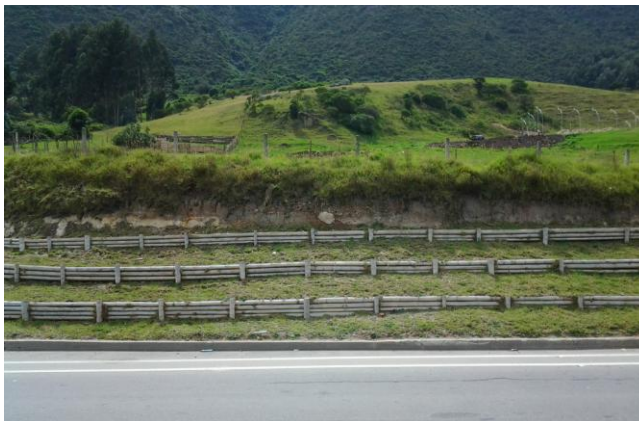


Figura 7. Ubicación Geográfica y Fotografía del Talud N°3
Fuente: Propia



Figura 8. Ubicación Geográfica y Fotografía del Talud N°4
Fuente: Propia

Adicionalmente, durante el recorrido se pudo evidenciar el uso de la bioingeniería en su gran mayoría, para el control de un talud vial en inmediaciones del municipio de Zipaquirá de mayor altura y con un mayor grado de pendiente, el cual da

prueba de que la bioingeniería como medida de control, recuperación y estabilización de taludes puede alcanzar diferentes magnitudes y proporciones.



Figura 9. Uso de empradizados, geotextiles y geomallas para la estabilización y control de un talud vial en cercanías del municipio de Zipaquirá
Fuente. Propia

2.3. Marco Jurídico

Dentro del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10) en el Título G Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua en el Capítulo G.12 Estructuras de Guadua se establecen los requisitos para el diseño estructural y sismo resistente de estructuras cuyo elemento resistente principal es el bambú Guadua Angustifolia Kunth. Una estructura de guadua diseñada de acuerdo con los requisitos de este Reglamento, tendrá un nivel de seguridad equivalente al de estructuras diseñadas con otros materiales.

Los requisitos avalados en este capítulo pueden ser utilizados para el diseño de elementos de estructuras construidas totalmente con guadua, o para estructuras mixtas de guadua y otros materiales.

Esta norma no se podrá utilizar para el diseño de ningún tipo de puente o estructuras diferentes de edificaciones, limitándose a aquellas cuyo uso sea vivienda, comercio, industria y educación. Este Capítulo se puede complementar con el capítulo E.7 “Bahareque encementado”, Capítulo E.8 “Entrepisos y uniones en bahareque encementado”, y capítulo E.9 “Cubiertas para construcción en bahareque encementado” del Título E “Casas de uno y dos pisos” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10).

2.4.1 La Normalización del Bambú-Guadua en Colombia

El 11 de septiembre de 2002 se inicia la consolidación del Comité Colombiano para la Normalización del Bambú/Guadua - CCNG, el cual queda constituido en enero de 2003 ante el ICONTEC como Comité Técnico 178 “Bambú - Guadua”.

Su objetivo es establecer una normativa común para la guadua y el bambú en Colombia, mediante un conjunto interdisciplinario de profesionales integrado por representantes de la industria, consumidores e interesados en general, los cuales mediante consenso establecen los requisitos fundamentales de calidad, seguridad, protección a la salud y medio ambiente, para productos, servicios, procesos o sistemas en torno a la guadua.

Además, trabajar paralelamente algunos temas de interés nacional con la ISO (Organización Mundial de Normalización). Este Comité está presidido por la SCB (Sociedad Colombiana del Bambú) y se reúne cada dos meses en diferentes ciudades del país. En la Tabla 9 se presenta la normatividad existente para la guadua:

Tabla 9. Normas técnicas para el control de la Guadua como material Constructivo

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTC 5300	Cosecha y Poscosecha de los culmos de Guadua angustifolia Kunth.
NTC 5301	Secado e inmunizado de los culmos de Guadua angustifolia Kunth
NTC 5405	Propagación vegetativa de Guadua angustifolia Kunth
NTC 5407	Uniones para estructuras construidas en Guadua angustifolia Kunth
NTC 5458	Artesanías y muebles en Guadua angustifolia Kunth
NTC 5525	Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua angustifolia Kunth

Fuente: Propia

La SCB ha realizado una campaña de difusión de las normas técnicas aprobadas o en proceso de aprobación por parte del Comité Colombiano para la Normalización del Bambú/Guadua-CCNG y del Instituto Colombiano de Normas Técnicas-ICONTEC, en todos los eslabones de la cadena de la guadua, realizando talleres de difusión en los Departamentos del Valle del Cauca, Quindío, Caldas, Huila y Bogotá.

3 DISEÑO METODOLOGICO

3.1 Enfoque de la Investigación

Un enfoque metodológico es la primacía de técnicas e instrumentos que se utilizarán en una investigación, de acuerdo a la naturaleza y variables propias del problema planteado.

El enfoque de la presente investigación presenta un modelo cuantitativo, al constituir un mayor nivel de variables matemáticas combinándolos a lo largo de todo el proceso investigativo.

Se utiliza este enfoque ya que permite la aplicación de los dos métodos en la consecución de un mismo objetivo, permitiendo reforzar o invalidar los resultados que se generen a partir de la presente investigación; comprobando la veracidad al obtener resultados similares o invalidándolos si son divergentes.

3.1.1 El Enfoque Cuantitativo

Utiliza la recolección y el análisis de datos que se obtengan a partir de los reconocimientos de campo y de las técnicas e instrumentación utilizada para generar una descripción geomecánica y estructural del terreno, partiendo de un talud piloto el cual servirá como modelo para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, y luego a partir de la iteración y el desarrollo matemático, aplicando diferentes metodologías de análisis para la estabilidad de taludes, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística, establecer con exactitud patrones de comportamiento para la generación de una metodología que apunte a una modelación cuantitativa.

3.2 Tipo de Investigación

Los tipos de investigación se refieren al alcance y finalidad metodológica que se pretende lograr en el proceso de investigación. El tipo de la investigación debe corresponder por un lado al enfoque escogido, y por el otro, determina los instrumentos a utilizar.

Esta investigación abarca en su proceso diferentes tipos de investigación, en función de los objetos y el alcance, planteados inicialmente, de la siguiente manera:

- Exploratoria

Exploración, descubrimiento de las posibilidades de un evento.

3.3 Fases de la Investigación

Para encontrar las causas y mecanismos de falla y poder cuantificar los parámetros que determinan la estabilidad del talud, diagnosticar y diseñar las obras de estabilización se incluirán las siguientes etapas:

3.3.1 Recopilación de Información.

Se debe hacer una búsqueda de documentos técnicos, mapas, estudios, informes, resultados de ensayos de laboratorio y artículos sean de orden primario o secundario en los cuales se desarrollen experiencias en bioingeniería y la implementación de trinchos de guadua, donde se pueda extraer información topográfica, geológica, geotécnica y estructural.

3.3.2 Análisis de la información existente.

Los deslizamientos ocurren en sitios específicos bajo ciertas condiciones topográficas, geológicas, climáticas y ambientales. Por lo tanto, es importante utilizar la información existente (historia del problema, planos básicos) con el fin de entender las condiciones topográficas, geológicas de los deslizamientos.

Adicionalmente a la verificación de la Información Primaria y Secundaria se debe hacer un riguroso chequeo y control de las diferentes metodologías implementadas en el análisis de los diferentes procesos de remoción en masa y la posterior obtención de datos producto de las metodologías implementadas.

3.3.3 Reconocimiento e identificación del sitio.

Previamente a la visita de campo se debe realizar un análisis general de la información existente y definir claramente el área de interés. El área a visitar debe incluir los taludes afectados o que se requiere analizar y las regiones adyacentes que pueden contribuir en las causas de los movimientos.

Los usos de la tierra, la irrigación para agricultura y otros factores en sitios aledaños pueden tener influencia determinante. Algunos deslizamientos pueden

originarse en un sitio y trasladarse distancias importantes, ladera abajo y se requiere analizar no solamente las áreas donde se producen, sino también las áreas que pueden ser afectadas, abajo del deslizamiento propiamente dicho.

La visita ofrece una visión tridimensional y se puede obtener una cantidad muy grande de información. Se obtiene el tipo o clasificación de los movimientos, sistemas de agrietamiento, tipo de suelo, afloramiento de agua y al final de la visita con mucho “sentido común”, se puede tener una visión global que puede equivaler a más del 50% de la solución del problema planteado.

3.3.4 Estudio de las características superficiales del sitio que permitan la caracterización topográfica y geotécnica.

Se debe estudiar la topografía en sí, las formas del terreno y los cambios de relieve. De este análisis se pueden separar los varios tipos de forma del terreno y se obtienen algunas claves tales como la naturaleza y estabilidad de los materiales que conforman una determinada topografía. La claridad de la información depende de la hora de toma de las fotografías y en ocasiones se obtienen fotografías que hacen muy visibles los escarpes y discontinuidades topográficas.

El área a investigar depende del tamaño del proyecto y de la extensión de los factores geológicos y topográficos que afectan el problema a estudiar. Cuando se buscan movimientos potenciales que no se han desarrollado, el área a investigar no se puede determinar por adelantado.

Todo talud debe diseñarse para algo más que las peores condiciones climáticas que se esperen, de lo contrario se puede llegar a conclusiones optimistas que tienen un nivel muy alto de riesgo.

3.3.5 Investigación de campo

La exploración subsuperficial incluye sondeos superficiales. La investigación debe planearse en la siguiente forma:

- Definir con anticipación la geología del terreno para poder determinar el tipo y característica de la investigación.
- Determinar los sistemas de investigación subsuperficial.
- Determinar frecuencia y tipo de muestras.

Los objetivos generales de los sondeos son:

- Identificar y caracterizar las formaciones más débiles que pueden afectar el movimiento.
- Identificar la distribución subsuperficial de materiales.
- Cuantificar las propiedades físicas de los materiales (humedad, gradación, plasticidad, resistencia al corte y otras propiedades) para emplearlos posteriormente en el análisis de estabilidad.

Se pueden utilizar apiques manuales, zanjas de exploración, sondeos manuales o sondeos mecánicos. El espaciamiento de los sondeos depende del tamaño y características del movimiento. Para una zona donde se sospecha pueda ocurrir un movimiento se sugiere un sistema de cuadrícula de sondeos, y donde ya ocurrió el deslizamiento se requieren sondeos por dentro y por fuera del movimiento.

3.3.6 Pruebas de Laboratorio.

Con las muestras tomadas en campo y los resultados de la información recolectada, se llevaran a cabo una serie de ensayos de laboratorio que permitan conocer las características geotécnicas del terreno y clasificarlo geotécnicamente dependiendo de los parámetros arrojados en el laboratorio a través de ensayos de Humedad, Pesos unitarios, Corte Directo; datos que alimentaran los modelos de análisis de estabilidad del talud y permitirán una comprensión física del comportamiento del material y de las posibles causa y efectos detonantes que se analizaran.

3.3.7 Análisis de la información obtenida, metodología y diseño.

El análisis de la información se ejecutara sistemáticamente siguiendo un proceso donde se inicia con el análisis de los datos obtenidos en campo y la cuantificación de los mismo a través de los diferentes ítems a relacionar dentro de la metodología aplicados al análisis de taludes; posteriormente se debe adaptar al modelo sugerido, identificando las diferentes variables a definir, desarrollando una por una y validándolas a la par.

Finalmente, se debe correr el modelo, de manera que permita evidenciar si la metodología y las variables empleadas en la ejecución y desarrollo de la misma son las indicadas, y si es debido el caso, una vez ejecutada, realizar una análisis de datos que permita calibrarla y adaptarla en la medida que se asemeje mucho más a la realidad.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Recopilación de Información.

La búsqueda de la información tanto primaria como secundaria tuvo un enfoque a documentos que por un lado suministraron información sobre bioingeniería y el uso de la guadua como elemento estructural de control, prevención y mitigación de procesos de remoción en masa; y por el otro, información que alimento el proceso de análisis y consolidación de datos, así como del modelo a implementar, añadiendo fundamento teórico, de tipo geotécnico y estructural como una base sólida para el diseño de la metodología.

Los documentos de referencia son textos y normativas generados en y para el campo de la ingeniería, como artículos y experiencias validadas por diferentes profesionales en la práctica de la bioingeniería, y con énfasis o enfoque en las experiencias exitosas del uso de la guadua como elemento de control de PRM para taludes.

A continuación se relaciona una tabla que cita los documentos utilizados para la conformación y alimentación del marco teórico del presente documento y su implementación en pequeña, mediana o gran manera dentro de la construcción del modelo y el diseño metodológico de la implementación de los trinchos de guadua, así:

Tabla 10. Información Primaria y Secundaria consultada dentro del desarrollo de la investigación

Nombre del Documento	Autor	Año
Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales	Jaime Suarez Díaz	1998
Fundamentos de Ingeniería Geotécnica	Braja M. Das	No Especifica
Manual de Construcción con Bambú	Oscar Hidalgo Lopez	No Especifica
Presiones de tierra sobre estructuras de contención en condiciones de suelos inestables	Jaime Suarez Díaz	No Especifica
GEOLOGÍA DE LA SABANA DE BOGOTÁ	INGEOMINAS (SGC Actualmente)	2005
ZONIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ	INGEOMINAS (SGC Actualmente)	2005

Nombre del Documento	Autor	Año
Puentes en Guadua: Pasos sobre Material Constructivo Eficiente	Revista M&M	2006
Utilización del Bambú (<i>Guadua Angustifolia kunth</i>), como una alternativa sostenible de construcción de viviendas en la zona atlántica de Costa Rica.	N. Rodríguez, W.O. Dill, P. Bidegaray, R. Botero	2006
Análisis Probabilístico de Estabilidad de Taludes	Alejandro Kerguelen (U. Andes)	2009
REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10, Título G — Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua	Comisión asesora permanente para el Régimen de construcciones Sismo resistentes	2010
Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua <i>Angustifolia Kunth</i>	Mateo Gutiérrez González	2011
Metodología de diseño de estructuras en <i>Guadua Angustifolia</i> como material estructural por el Método de Esfuerzos Admisibles	Revista Educación en Ingeniería (UNAL)	2011

Fuente: Propia

4.2. Análisis de la información existente.

Una buena fuente de información, precisa y necesaria para la modelación de los taludes y su posterior análisis cinemático fue la consultada a través de la bodega de información del FOPAE. Esta búsqueda de información consistió en la obtención de diferentes estudios y sondeos realizados en diferentes lugares de la Bogotá Urbana, lugares en los cuales se presentaron fenómenos de remoción en masa clasificados en amenaza alta, y en los cuales el FOPAE como ente responsable de la respuesta ante esta serie de sucesos realizó algún estudio o informe para determinar las características principales del lugar, tanto de origen geológico, geomorfológico como geotécnico con lo cual emite un diagnóstico o si fuese necesario el caso, diseñar una obra que mitigara dicho fenómeno o proceso presente.

La información extraída fue la serie de sondeos y las características geotécnicas del suelo presente en la zona, con una simple condición, estos datos que se seleccionaron y que alimentaron el modelo fueron datos pertenecientes a la formación “Arenisca Labor Tierna”, ya que es la unidad aflorante en el sitio donde se realizó la presente investigación.

Tabla 11. Datos Geomecánicos Formación Arenisca Labor Tierna extraídos de los diferentes estudios y sondeos consultados.

Fuente	Formación	Leyenda	Material	γ (gr/cm ³)	c prom (kN/m ²)	Φ prom (°)
Art. Rocas Colombianas	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,19	-	-
Art. Rocas Colombianas	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,28	-	-
Investigaciones geotécnicas Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,185	145	35,75
Indesa Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,43	93	40,5
Indesa Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,43	80	32,88
Indesa Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,135	17	24
Geotec	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	1,93	237	63,64
Geotec	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	120	37,9
Geotec	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	104	51,6
Geotec	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	105	40
Geotec	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	124	41
UPES_Ingemetrica Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arcillolita	1,974	12	18
UPES_Ingemetrica Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,18	280	38
UPES_Ingemetrica Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	15	37
UPES_Ingemetrica Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arcillolita	-	12	28
Civiles Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	15	23
Civiles Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	-	36	25
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,225	-	33
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Lodolitas	-	70	31
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,6	61	36
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arcillolitas	2,1	66	30,3
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Lodolitas	-	10	36,8
Moya Y García Ltda	Labor Tierna	K2lt	Arenisca	2,21	75	58

Fuente: Propia

Luego de recopilar los datos geomecánicos de la formación, se desarrolló un análisis estadístico con el fin de determinar un dato representativo de la formación, que sumara a los datos obtenidos en laboratorio, y con los cuales se pudiese modelar el talud para determinar su grado estabilidad. A los datos obtenidos se les aplico una distribución normal que dentro de la estadística, es una de las

funciones que más se asemeja a los fenómenos reales o naturales. La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos justificándose al asumir que cada observación o dato se obtiene de la suma de algunas causas independientes.

El proceso realizado consistió en la graficación de los valores de Peso Unitario, Cohesión y Fricción versus los resultados de la distribución aplicada a los valores extraídos de los sondeos y estudios para cada parámetro. Una vez terminado el paso anterior, se grafico el resultado para asociar la distribución y el comportamiento de los datos, buscando un dato representativo para cada parámetro de la formación.

El resultado del análisis estadístico de los datos de la formación Arenisca se presenta a continuación en la Tabla 12 y en las figuras 10,11 y 12:

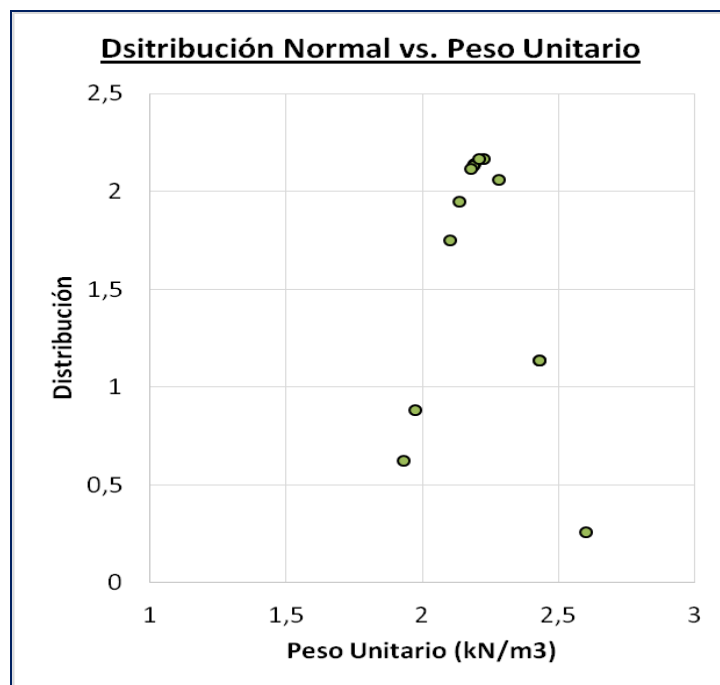


Figura 10. Distribución Normal aplicada al parámetro Peso Unitario
Fuente: Propia

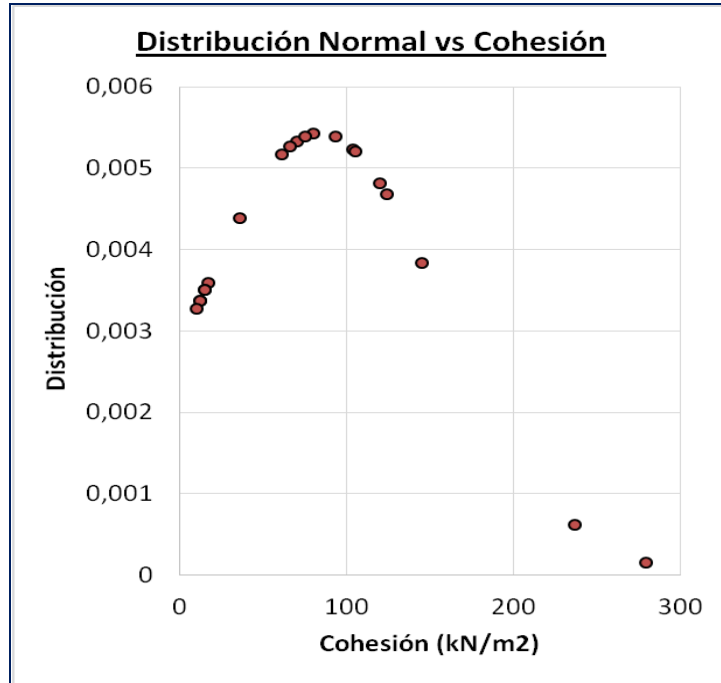


Figura 11. Distribución Normal aplicada al parámetro Cohesión
Fuente: Propia

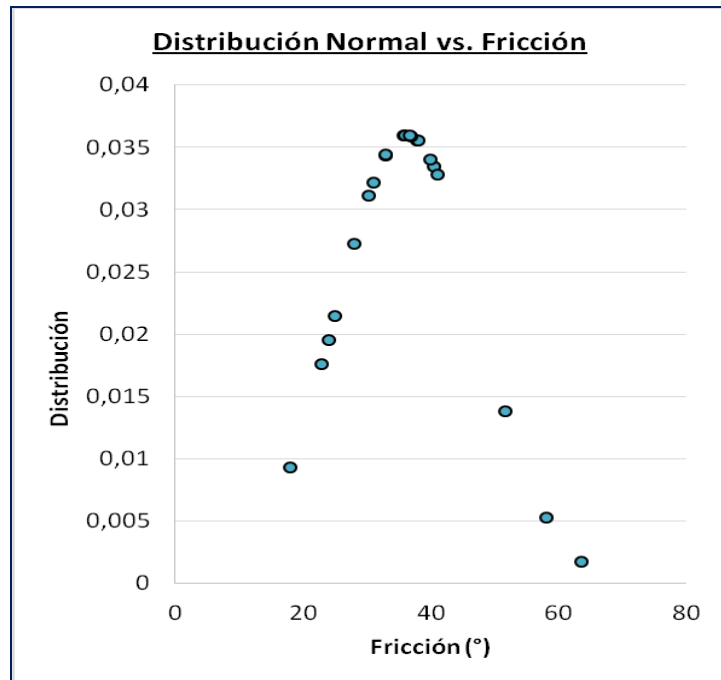


Figura 12. Distribución Normal aplicada al parámetro Fricción
Fuente: Propia

Tabla 12. Análisis estadístico mediante Distribución Normal para parámetros Geotécnicos de la Formación Arenisca Labor Tierna

Datos estadísticos	γ (kN/m³)	c prom (kN/m²)	Φ prom (°)
Media	22,2	83,850	36,256
Error típico	0,51	16,437	2,420
Mediana	21,90	72,500	36,000
Moda	24,30	12,000	#N/A
Desviación estándar	1,84	73,509	11,088
Varianza de la muestra	0,34	5403,608	122,937
Curtosis	3,63	1,910	1,094
Coefficiente de asimetría	4,90	1,365	0,892
Rango	6,70	270,000	45,640
Mínimo	19,30	10,000	18,000
Máximo	26,00	280,000	63,640
Suma	288,69	1677,000	761,370
Cuenta	13,000	20,000	21,000
Nivel de confianza (95.0%)	0,111	34,403	5,047

Fuente: Propia

Una vez terminado el análisis estadístico de los parámetros se tomaron como datos representativos de la formación los presentados en la Tabla 13:

Tabla 13. Datos representativos Formación Arenisca Labor Tierna

Datos Representativos		
γ (kN/m³)	C prom (kN/m²)	Φ prom (°)
2,190	72,500	36,000

Fuente: Propia

4.3. Reconocimiento e identificación del sitio

Durante el recorrido y la identificación de la zona se visualizaron diferentes taludes viales (Fotografía 9) de alturas promedio de 2m y 2.5m, los cuales se encontraban intervenidos para su control y estabilización a través de Trinchos de guadua y geomallas, taludes que visualmente permitían apreciar el buen comportamiento del trincho como medida bioingenieril de estabilización, y su fácil utilización a lo largo del recorrido vial, además, se apreciaba el buen estado en el que se encontraban y lo repetitivo de su uso a lo largo del tramo debido a su efectividad para este tipo de taludes y materiales (Fotografía 10).



Fotografía 9. Trinchos de guadua combinados con Geotextiles para el control de Taludes viales sobre la variante de la vía Cajica-Zipaquirá
Fuente: Propia



Fotografía 10. Taludes viales intervenidos con medidas bioingenieriles a lo largo del tramo Chía-Zipaquirá
Fuente: Propia

El criterio utilizado para la ubicación del talud piloto, el cual se analizaría geotécnicamente para determinar su comportamiento y en base a ello determinar el comportamiento de los trinchos de guadua, sería un talud en el cual los trinchos

trabajaran visualmente bien (Fotografía 11) y no se evidenciara algún tipo de inestabilidad o afectación al diseño estructural, con condiciones buenas de comportamiento geotécnico y de acceso a la zona. Para generar una comparación con el talud escogido, se buscaría un talud en el que se presentara algún proceso o fenómeno de remoción en masa, generando algún tipo de inestabilidad o problema para el funcionamiento de los trinchos como estructura de control y estabilización de taludes (Fotografía 12).



**Fotografía 11. Talud N°3 Trinchos de Guadua en buenas condiciones estructurales.
Fuente: Propia**



**Fotografía 12. Talud N°4 visualmente con problemas de control y presencia de Fenómeno de Remoción.
Fuente: Propia**

Una vez definidos y georeferenciados los sitios en los cuales se iba a desarrollar la investigación, se continuó con la fase de muestreo e investigación de Campo.

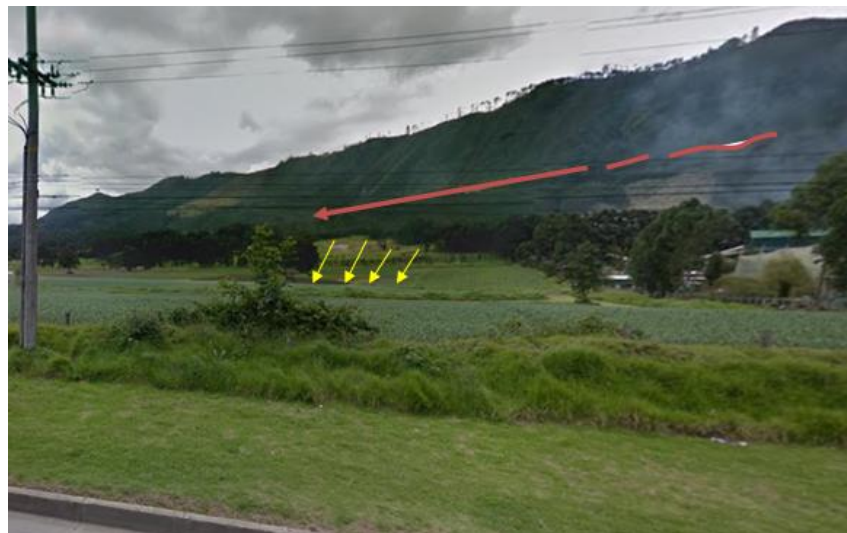
4.4 Estudio de las características topográficas y geotécnicas.

Durante toda la zona de estudio se encontró una topografía predominante (Estructuras de Origen denudativo) alternándose con diferentes geoformas que le dan sentido al paisaje del lugar y que validan la descripción geomorfológica del sitio descrita anteriormente (Numeral 2.2.7).

Se incluyen las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos.

En las zonas de piedemonte de las grandes estructuras homoclinales y particularmente en las laderas de contrapendiente se presentan laderas estructurales y de contrapendiente muy denudadas y localmente asociadas con suelos residuales gruesos.

Se diferencian por el cambio de pendiente menor con respecto a las inclinaciones escarpadas de las sierras homoclinales asociadas y por la litología predominantemente arcillosa.



Fotografía 13. Topografía y Geoformas del Sitio.

Fuente: Propia

Se evidencia una ladera estructural denudada limitada por hondonadas asociadas a glaciares de acumulación y coluviones.



Fotografía 14. Ladera de contrapendiente estructural al Noroeste de la Vía Cajica-Zipacquirá
Fuente: Propia

Se nota la suave pendiente de morfología ondulada suavemente relacionada con rocas arcillolíticas de la formación arenisca inclinadas en contra de la pendiente del terreno y con desarrollo de suelos residuales arcillosos.

Sumado a las laderas con bajas pendientes, con largas hondonadas se presentan prominencias topográficas de morfología montañosa ó colinada con laderas de longitud corta muy abruptas a escarpadas. Se presenta en rocas duras e intermedias con procesos denudativos y de remoción en masa locales.



Fotografía 15. Coluviones en la base de las Zonas Escarpadas
Fuente: Geomorfología de la Sabana Vol. 1

4.5 Investigación de campo

Considerando la importancia que ha de tener los valores a obtener en la exploración del sitio se considero fundamental la realización de actividades tendientes a investigar y determinar las propiedades geomecánicas de los suelos presentes en el área de estudio, esto con el objetivo de analizar detalladamente parámetros de resistencia que se requieren para el desarrollo e implementación de diferentes análisis de estabilidad y diseño para el desarrollo de una metodología inicial en la construcción e implementación de trinchos de guadua.

El trabajo de campo se basó y apoyó inicialmente en la verificación de la Zona de estudio con visitas de campo y la consulta de información secundaria que permitiera elaborar un marco de referencia acerca de datos y parámetros que se necesitarían para la implementación de diferentes análisis, satisfaciendo las variables y datos de entrada que estos requieren para su aplicación. Una vez recopilada la información secundaria, se concluyo que la base de datos elaborada que contenía los parámetros geomecánicos básicos de la Formación Arenisca Labor Tierna debía ser comparada con datos obtenidos en campo, realizando una verificación de lo encontrado en campo, determinando un dato representativo de la formación que permita desarrollar los análisis pertinentes.



**Fotografía 16. Trinchera superficial para la extracción de bloques de material
Fuente: Propia**

Definida la prospección del terreno se determinó la cantidad aproximada de exploración para ejecutar entre 2 y 3 sitios de exploración superficial en campo por talud. Los tipos de exploración que se definieron fueron los apiques y las trincheras (Fotografía 16) con el fin de tomar muestras de tipo bloque o muestra suelta las cuales suministrarán información de la estratificación del sitio de sondeo, y que al momento de analizarlas en laboratorio suministran la información geotécnica necesaria para complementar las bases de datos de los parámetros geomecánicos. Las profundidades variaron entre 0.5m y 1.5m esto debido a la conformación de los taludes en campo, que no permitían perforación de mayor profundidad.

Luego de tomadas las muestras en campo, donde se tomaron aproximadamente 10 Bloques de tamaño 0.2x0.2m y 5kg de material suelto, se trasladaron al laboratorio para realizar diferentes ensayos de laboratorio para determinar y caracterizar geotécnicamente el material recopilado y así complementar y determinar un valor representativo de la formación.



Fotografía 17. Muestras en Bloque extraídas de la Zona de estudio en la Vía Cajicá-Zipaquirá
Fuente: Propia

Adicionalmente se elaboro un perfil estratigráfico inicial de la zona, a partir del muestreo superficial realizado en campo, como se ve en la Figura 13 y Figura 14:



0.0-0.2 m

Limo negro arcilloso (Humus)

0.2m

Cambio

0.2-0.40 m

Limo arcilloso carmelito con abundantes raíces, arena fina

0.40m

Cambio

0.40-0.80 m

Arcilla Limosa habana amarillenta con lutitas, gris oscura altamente oxidada

0.80 m

Cambio

0.8-1.6 m

Arcilla limosa habana amarillenta, oxidada con gravas y lutitas

Figura 13. Perfil estratigráfico aproximado Talud N°3

Fuente: Propia



0.0 a 0.6 m

Limo negro arcilloso (Humus)

0.6m

Cambio

0.6 a 1.6m

Arcilla limosa habana amarillenta altamente oxidada, muy fisurada y con raíces

1.6m

Cambio

1.6 a 4.0m

Arcilla Limosa habana amarillenta con algo de arena fina con trazas de materia orgánica

Figura 14. Perfil Estratigráfico aproximado Talud N°4

Fuente: Propia

4.6 Pruebas de Laboratorio

Con el material extraído de los Taludes en campo mediante exploración superficial se elaboraron una serie de pruebas de laboratorio que permitieron determinar el tipo de material y conocer sus características geotécnicas para el desarrollo de los diseños y posteriormente su implementación en el desarrollo de la metodología.

Para la caracterización del material y la obtención de sus propiedades básicas (Peso Unitario, Humedad Natural, Cohesión y Fricción) se ejecutaron ensayos de Límites de Atterberg, Peso Unitario Parafinado y Corte Directo. Debido a que el 100% del material obtenido pasaba el tamiz n°200, no fue necesario hacer un ensayo de granulometría para determinar el tipo de suelo, y se direcciono al cálculo del Limite Liquido, Plástico e Índice de Plasticidad para las muestras mencionadas anteriormente, dando como resultado los datos presentados en el Anexo D y la descripción del material presentado a continuación:

- **Material 1 (Talud N°3)**
 - Limite Liquido Promedio = 33,75 %
 - Limite Plástico Promedio = 20,67 %
 - IP= 13,08
 - Material: CL
 - Color: Habana
 - Olor: Nada
 - Resistencia: Media
 - Dilatancia: Baja
 - Tenacidad: Baja
 - Plasticidad: Media

- **Material 2 (Talud N°4)**
 - Limite Liquido Promedio = 19,26%
 - Limite Plástico Promedio = 16,3 %
 - IP=2,97
 - Material: CL
 - Color: Rojizo
 - Olor: Nada
 - Resistencia: Media a Alta
 - Dilatancia: Nula
 - Tenacidad: Baja
 - Plasticidad: Media a Alta

Clasificando el suelo mediante el método USCS se determinó que el material presente en la zona de estudio es una Arcilla inorgánica de baja a media plasticidad con presencia de limos en gran cantidad y arena en baja cantidad.

Con el material ya clasificado, se procedió a elaborar unas probetas (5,0cmx5.0cmx2cm aprox.) para ejecutar un ensayo de consolidación y corte directo para determinar las propiedades de cohesión y fricción del suelo. Las probetas se construirían a partir de los bloques extraídos en campo y de un material remoldado, que previamente se lavo sobre el tamiz N°40 para quitar las arenas y obtener probetas elaboradas con material fino. Para cada Talud se ejecutaron tres ensayos de Corte Directo variando la carga axial entre 0.25, 0.5 y 1kN.

Luego de concluir los ensayos de Corte Directo se determinaron las propiedades de Cohesión y Fricción del Suelo. Para determinar el peso unitario del material se procedió a tomar una muestra mínima en bloque y se parafino, con este método se determinó la densidad unitaria del suelo a través de pesos parafinado y parafinado sumergido del material.

Los resultados de las pruebas de laboratorio se presentan en el Anexo 1, los parámetros definidos para los materiales son los presentados en la Tabla 14 :

Tabla 14. Parámetros Geotécnicos obtenidos en Laboratorio

Datos Muestras Talud N°3		Datos Muestras Talud N°4	
γ (kN/cm³)	18,3	γ (kN/cm³)	17,6
C (kN/m²)	17	C (kN/m²)	23,2
ϕ (°)	18,5	ϕ (°)	25,6

Fuente: Propia

4.7 Análisis de la información obtenida, diseño y metodología

Con la información obtenida de las pruebas de laboratorio se definieron los valores y propiedades de los materiales y se procedió a analizar el comportamiento y la probabilidad de falla de los taludes evaluado en campo con diferentes escenarios, un escenario donde se conserva le geometría original del talud y se aplican el sismo y la lluvia como detonantes, y otro donde se aplica un terraceo y la implementación de los trinchos con variación en la Luz de la estructura y con los mismos detonantes, el sismo y la lluvia, esto para modelar y obtener valores en las condiciones más críticas de diseño y también pensando en la implementación de estos tipos de estructuras bioingenieriles las cuales se utilizan en su gran mayoría en la zona cafetera colombiana, con variables climáticas, de precipitaciones variadas y con incidencia de fallas tectónicas activas.

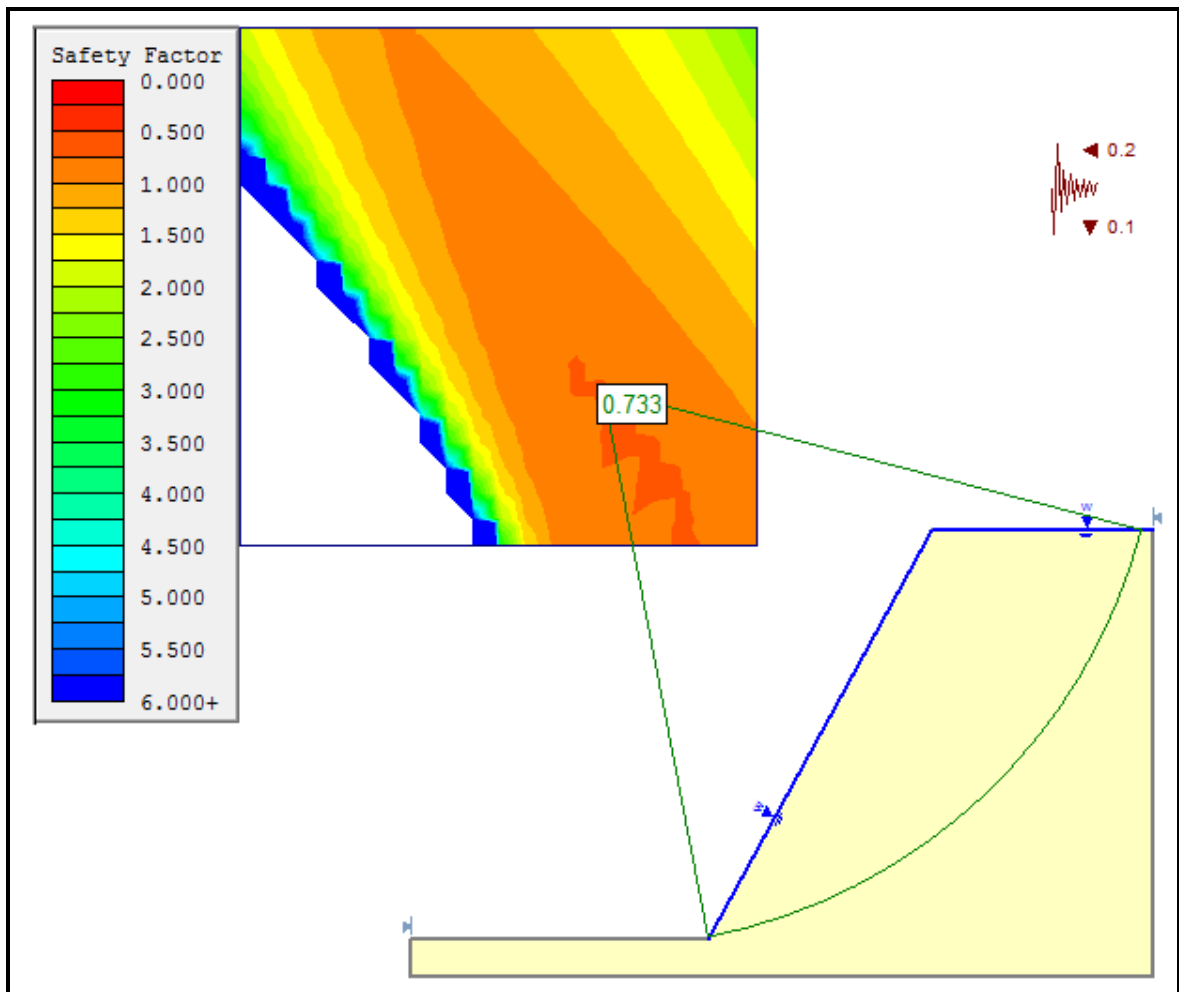


Figura 15. Talud N°3 con detonantes de Sismo y Lluvia

Fuente: Propia

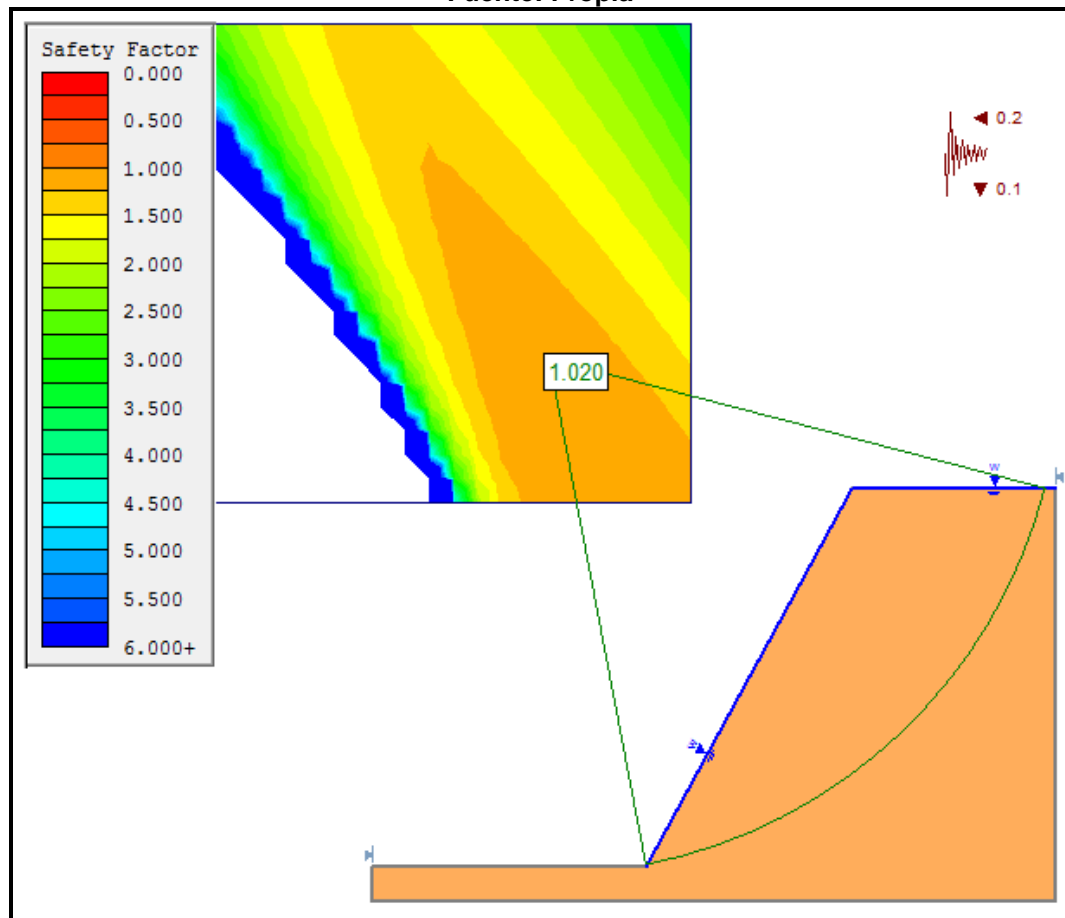


Figura 16. Talud N°4 con detonantes de Sismo y Lluvia
Fuente: Propia

Los valores de F.S. obtenidos en el análisis de los taludes anteriormente mencionados son relativamente buenos debido a que las condiciones geotécnicas del material permiten un buen comportamiento de las partículas del suelo, generando una mayor resistencia y oposición a la falla y a procesos originados por la meteorización o el intemperismo.

A su vez, en el Talud denominado como “Talud N°4” se registro la presencia de un proceso de remoción en masa el cual visualmente fue provocado por la altura libre que se dejo al momento de hacer un terraceo para disminuir la pendiente del talud y mejorar su condición de inestabilidad, sumado a las presiones que se generaron en dicha parte del talud por el material propio y adicionalmente los fenómenos de intemperismo y la posible erosión que se genera en el lugar. La Fotografía 18 y Fotografía 19 muestra el Talud en dos espacios diferentes de tiempo brindando un contraste en la evolución del Proceso de Remoción en masa.



Fotografía 18. Proceso de Remoción en Masa sobre Talud N°4 (Sept. 2013)
Fuente: Propia



Fotografía 19. Evolución del PRM sobre el Talud N°4 (Abril de 2014)
Fuente: Propia

Visualmente se puede concluir que el movimiento que se presenta en el talud es un flujo de tierras masivo, caracterizado por el traslado cuesta abajo de tierra y roca desgastada, paralelo a la superficie de la terraza, de velocidad lenta a muy lenta arrastrando una capa de material vegetal, originado por procesos fuertes de intemperismo y erosión. También se puede evidenciar las pocas condiciones de estabilidad del material aledaño al flujo generando un riesgo y una amenaza para la estructura de contención, en escala generando un problema futuro para la vía.

Para determinar el nivel de seguridad del talud, se realizó un análisis con diferentes metodologías para determinar su factor de seguridad, esto con el fin de determinar si el fenómeno de remoción incide en la estabilidad de la masa y podría activar o incidir en la generación de una superficie de falla debido a la carga generada por el material removido, así, se analizó a través de los siguientes métodos:

4.7.1. Método de Talud Infinito

Talud 3

$$FS_s = \frac{C + (\gamma h - \gamma_w \cdot h_w) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

$$FS_s = \frac{17 + ((18,3 * 3,42) - (10 * 3,42)) \cos 34,87 * \tan 18,5}{(18,3 * 3,42) * \sin 34,87}$$

$$FS_s = \frac{17 + (28,386 * 0,275)}{35,78}$$

$$FS_s = \frac{24,81}{35,78}$$

$$\boxed{FS_s = 0,7}$$

$$FS = \frac{C + (\gamma h) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

$$FS = \frac{17 + ((18,3 * 3,42)) \cos 34,87 * \tan 18,5}{35,78}$$

$$FS = \frac{17 + ((18,3 * 3,42)) * 0,275}{35,78}$$

$$FS = \frac{34,5}{35,78}$$

$$\boxed{FS = 1}$$

Talud 4

$$FSs = \frac{C + (\gamma h - \gamma_w \cdot hw) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

$$FSs = \frac{23 + ((17,6 * 3,42) - (10 * 3,42)) \cos 34,87 * \tan 25,6}{(17,6 * 3,42) * \sin 34,87}$$

$$FSs = \frac{23 + (25,992 * 0,393)}{34,413}$$

$$FSs = \frac{33,215}{34,413}$$

$$\boxed{FSs = 0,965}$$

$$FS = \frac{C + (\gamma h) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

$$FSs = \frac{23 + ((17,6 * 3,42)) \cos 34,87 * \tan 25,6}{(17,6 * 3,42) * \sin 34,87}$$

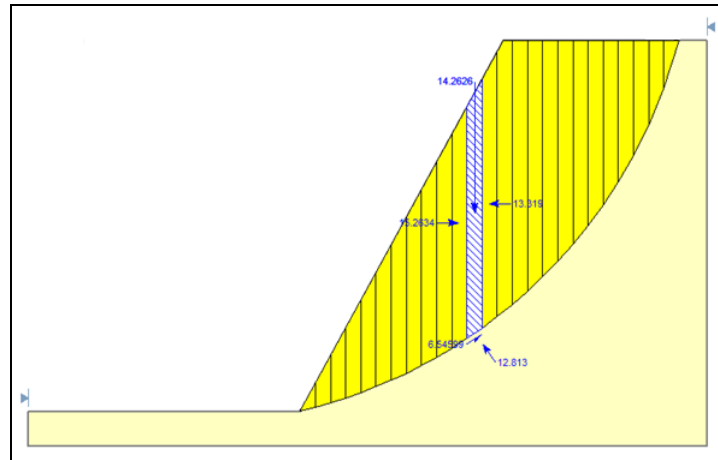
$$FS = \frac{23 + (60,192 * 0,393)}{34,413}$$

$$FS = \frac{46,65}{34,413}$$

$$\boxed{FS = 1,356}$$

4.7.2. Método de Fellenius

Talud 3



$$FSs = \frac{\Sigma(C'bSec\alpha + (W\cos\alpha - ubSec\alpha)Tan\phi)}{\Sigma Wsena}$$

$$FSs = \frac{\Sigma((17 * 0,272) * Sec30,205 + ((11,803 * Cos34,87 - (33,21 * 0,224) * Sec30,205) Tan18,5)}{\Sigma (11,803 * Sen30,205)}$$

$$FSs = \frac{(4,624 * 1,157) + (9,684 - 8,61) * 0,335}{5,94}$$

$$FSs = \frac{5,71}{5,94}$$

$$\boxed{FSs = 0,961}$$

$$FS = \frac{\Sigma(C'bSec\alpha + (W\cos\alpha)Tan\phi)}{\Sigma Wsena}$$

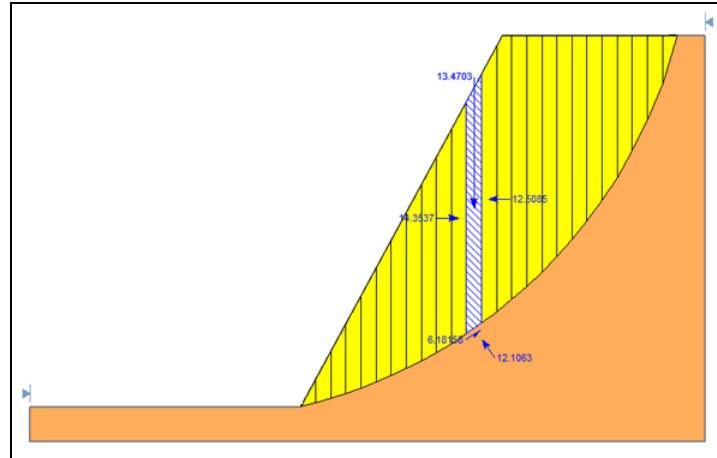
$$FS = \frac{(17 * 0,272 * Sec34,87) + (14,263 * Cos34,87) Tan18,5)}{14,263 * Sen34,87}$$

$$FS = \frac{(5,636 + 3,91)}{8,15}$$

$$FS = \frac{9,546}{8,15}$$

$$\boxed{FS = 1,2}$$

Talud 4



$$FS_s = \frac{\Sigma(C'bSec\alpha + (Wcos\alpha - ubSec\alpha)Tan\phi)}{\Sigma Wsen\alpha}$$

$$FS_s = \frac{((23 * 0,224 * Sec 30,205) + ((11,15 * Cos30,205) - (33,21 * 0,224 * Sec30,205)Tan25,6)}{11,15 * Sen30,205}$$

$$FS_s = \frac{((5,96) + (9,64 - (8,61 * 0,48))}{5,61}$$

$$FS_s = \frac{(5,96 + 0,493)}{5,61}$$

$$FS_s = \frac{6,453}{5,61}$$

$$\boxed{FS_s = 1,15}$$

$$FS = \frac{\Sigma(C'bSec\alpha + (Wcos\alpha) * Tan\phi)}{\Sigma Wsen\alpha}$$

$$FS = \frac{((23 * 0,272 * Sec 34,87) + ((13,47 * Cos 34,87))Tan25,6)}{13,47 * Sen 34,87}$$

$$FS = \frac{(7,62 + 5,29)}{7,7}$$

$$FS = \frac{12,91}{5,61}$$

$$\boxed{FS = 1,6}$$

4.7.3. Método de Bishop

Talud 3

$$FSs = \Sigma \frac{(C'b + (W - ub) \frac{Tan\phi'}{ma})}{\Sigma Wsena}$$

$$ma = Cos \alpha (1 + \frac{Tana Tan\phi}{FS})$$

$$ma = Cos 30,205 (1 + \frac{Tan30,205 * Tan18,5}{1})$$

$$ma = 1,018$$

$$FSs = \frac{((17 * 0,224) + (11,803 - (33,21 * 0,224)) \frac{Tan18,5}{1,018})}{11,803 * Sen 30,205}$$

$$FSs = \frac{(3,808 + 1,434)}{5,93}$$

$$FSs = \frac{(3,808 + 1,434)}{5,93}$$

$$\boxed{FSs = 0,9}$$

$$FS = \Sigma \frac{(C'b + (W) \frac{Tan\phi'}{ma})}{\Sigma Wsena}$$

$$FS = \frac{(17 * 0,272) + (14,26 * \frac{Tan18,5}{1,011})}{14,26 * Sen 34,87}$$

$$FS = \frac{9,343}{8,153}$$

$$\boxed{FSs = 1,146}$$

Talud 4

$$FSs = \Sigma \frac{(C'b + (W - ub) \frac{Tan\phi'}{ma})}{\Sigma Wsena}$$

$$ma = Cos \alpha (1 + \frac{Tana Tan\phi}{FS})$$

$$ma = \cos 30,205 \left(1 + \frac{\tan 30,205 * \tan 25,6}{1,5} \right)$$

$$ma = 1,03$$

$$FSs = \frac{((23 * 0,224) + (11,15 - (33,21 * 0,224)) \frac{\tan 25,6}{1,03})}{11,15 * \sin 30,205}$$

$$FSs = \frac{((23 * 0,224) + 7,21)}{11,15 * \sin 30,205}$$

$$FSs = \frac{(5,15 + 1,73)}{5,61}$$

$$\boxed{FSs = 1,2}$$

$$FS = \Sigma \frac{(Cb + (W * \frac{\tan \phi'}{ma}))}{\Sigma W \sin \alpha}$$

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{FS} \right)$$

$$ma = \cos 34,87 \left(1 + \frac{\tan 34,87 * \tan 25,6}{1,7} \right)$$

$$ma = 0,98$$

$$FS = \Sigma \frac{(Cb + (W * \frac{\tan \phi'}{ma}))}{\Sigma W \sin \alpha}$$

$$FS = \frac{((23 * 0,272) + (13,47 * \frac{\tan 25,6}{0,98}))}{13,47 * \sin 34,87}$$

$$FS = \frac{(6,256 + 6,6)}{7,7}$$

$$FS = \frac{(6,256 + 6,6)}{7,7}$$

$$\boxed{FS = 1,7}$$

Tabla 15. Factores de Seguridad para los Taludes N°3 y N°4 obtenidos a través de diferentes métodos de análisis.

Talud 3			Talud 4		
Método/Condición	FS		Método/Condición	FS	
	Saturado	Seco		Saturado	Seco
Talud Infinito	0,7	1	Talud Infinito	0,965	1,356
Fellenius	0,961	1,2	Fellenius	1,15	1,6
Bishop	0,9	1,146	Bishop	1,2	1,7

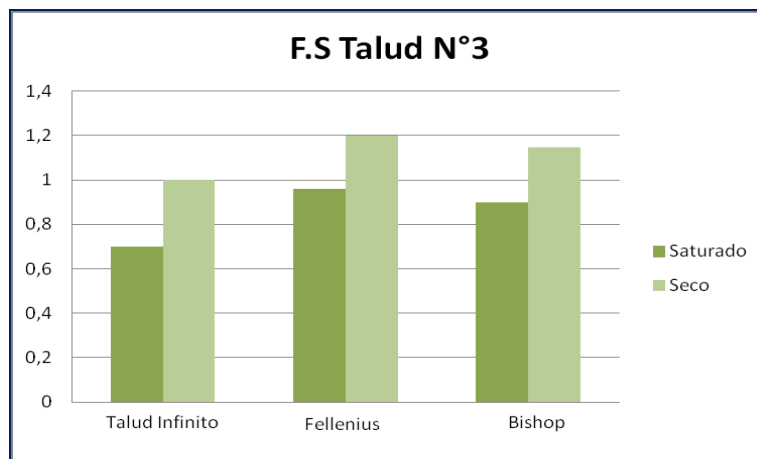


Figura 17. Distribución de los valores de F.S para el Talud N°3
Fuente: Propia

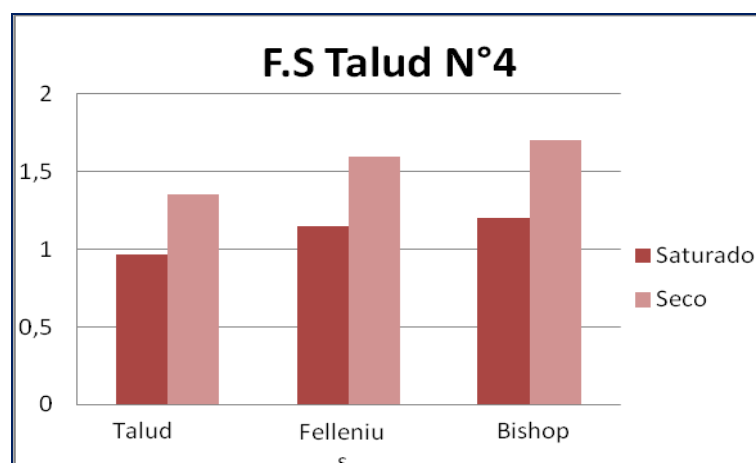


Figura 18. Distribución de los valores de F.S para el Talud N°4
Fuente: Propia

En promedio, el F.S. calculado para el Talud N°4 en condiciones secas es de 1,552 y saturado 1,105 lo que confirma que el talud posee muy buenas condiciones geotécnicas y que el fenómeno presentado allí es superficial, originado debido a la erosión y a la ausencia de una medida de contención que retuviera el material que quedó en voladizo al momento de realizar el terraseo del lugar. Implementando la instalación de un trincho en guadua se daría solución al proceso como se evidencia en la modelación realizada en la Figura 19 y Figura 20.

Cabe aclarar que el análisis desarrollado se hizo para el Talud en condiciones iniciales, sin haber modificado su geometría inicial con un sistema de terrazas y sin implementar trinchos de guadua.

El Modelo describe el origen del proceso de remoción en masa debido a la ausencia de una medida de contención que permita retener el material con posibilidad de desplazarse.

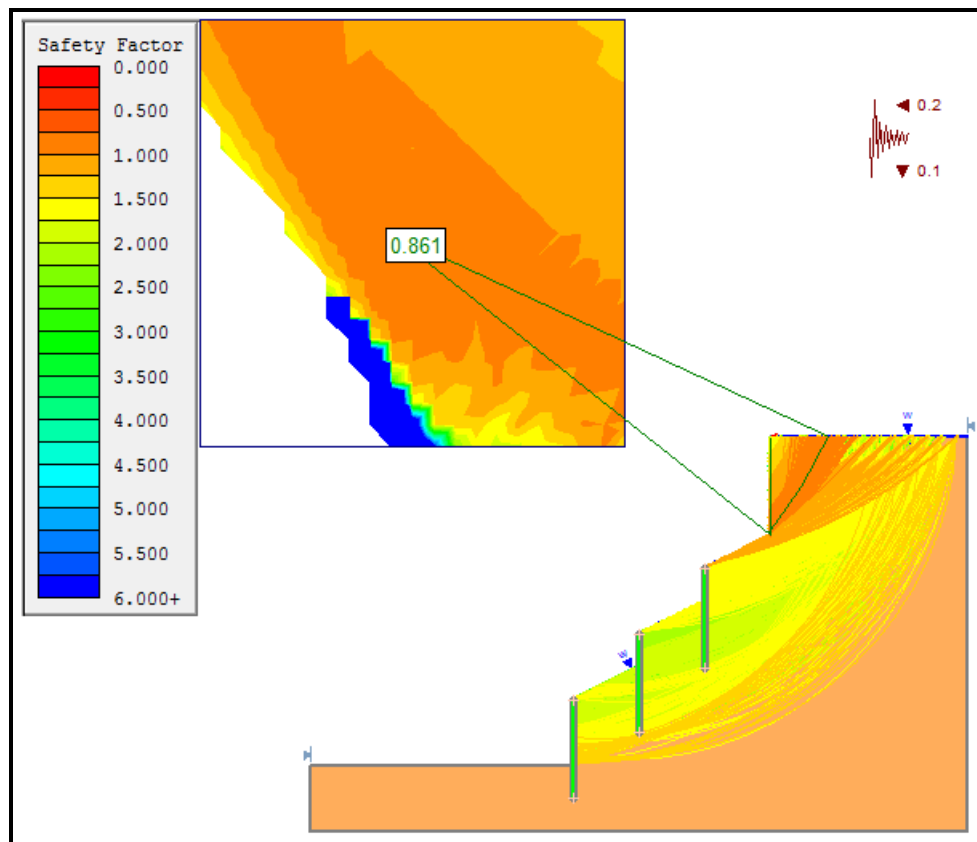


Figura 19. Modelación del Talud N°4 sin implementación de Trincho en la zona de PRM.
Fuente: Propia

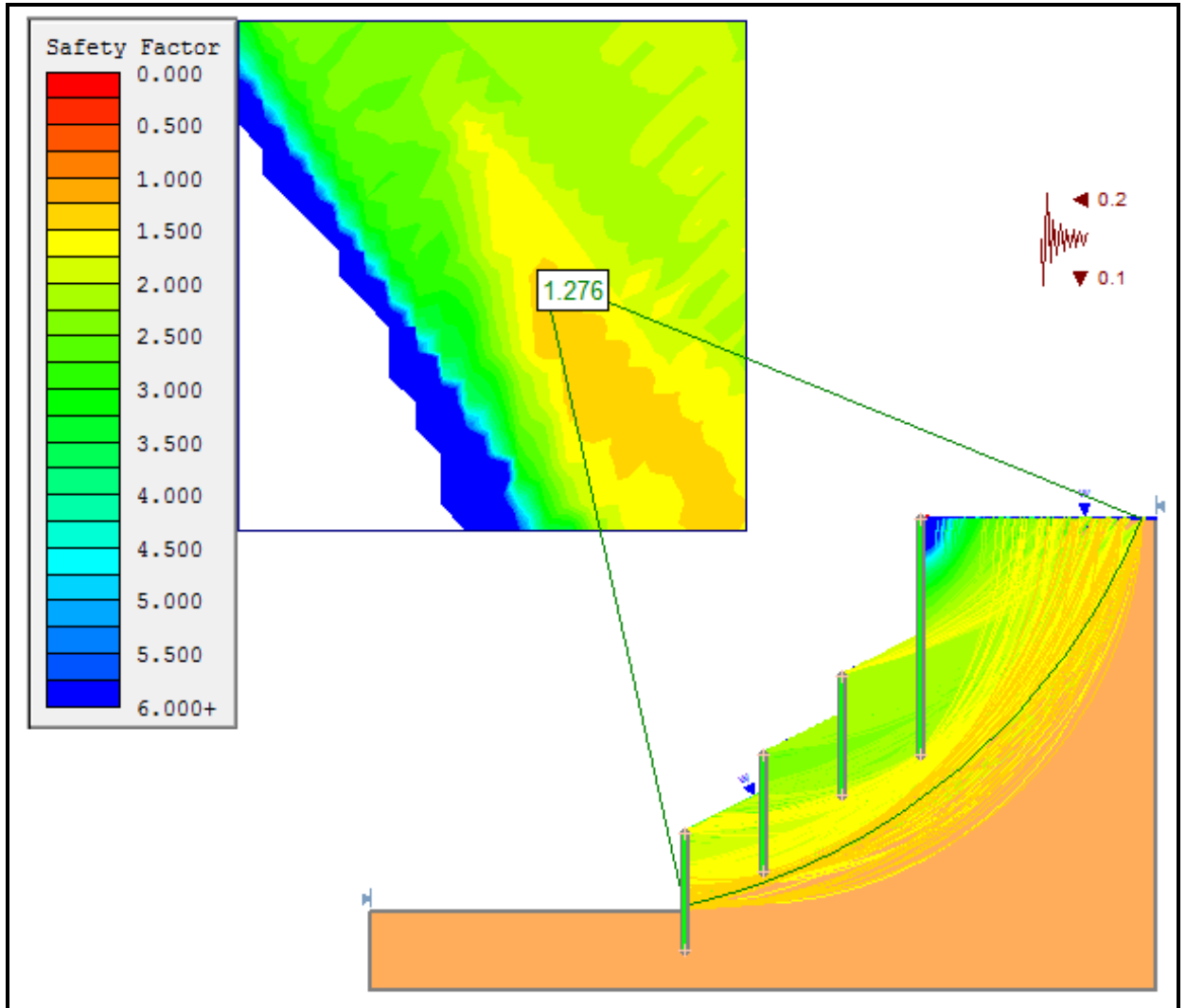


Figura 20. Modelación del Talud N°4 con implementación de Trincho en la Zona de PRM
Fuente: Propia

Al implementar en el talud como medida de control, retención y prevención los trinchos de guadua, se evidencia como el material que presentó el proceso de remoción se controla y el material removido no presenta ningún tipo de movimiento, aumentando el F.S. del sitio y garantizando la estabilidad del material.

A continuación se presentan diferentes escenarios de modelación para los Trinchos de Guadua tanto para el Talud N°3 con el N°4, con detonantes de Sismo y Lluvia y con una variación constructiva de los trinchos variando el espaciamiento horizontal.

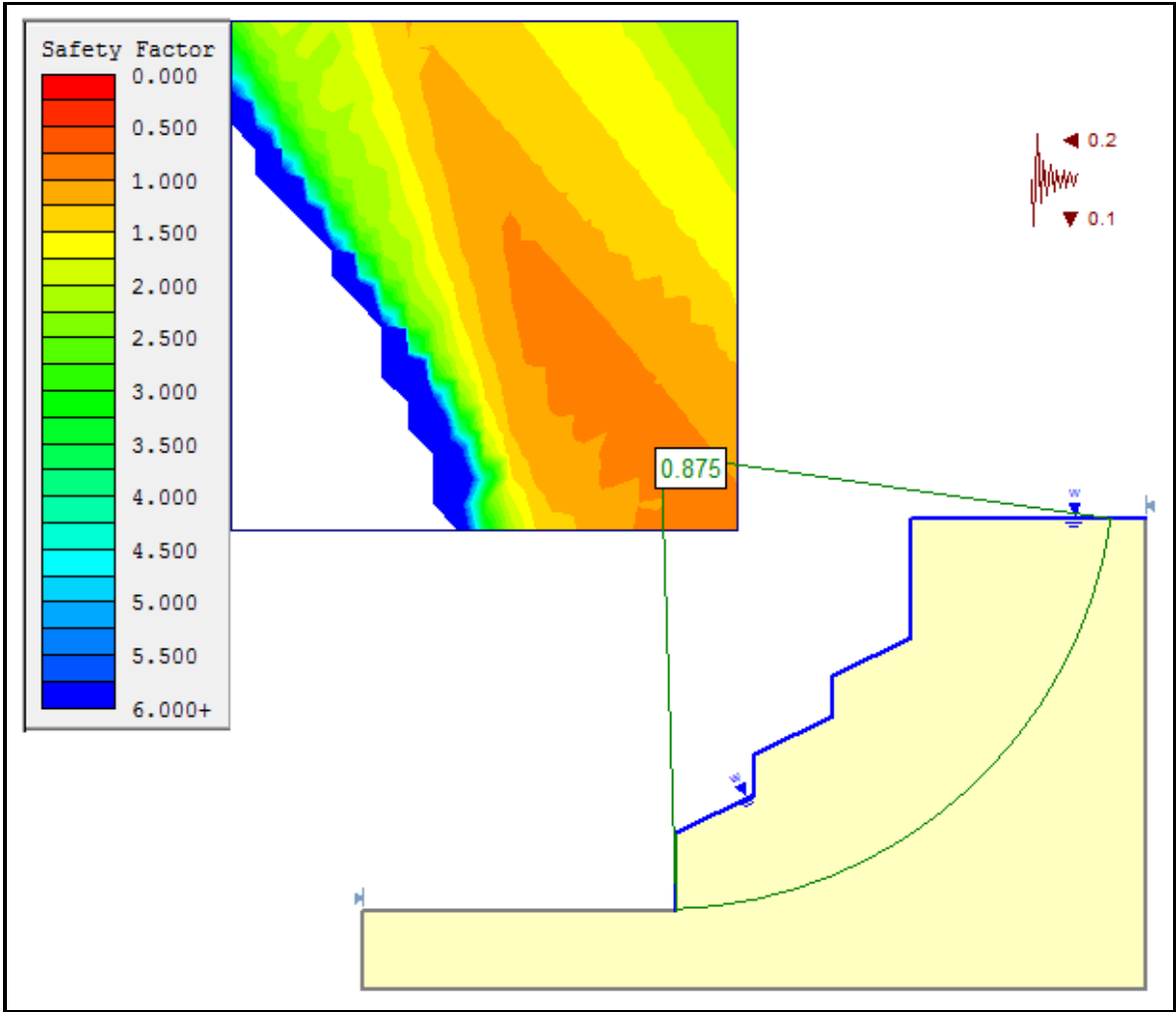


Figura 21. Modelación del Talud N° 3, implementando un sistema de terrazas, con detonantes de sismo y lluvia.
Fuente: Propia

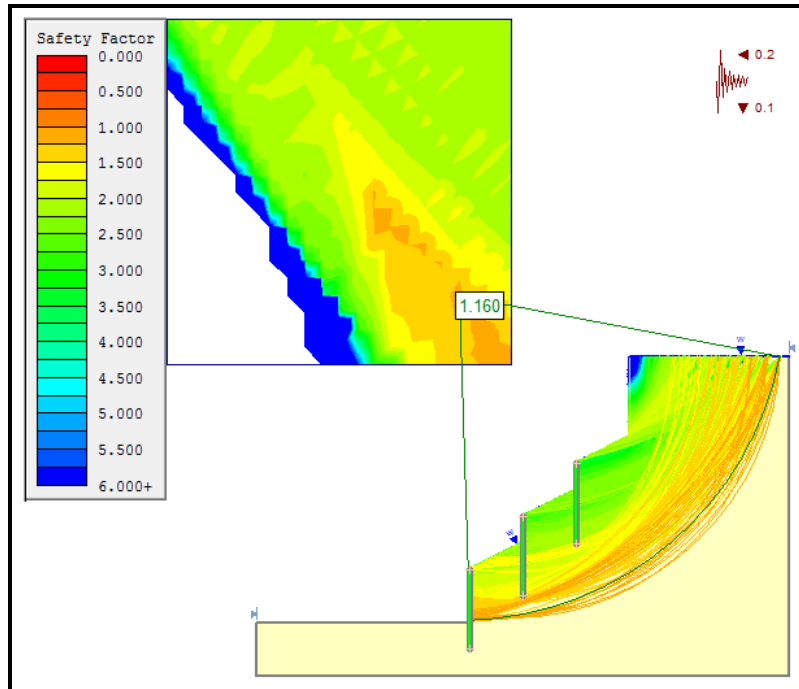


Figura 22. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (1m), y detonantes de sismo y lluvia.

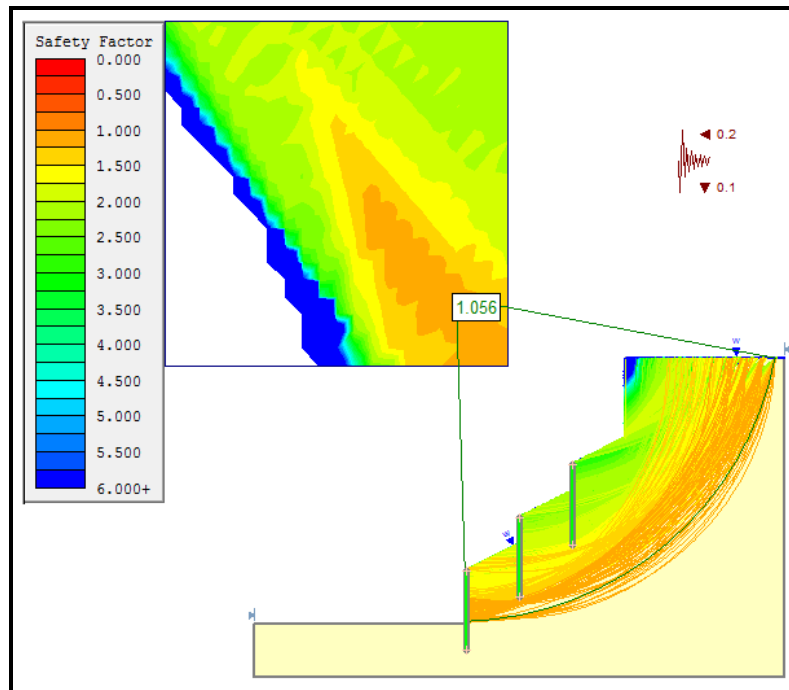


Figura 23. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2m), y detonantes de sismo y lluvia.

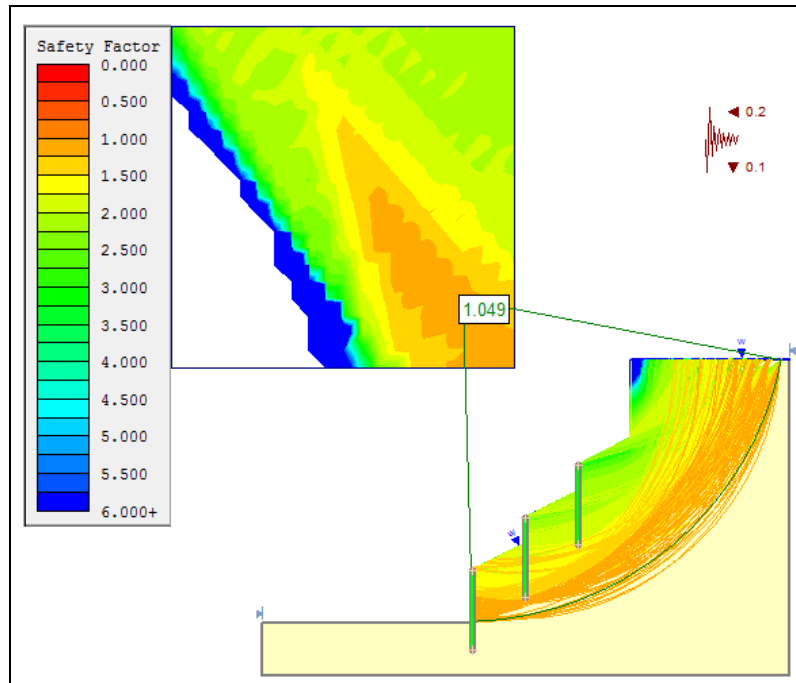


Figura 24. Modelación del Talud N°3, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2,5m), y detonantes de sismo y lluvia.

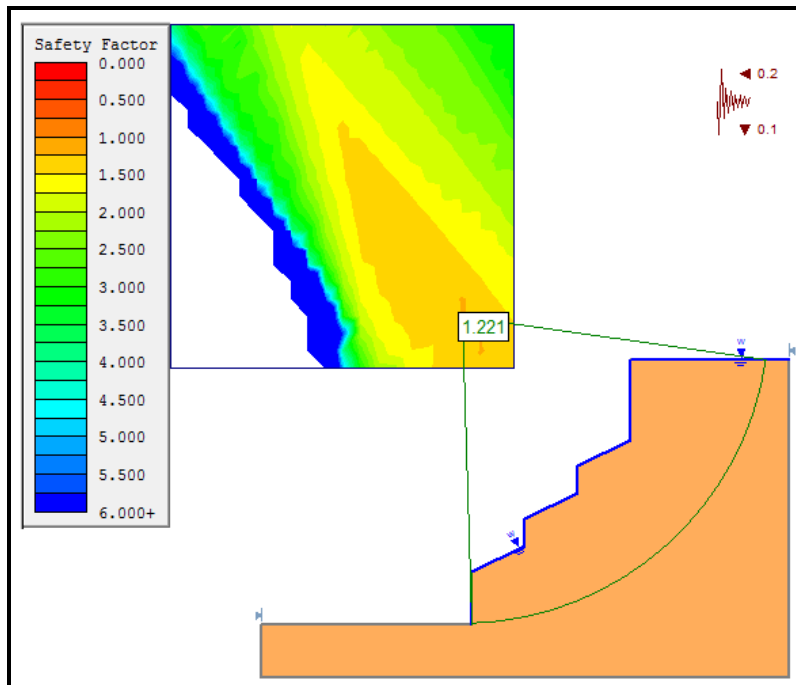


Figura 25. Modelación del Talud N° 4, implementando un sistema de terrazas, con detonantes de sismo y lluvia.

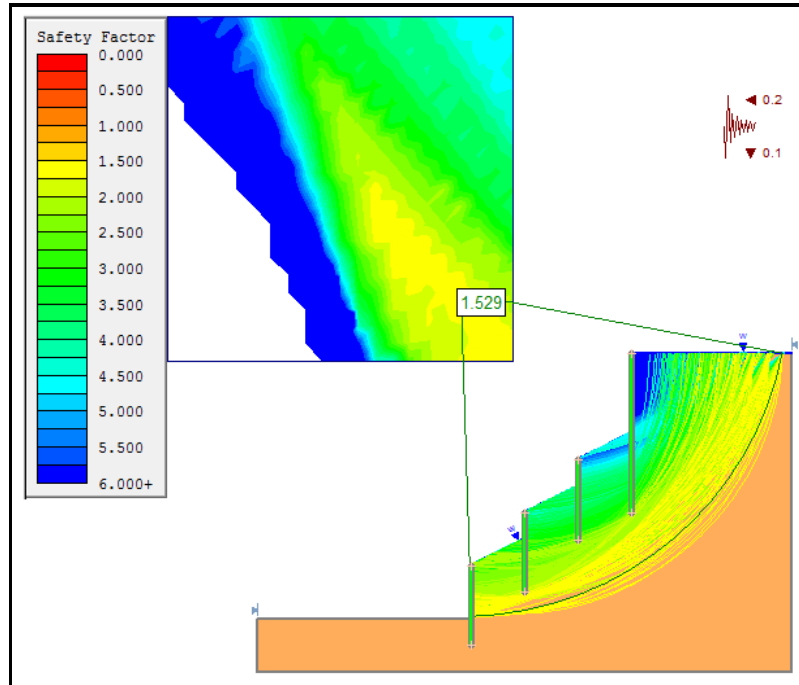


Figura 26. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (1m), y detonantes de sismo y lluvia.

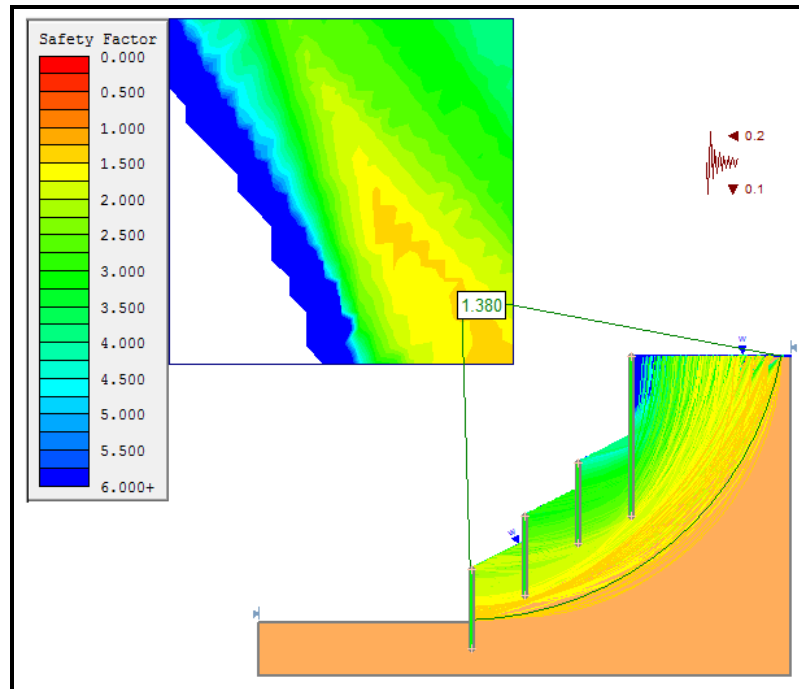


Figura 27. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2m), y detonantes de sismo y lluvia.

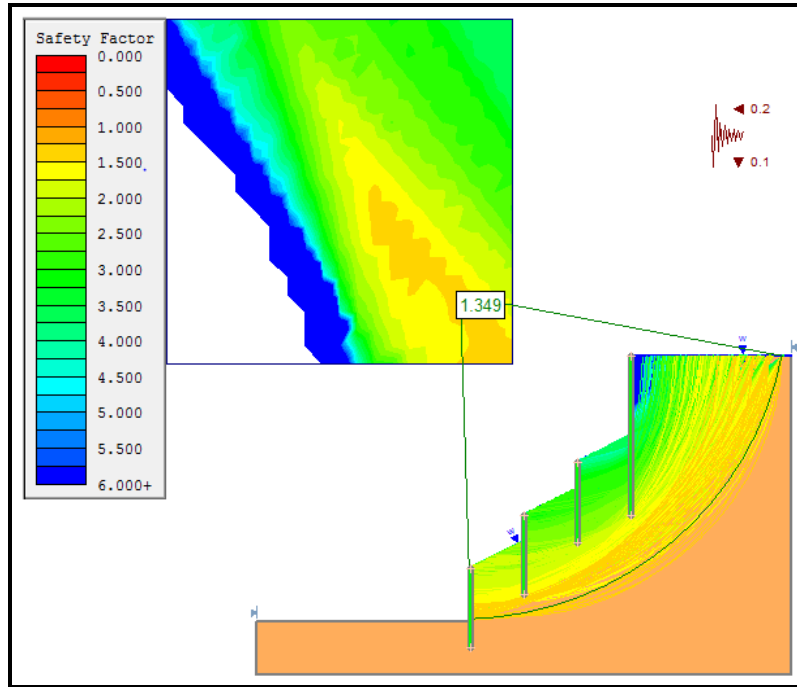


Figura 28. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (2,5m), y detonantes de sismo y lluvia.

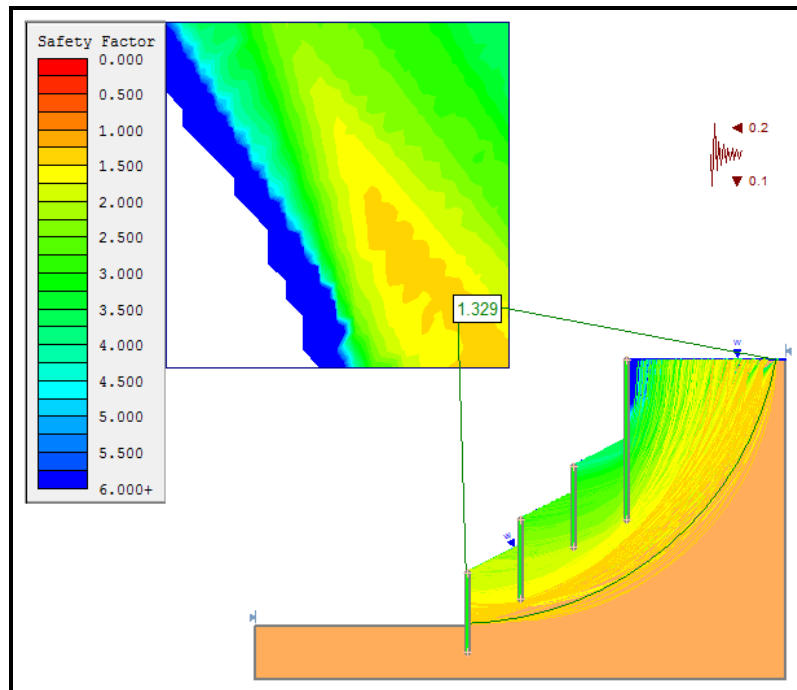


Figura 29. Modelación del Talud N°4, implementando el sistema de terrazas con Trinchos (3m), y detonantes de sismo y lluvia.

La variación de los Factores de Seguridad también se analizó según el distanciamiento de los elementos verticales, con el fin de establecer la relación entre las dos variables, y determinar un comportamiento óptimo del trincho y la reacción en el suelo. Este comportamiento se ve descrito en la Figura 30 y Figura 31:

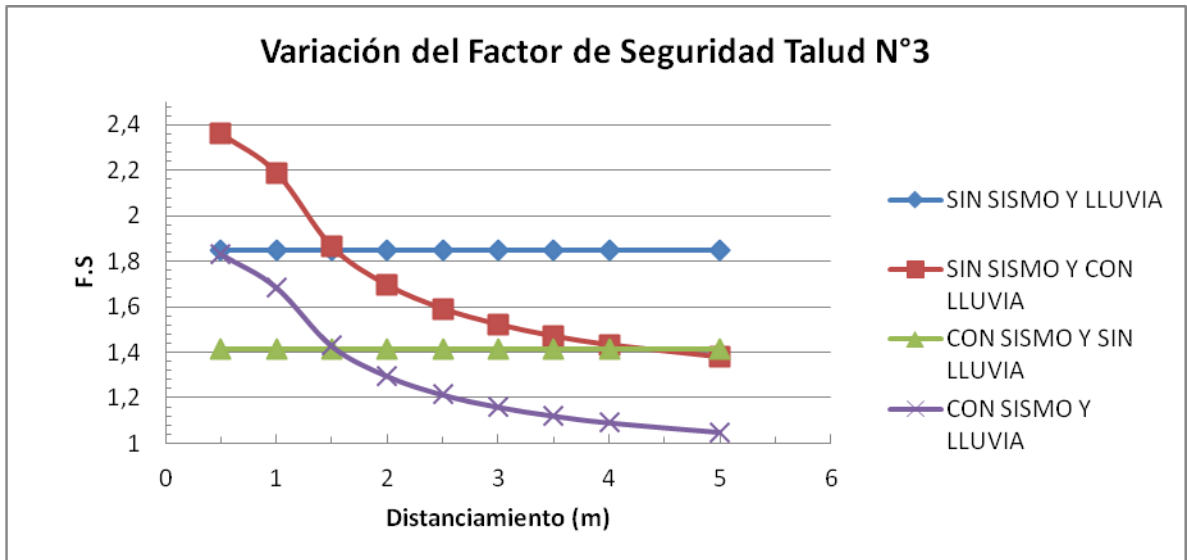


Figura 30. Distanciamiento vs Factor de Seguridad simulado para el Talud N°3

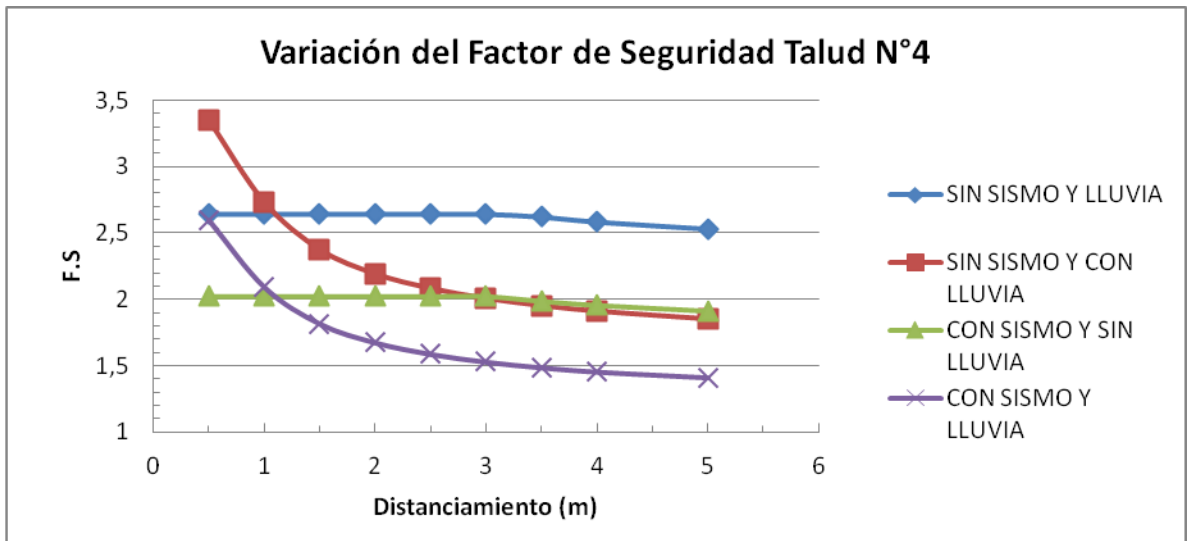


Figura 31. Distanciamiento vs Factor de Seguridad simulado para el Talud N°4

La variación en la pendiente de las curvas se debe al comportamiento del suelo frente a la medida bioingenieril de estabilización, donde el F.S. se estandariza a

medida que el distanciamiento aumento, lo que describe que el trabajo lo hace el suelo más no la estructura, sin dejar de cumplir con su condición de estabilidad y control.

Adicionalmente, según el Título H de la NSR-10 en la tabla H.2.4-1 “Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos” establece que el valor del F.S para taludes en condición pseudoestática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño es de 1.05 para el diseño y 1.00 para la construcción, condición bajo la cual los modelos de los trinchos de guadua cumplen el factor de seguridad establecido por la norma.

Tabla 16. Tabla H.2.4-1 “Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos”

Condición	FSBM	
	Diseño	Construcción
Taludes-Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1,5	1,25
Taludes- Condición Seudoestática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1,05	1

Fuente: Adaptado de Título H, NSR-10.

Tabla 17. Tabla Resumen con Factores de Seguridad obtenidos a través de la Modelación con el programa Slide®

Condición con Detonantes (Sismo y Lluvia)	Factor de Seguridad	
	Talud N°3	Talud N°4
Talud Natural	0,73	1,02
Con Terraza	0,875	1,221
Trinchos (1m)	1,16	1,53
Trinchos (2m)	1,056	1,38
Trinchos (2,5m)	1,05	1,35

Fuente: Propia

4.7.4. Diseño Estructural

Para el diseño estructural de los trinchos de guadua se tomo como referencia lo establecido por el Titulo G “Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua”. El diseño de elementos a flexión en guadua rolliza seguirá los mismos procedimientos básicos usados en el diseño de vigas de otros materiales estructurales. Debido a que la guadua angustifolia kunth presenta una relación **MOR/MOE** muy alta, lo que la convierte en un material muy flexible, el análisis a flexión estará regido por el control de las deflexiones admisibles, salvo en algunas excepciones, no obstante, siempre se debe comprobar la resistencia la flexión, corte y aplastamiento¹¹.

Toda guadua que cumpla con los requisitos de calidad establecidos en el Titulo G, debe utilizar para efectos de cálculo los valores de esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad consignados en la Tabla 18 y Tabla 19 respectivamente, y que fueron obtenidos según lo estipulado en el título mencionado anteriormente.

Tabla 18. Tabla G.12.7-1 Esfuerzos Admisibles (MPa)

Flexión F_b	Tracción F_t	Compresión II F_c	Compresión \perp F_{kp}	Corte II F_{kv}
15	18	14	1.4	1.2

Fuente: Adaptado de Titulo G, NSR-10.

Tabla 19. Tabla G.12.7-2 Módulos de Elasticidad (MPa)

Módulo Promedio $E_{0.5}$	Módulo Percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo Mínimo E_{min}
9.500	7.500	4.000

Fuente: Adaptado de Titulo G, NSR-10.



Medidas de la Guadua

- Diámetro Externo= 10cm
- Diámetro Interno= 8cm
- Espesor= 1cm
- Radio Externo= 5cm

¹¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, TÍTULO G Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua.

- Radio Interno= 4cm

4.7.4.1. Área Neta de la Guadua

El área de la sección transversal constituida por un (1) solo culmo fue calculada con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi}{4}(De^2 - (De - 2t)^2)$$

Donde,

A=Área neta de la sección transversal de la Guadua en mm²

De= Diámetro Externo del culmo en mm

t= Espesor promedio de la pared del culmo en mm

$$A = \frac{\pi}{4}(100^2 - (100 - (2 * 10))^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(10000 - 3600)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(10300)$$

$$\boxed{A = 5026,6 \text{ mm}^2}$$

4.7.4.2. Esfuerzo Cortante

- Elemento Horizontal

V=50kN/m²

$$f_v = \frac{2V}{3A} \left(\frac{3De^2 - 4De * t + 4t^2}{De^2 - 2De * t + 2t^2} \right) \leq F'v$$

$$f_v = \frac{(2 * 50N)}{(3 * 5026,6\text{mm}^2)} \left(\frac{(3 * 100^2)\text{mm} - (4 * 100 * 10)\text{mm} + (4 * 10^2)\text{mm}}{100^2\text{mm} - (2 * 100 * 10) + (2 * 10^2)\text{mm}} \right) \leq F'v$$

$$f_v = 6,6 \times 10^{-3} \frac{N}{\text{mm}^2} \left(\frac{30000\text{mm}^2 - 4000\text{mm}^2 + 400\text{mm}^2}{10000\text{mm}^2 - 2000\text{mm}^2 + 200\text{mm}^2} \right) \leq F'v$$

$$f_v = 6,6 \times 10^{-3} \frac{N}{\text{mm}^2} \left(\frac{26400\text{mm}^2}{8200\text{mm}^2} \right) \leq F'v$$

$$f_v = 6,6 \times 10^{-3} \frac{N}{\text{mm}^2} * 3,22 \leq F'v$$

$$\boxed{f_v = 0,021 \text{ MPa} \quad f_v = 21 \text{ kN/m}^2}$$

4.7.4.3. Deflexión Admisible para una Carga Distribuida

Para $w=100\text{kN}$ ($0,1 \text{ N/mm}^2$)

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{wl^4}{EI} K$$

Las deflexiones de vigas, viguetas, entablados, pies derechos, se calcularán con el módulo de elasticidad promedio $E_{0,5}= 9.5\text{MPa}$. Para el valor de $K=I/120$, para l de 1,2 y 2,5m, $K_{(1m)}=8,3\text{mm}$, $K_{(2m)}=16,7\text{mm}$, $K_{(2,5m)}=20,8\text{mm}$.

- Módulo de Elasticidad de la Guadua (E) = $9,5\text{Mpa}$
- Momento de Inercia de la Sección Circular Hueca (I)

$$I = \frac{\pi * (Re^4 - ri^4)}{4}$$

$$I = \frac{\pi * (Re^4 - ri^4)}{4}$$

$$I = \frac{\pi * (50\text{mm}^4 - 40\text{mm}^4)}{4}$$

$$I = 1,3 \times 10^{13} \text{mm}^4$$

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{wl^4}{EI} K$$

$$\Delta_{(1m)} = \frac{5}{384} \frac{0,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * (1000\text{mm})^4}{9,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} 1,3 \times 10^{13}} * 8,3\text{mm}$$

$$\Delta_{(1m)} = \frac{5}{384} \frac{1 \times 10^{11} \text{N} * \text{mm}^2}{1,235 \times 10^{14} \text{N} * \text{mm}^2} * 8,3\text{mm}$$

$$\Delta_{(1m)} = 0,00009 \text{ mm}$$

$$\Delta_{(2m)} = 0,0028 \text{ mm}$$

$$\Delta_{(2,5m)} = 0,0086 \text{ mm}$$

4.7.4.4. Esfuerzo a la Flexión

$$f_b = \frac{M}{S} \leq Fb'$$

En donde:

f_b = esfuerzo a flexión actuante, en MPa

M = momento actuante sobre el elemento en N.mm

Fb' = esfuerzo admisible modificado, en MPa

S = módulo de sección en mm³

El módulo de sección **S**, para una (1) guadua se expresa con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\pi(De^4 - [De - 2t]^4)}{32De}$$

En donde:

S = módulo de sección en mm³

De = diámetro promedio exterior del culmo en mm

t = espesor promedio de la pared del culmo en mm

- Elemento Vertical

Momento Máximo= 25 kN/m (25 N/mm)

$$S = \frac{\pi(De^4 - [De - 2t]^4)}{32De}$$

$$S = \frac{\pi(100^4 - [100 - 20]^4)}{32 * 100}$$

$$S = 57962,385 \text{ mm}^3$$

$$f_b = \frac{M}{S} \leq Fb'$$

$$f_b = \frac{25 \frac{N}{mm}}{57962,385 \text{ mm}^3} \leq Fb'$$

$$f_b = 4,313 \times 10^{-4} \text{ MPa} \leq Fb' \quad f_b = 0,043 \text{ kN/m}^2$$

Para verificar la resistencia a la flexión de secciones compuestas de 2 o más culmos de guadua, se debe calcular el módulo de sección para cada condición

particular. Para nuestro caso se presentan módulos de secciones compuestas de 2 y 3 culmos, así:



Sección	S (mm ³)
	$\frac{\pi(5De^4 - 4De^2[De - 2t]^2 - [De - 2t]^4)}{32De}$
	$\frac{\pi(35De^4 - 4De^2[De - 2t]^2 - [De - 2t]^4)}{96De}$

Figura 32. Módulos de sección para algunas vigas compuestas
Fuente: Adaptado de Titulo G, NSR-10.

- Para 2 culmos:

$$S = \frac{\pi(5De^4 - 4De^2[De - 2t]^2 - [De - 2t]^4)}{32De}$$

$$S = \frac{\pi(5 * 100^4 - 4 * 100^2[100 - 20]^2 - [100 - 20]^4)}{32 * 100}$$

$$S = \frac{\pi(5x10^8mm^4 - 2,56x10^8mm^4 - 40960000mm^4)}{3200mm}$$

$$S = 199334,054 \text{ mm}^3$$

- Para 3 culmos:

$$S = \frac{\pi(35De^4 - 4De^2[De - 2t]^2 - [De - 2t]^4)}{96De}$$

$$S = \frac{\pi(35 * 100^4 - 4 * 100^2[100 - 20]^2 - [100 - 20]^4)}{96 * 100}$$

$$S = \frac{\pi(3,5x10^9mm^4 - 2,56x10^8mm^4 - 40960000mm^4)}{9600mm}$$

$$S = 1048192,389 \text{ mm}^3$$

- Elemento Horizontal
Momento Máximo= 12,5 kN/m (12,5 N/mm)

$$f_b (1 \text{ culmo}) = \frac{M}{S} \leq Fb'$$

$$f_b (1 \text{ culmo}) = \frac{12,5 \frac{N}{mm}}{199334,054 \text{ mm}^3} \leq Fb'$$

$$f_b (1 \text{ culmo}) = \frac{12,5 \frac{N}{mm}}{199334,054 \text{ mm}^3} \leq Fb'$$

$$f_b (1 \text{ culmo}) = 6,3 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \leq Fb'$$

$$f_b (1 \text{ culmo}) = 6,3 \times 10^{-5} \text{ MPa} \leq Fb' \quad f_b (1 \text{ culmo}) = 0,063 \text{ kN/m}^2$$

$$f_b (2 \text{ culmos}) = 1,19 \times 10^{-5} \text{ MPa} \leq Fb' \quad f_b (2 \text{ culmos}) = 0,012 \text{ kN/m}^2$$

4.7.4.5. Aplastamiento

Los esfuerzos de compresión perpendicular a las fibras (f_p), deben verificarse especialmente en los apoyos y lugares en los que haya cargas concentradas en áreas pequeñas. El esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras actuante no debe exceder al esfuerzo admisible de compresión perpendicular modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$$f_p = \frac{3RDe}{2t^2 * l} \leq F'p$$

dónde:

$F'p$ = esfuerzo admisible en compresión perpendicular a la fibra, modificado por los coeficientes a que haya lugar, en MPa

f_p = esfuerzo actuante en compresión perpendicular a la fibra, en MPa

De = diámetro externo promedio de la sección de guadua rolliza, en mm

t = espesor promedio de la sección de guadua rolliza, en mm

l = longitud de apoyo, en mm

R = Fuerza aplicada en el sentido perpendicular a las fibras, en N

$$f_p = \frac{3RDe}{2t^2 * l} \leq F'p$$

$$f_p = \frac{3 * 5N * 100mm}{200mm^2 * 10mm} \leq F'p$$

$$f_p = \frac{3 * 5N * 100mm}{200mm^2 * 10mm} \leq F'p$$

$$f_p = 0,75MPa \leq F'p \qquad f_p = 750 \text{ kN/m}^2$$

4.7.5. Metodología e Implementación

Como resultado de la combinación del diseño geotécnico con el diseño estructural, la sección de trincho de guadua que cumple con los requisitos geotécnicos y estructurales exigidos por la NSR-10 y que se adapta a las condiciones del sitio, se presentan a continuación tanto para el Talud N°3 N°4:



Figura 33. Diseño de Trinchos de Guadua para el Talud N°3 y N°4
Fuente: Propia

Debido a que la guadua presenta altos valores de resistencia a la flexión, bastaría con 1 culmo para retener el material de la terraza, pero para evitar futuros movimientos y flujos de material en el lugar, se deben utilizar dos culmos más que permitan cubrir la parte frontal del escalón de la terraza, así el diseño definitivo para el Talud se presenta en la Figura 34:

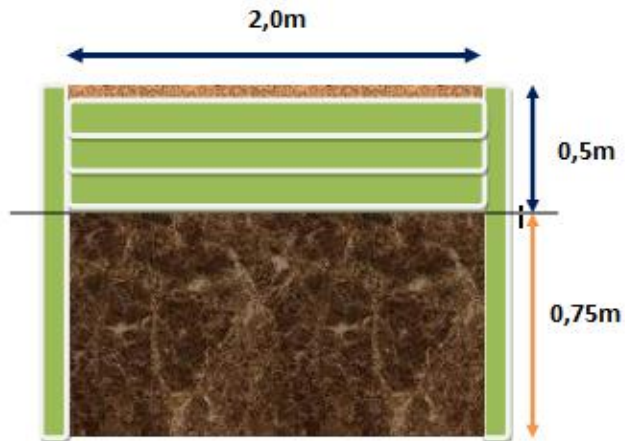


Figura 34. Diseño definitivo de Trinchos de Guadua para el Talud N°3 y N°4
Fuente: Propia

4.7.5.1. Metodología para la Implementación de Trinchos de Guadua

Para la implementación de trinchos de guadua de una manera acertada y basándose en un soporte científico que permita a la persona que los implemente como al diseño que se utilice tener un grado de veracidad bastante alto se han sugerido una serie de pasos o de elementos a tener en cuenta para el diseño o la implementación de trinchos de guadua, cubriendo los factores principales, la Geotecnia y el diseño estructural de la guadua, sustentado y argumentado por el Reglamento Sismo Resistente Colombiano y por las diferentes metodologías de análisis existentes para taludes y laderas naturales, lo que como resultado llevo a una serie de pasos lógicos en la consecución de dicha obra bioingenieril, fundamentos que se describen a continuación:

1) Condiciones Geotécnicas del terreno

Se debe conocer y determinar los parámetros característicos del suelo a través de consulta de literatura, informes, estudios o datos de primera mano, obtenidos en laboratorio, datos de Peso Unitario, Humedad Natural, Cohesión, Fricción y Nivel de Agua (si existe) que permitan determinar cuál es el comportamiento del material, clasificarlo e identificarlo, y posteriormente simularlo bajo diferentes escenarios que permitan describir el futuro comportamiento del suelo ante cualquier modificación de su naturaleza.

Se recomiendan ensayos de caracterización geotécnica y geomecánica como Límites de Atterberg, Corte Directo, etc. para determinar el tipo de material presente en el lugar.

2) Análisis y simulación de cargas y superficies de falla

Se sugiere determinar previamente el tipo de carga que afectara la estructura de los trinchos de guadua, sean cargas estáticas o dinámicas, temporales o permanentes, pasivas o activas o cualquier otro tipo de carga que pueda afectar en la estabilidad del material para A través del Software Slide® y las diferentes metodologías de análisis de taludes se evalúen las condiciones de estabilidad del talud, y se puedan determinar Factores de Seguridad que permitan diseñar la estructura en guadua. Se sugiere trabajar con el Criterio de Falla Mohr-Coulomb, para determinar los esfuerzos principales a la falla del material, ya que permiten trabajar con datos en las condiciones más posibles.

3) Cálculo y Obtención de F.S.

Se recomienda hacer un análisis de estabilidad con métodos de equilibrio interno y externo (Fuerzas y Momentos) del talud para el cálculo del F.S., y un cálculo de las cargas que se puedan generar debido a estructuras externas, como lo consignado dentro del análisis de los taludes anteriormente presentados.

De esta manera se conocerá el grado de intervención que deberá hacerse y de qué manera se implementaran los trinchos, y si de manera significativa incrementan el factor de seguridad de la zona.

4) Localización del sistema de contención propuesto, cantidad de espacio disponible y obras adicionales.

Una vez desarrollados los análisis se determinara dependiendo la zona a implementarse y el espacio disponible una estructura inicial con un modelo de trinchos de dimensiones geométricas que satisfagan la necesidad presente en el talud y que controlen y prevengan un posible proceso de remoción o algún tipo de inestabilidad en el talud. Se determinara el ancho de la estructura, la altura de los escalones de la terraza y las secciones de trinchos de guadua que se utilizaran.

5) Diseño estructural de los trinchos de guadua

Para el diseño estructural de la guadua se debe diseñar bajo parámetros de flexión, donde se determine la flexión máxima del elemento, el cortante máximo, la deflexión y el aplastamiento al que se verá expuesto el material.

Dependiendo la topografía del terreno y la carga a la cual estará trabajando el elemento, se deberá tener diferentes consideraciones para su diseño, como los diferentes módulos de sección dependiendo los culmos (Números de guaduas horizontales) de guadua que se vayan a implementar en la construcción del trincho, el espacio entre los elementos verticales (Luz) y la altura y profundidad de empotramiento del elemento vertical.

El diseño estructural debe reflejar todas las posibles cargas actuantes sobre la estructura durante las etapas de construcción y servicio; además de las condiciones ambientales que puedan genera cambios en las suposiciones de diseño o que pueden afectar la integridad de otros componentes estructurales.

6) Calidad de los materiales.

La guadua rolliza utilizada como elemento de soporte estructural debe cumplir con los siguientes requisitos:

- (a)** La guadua debe ser de la especie *Guadua angustifolia* Kunth.
- (b)** La edad de cosecha para guadua estructural debe estar entre los 4 y los 6 años.
- (c)** El contenido de humedad de la guadua debe corresponder con el contenido de humedad de equilibrio del lugar. Cuando los trinchos se construyan con guadua en estado verde se deben tener en cuenta todas las precauciones posibles para garantizar que las piezas al secarse tengan el dimensionamiento previsto en el diseño.
- (d)** La guadua estructural debe tener una buena durabilidad natural o estar adecuadamente preservada. Además se deben aplicar todos los recursos para protegerla mediante el diseño del contacto con la humedad, la radiación solar, los insectos y los hongos.

7) Vida útil y mantenimiento

Los Trinchos de guadua por estar fabricados con un material de origen natural deben tener un adecuado mantenimiento preventivo, que garantice, que los elementos no sean atacados por insectos u hongos durante su vida útil. La estructura debe tener durante toda su vida útil el mismo uso para el cual fue diseñada.

En ningún caso se debe utilizar trinchos o estructuras de guadua cuando la temperatura a la cual van a estar sometidas exceda 65° C.

Adicionalmente, se creó un diagrama de flujo (Figura 35) con una secuencia de pasos lógicos, los cuales desarrollándolos y aplicándolos de la manera correcta generaran a satisfacción la construcción y el diseño de un trincho que supla y satisfaga las necesidades de control, retención y prevención de PRM que se puedan generar en un talud.

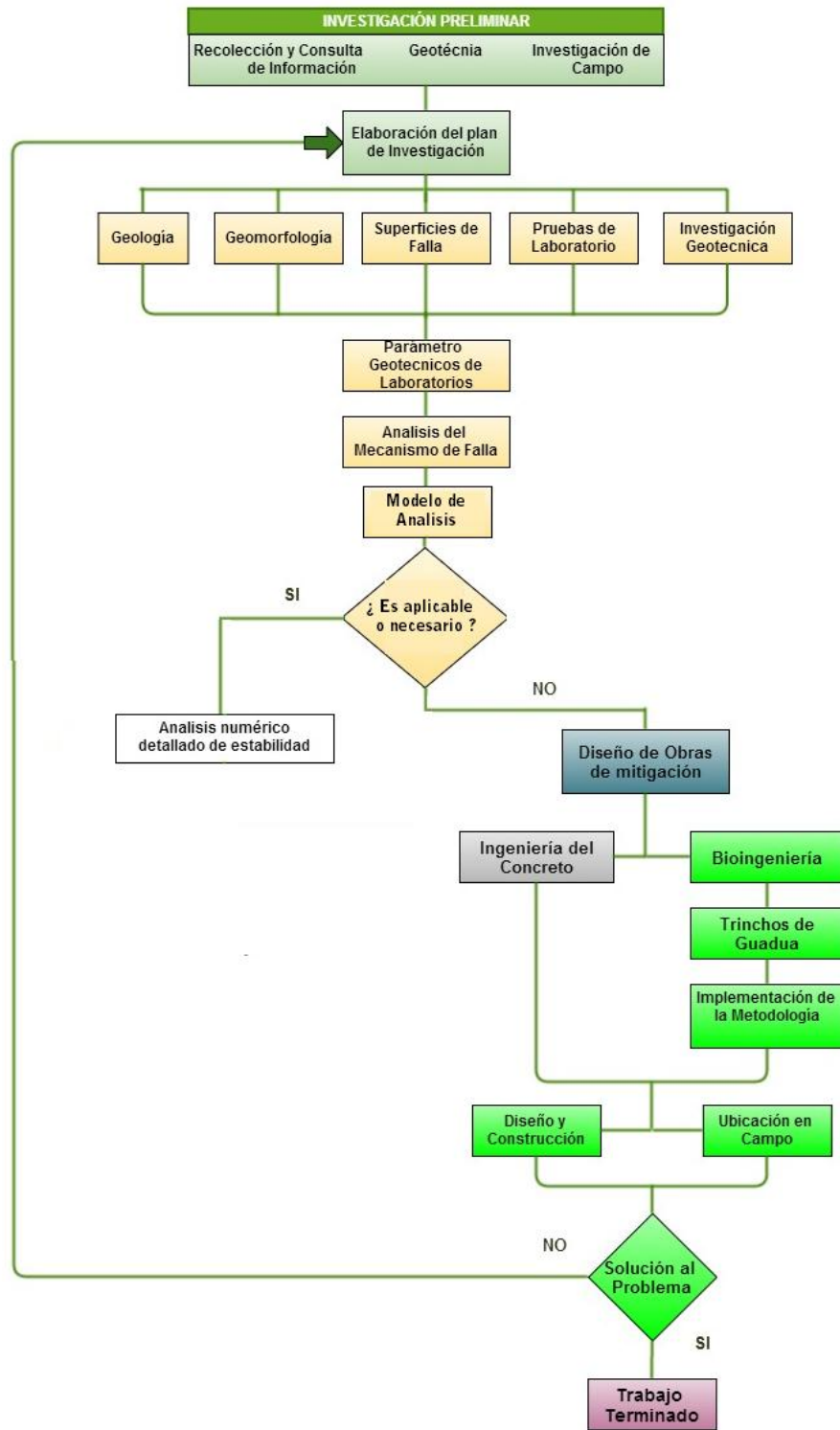


Figura 35. Diagrama de flujo para la implementación de Trinchos de Guadua
Adaptado de: Japan Landslide Society, 1996

4 CONCLUSIONES

- Las condiciones geotécnicas y geomecánicas de los taludes generan buena resistencia a procesos de remoción o incidencia de fallas provocadas por elementos intrínsecos o extrínsecos que alteren su condición inicial de estabilidad.
- Los procesos presentados en los taludes se deben a condiciones extrínsecas, como los son la meteorización y el intemperismo al que se ve expuesto el material rocoso, lo que lo lleva a un estado erosivo, generando flujos de tierras y lodos.
- Las condiciones geológicas y geomorfológicas del lugar como las características topográficas del sitio mayormente el uso y la implementación de estructuras bioingenieriles a lo largo del tramo de la vía Chia-Zipaquira
- El diseño de los elementos a flexión en guadua angustifolia kunth presenta una relación entre el modulo de rotura y modulo de elasticidad muy alta, lo que la convierte en un material muy flexible para la construcción de elementos bioingenieriles.
- Los F.S. obtenidos en la modelación de los Taludes con trinchos fueron superiores a 1.05, valor que determina la norma sismo resistente para construcción de muros de contención en taludes, con detonantes de lluvia y sismo, lo que valida la metodología de diseño e implementación de trinchos.
- La variación en la luz del elemento estructural no incide plenamente en el cálculo del F.S debido a las buenas condiciones de flexión y deflexión de la guadua ante diferentes fuerzas o cargas, aunque se considera reservado diseñar con una luz de 2m.
- La utilización de 1 o más culmos se debe definir con las dimensiones del escalón de la terraza que se implemente para minimizar la pendiente del talud.

- Se deben utilizar elementos de control o protección adicionales como geomallas o geotextiles en lugares donde no se vayan a implementar trinchos de guadua, esto con el fin de reducir las posibilidades de la aparición de un proceso o del desplazamiento o flujo de material.
- Las estructuras de guadua se deben diseñar con un único propósito, y no deben mezclarse o alternarse para el desarrollo de diferentes actividades.
- Las condiciones geotécnicas del Talud N°4 podrían llegar a sugerir un nuevo diseño de trinchos ya que el material y las situaciones de carga permiten diseñar con una luz de la estructura de mayor longitud, lo que podría minimizar o reducir los costos de material y construcción del trincho.

5 BIBLIOGRAFÍA

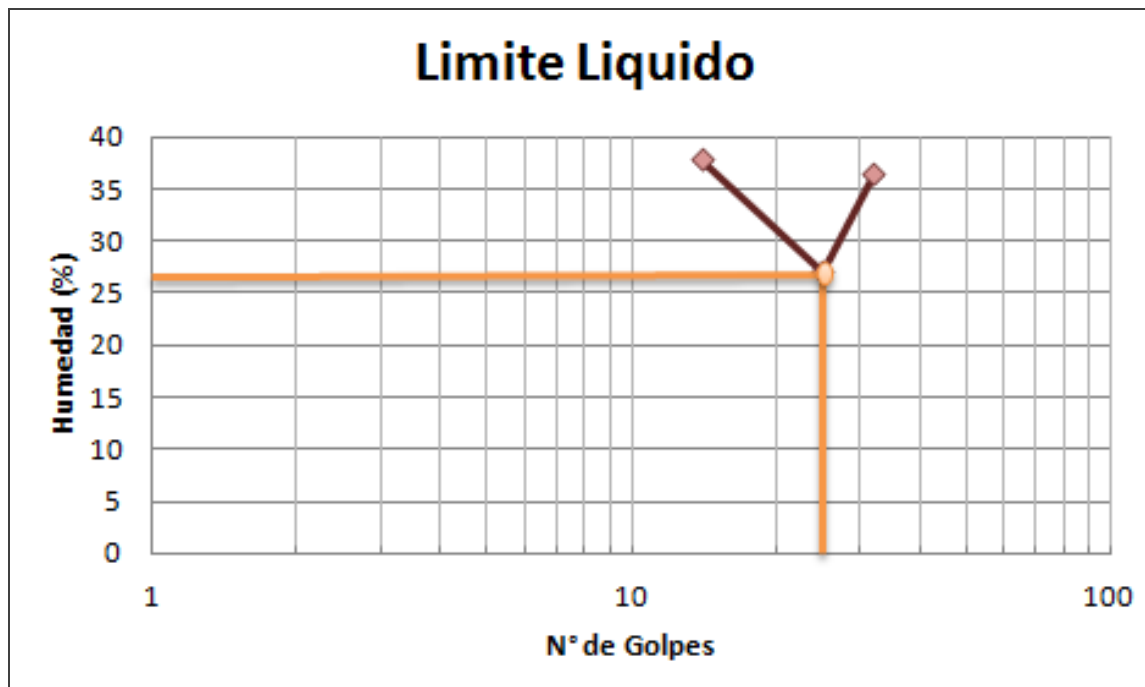
- **ASOCIACION COLOMBIANA DE INGIENERIA SISMICA, AIS.** Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Titulo G- Estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, Colombia: Marzo de 2010.
- **ASOCIACION COLOMBIANA DE INGIENERIA SISMICA, AIS.** Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Titulo H- Estudios Geotécnicos. Bogotá, Colombia: Marzo de 2010.
- **GUTIERREZ GONZALES M.** Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia* Kunth. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniera civil y agrícola, Maestría en Ingeniería – Estructuras. Bogotá, Colombia. 2011.
- **MONTERO OLARTE J.** La bioingeniería en la protección y estabilidad de taludes, laderas y cauces en zonas urbanas. I Seminario “La Bioingeniería de Riesgos, la Recuperación de espacios del Agua y la Adaptación al Cambio Climático en Bogotá”. FOPAE-SCG. Bogotá, Colombia. 2013
- **RIVERA POSADA J. H.** Experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. I Seminario “La Bioingeniería de Riesgos, la Recuperación de espacios del Agua y la Adaptación al Cambio Climático en Bogotá”. FOPAE-SCG. Bogotá, Colombia. 2013.
- **SUÁREZ DÍAZ J.** Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 1998
- Comité Normalización No. 178 [En línea] (23 de Noviembre de 2013) disponible en: (<http://sociedadcolombianadelbambu.org/comite-normalizacion.php>)

6 ANEXOS

ANEXO 1.

Pruebas de Laboratorio, Análisis y
Presentación de Resultados

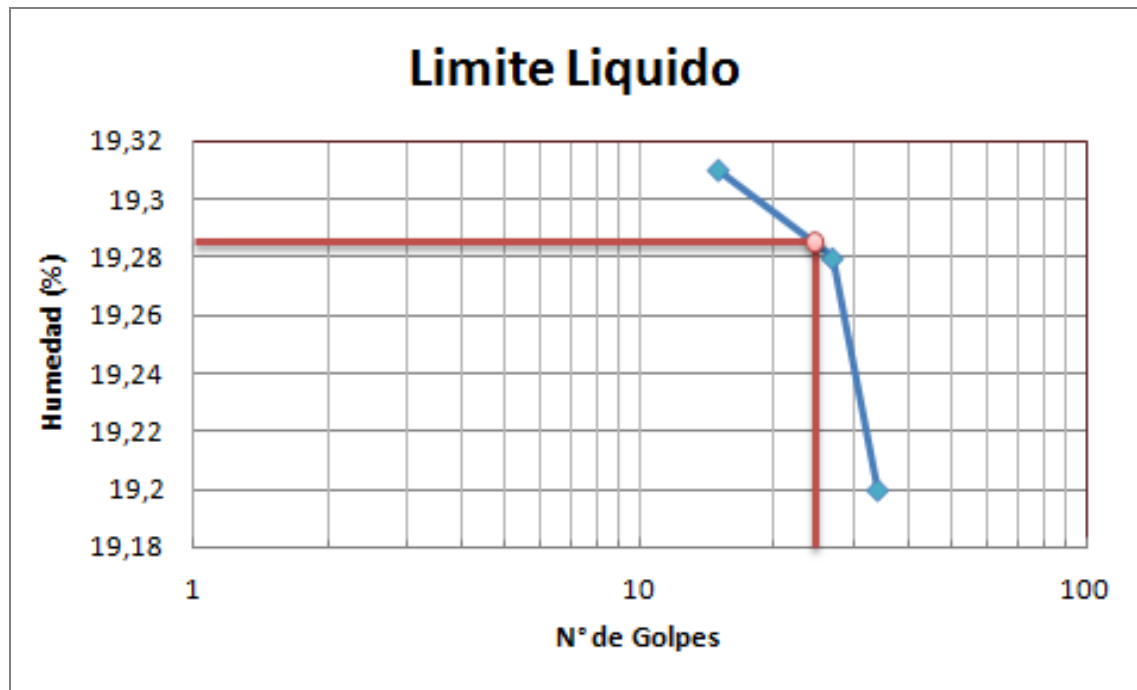
Talud N°3	Limite Liquido			Limite Plástico		
Recipiente	L53	L49	8	1	11	L69
Numero De Golpes	32	25	14	0	0	0
WH+R	27,43	30,29	26,26	13,82	14,05	25,1
WS+R	25,18	23,91	22,26	13,33	13,49	24,16
WR	19	18,92	11,69	11,26	10,96	18,37
% de humedad	36,41	27	37,84	23,67	22,13	16,23



Limites de Atterberg Talud N°3

Talud N°4	Limite Liquido			Limite Plástico		
Recipiente	L50	L52	L55	L58	L66	L69
Numero De Golpes	34	27	15	0	0	0
WH+R	46,29	41,15	42,47	25,97	28	25,1

WS+R	41,89	37,51	38,55	24,96	26,72	24,16
WR	18,97	18,63	18,25	18,79	18,86	18,37
% de Humedad	19,2	19,28	19,31	16,37	16,28	16,23



Limite Liquido Talud N°4

Talud N°3
Muestra 01

Carga axial	6 kg
Ancho muestra	5,0 cm

Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm ²)	Esfuerzo de corte (kg/cm ²)	Esfuerzo axial (kg/cm ²)	$\Delta L/L_0$
5	0,022	0,013	2,24	5,100	25,500	0,088	0,245	0,25%
10	0,025	0,025	2,55	5,075	25,375	0,100	0,246	0,49%
20	0,028	0,051	2,86	5,049	25,245	0,113	0,248	1,00%
30	0,031	0,076	3,16	5,024	25,120	0,126	0,249	1,49%

Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm ²)	Esfuerzo de corte (kg/cm ²)	Esfuerzo axial (kg/cm ²)	$\Delta L/L_0$
40	0,033	0,102	3,37	4,998	24,990	0,135	0,250	2,00%
50	0,035	0,127	3,57	4,973	24,865	0,144	0,251	2,49%
60	0,036	0,152	3,67	4,948	24,740	0,148	0,253	2,98%
70	0,038	0,178	3,88	4,922	24,610	0,158	0,254	3,49%
80	0,039	0,203	3,98	4,897	24,485	0,163	0,255	3,98%
90	0,040	0,229	4,08	4,871	24,355	0,168	0,257	4,49%
100	0,041	0,254	4,18	4,846	24,230	0,173	0,258	4,98%
120	0,046	0,305	4,69	4,795	23,975	0,196	0,261	5,98%
140	0,046	0,356	4,69	4,744	23,720	0,198	0,263	6,98%
160	0,047	0,406	4,79	4,694	23,470	0,204	0,266	7,96%
180	0,048	0,457	4,89	4,643	23,215	0,211	0,269	8,96%
200	0,048	0,508	4,89	4,592	22,960	0,213	0,272	9,96%
220	0,051	0,559	5,20	4,541	22,705	0,229	0,275	10,96%
240	0,051	0,610	5,20	4,490	22,450	0,232	0,278	11,96%
260	0,052	0,660	5,30	4,440	22,200	0,239	0,282	12,94%
280	0,052	0,711	5,30	4,389	21,945	0,242	0,285	13,94%
300	0,052	0,762	5,30	4,338	21,69	0,244	0,288	0,1494
320	0,052	0,813	5,30	4,287	21,435	0,247	0,292	0,1594
340	0,053	0,864	5,40	4,236	21,18	0,255	0,295	0,1694
360	0,053	0,914	5,40	4,186	20,93	0,258	0,299	0,1792
380	0,053	0,965	5,40	4,135	20,675	0,261	0,302	0,1892
400	0,053	1,016	5,40	4,084	20,42	0,264	0,306	0,1992

Muestra 02

Carga axial	13 kg
Ancho muestra	5,1 cm

Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
5	0,023	0,013	2,35	5,100	26,010	0,090	0,500	0,25%
10	0,030	0,025	3,06	5,075	25,883	0,118	0,502	0,49%
20	0,038	0,051	3,88	5,049	25,750	0,151	0,505	1,00%
30	0,044	0,076	4,49	5,024	25,622	0,175	0,507	1,49%
40	0,045	0,102	4,59	4,998	25,490	0,180	0,510	2,00%
50	0,049	0,127	5,00	4,973	25,362	0,197	0,513	2,49%
60	0,051	0,152	5,20	4,948	25,235	0,206	0,515	2,98%
70	0,053	0,178	5,40	4,922	25,102	0,215	0,518	3,49%
80	0,056	0,203	5,71	4,897	24,975	0,229	0,521	3,98%
90	0,058	0,229	5,91	4,871	24,842	0,238	0,523	4,49%
100	0,064	0,254	6,53	4,846	24,715	0,264	0,526	4,98%
120	0,066	0,305	6,73	4,795	24,455	0,275	0,532	5,98%
140	0,070	0,356	7,14	4,744	24,194	0,295	0,537	6,98%
160	0,072	0,406	7,34	4,694	23,939	0,307	0,543	7,96%
180	0,074	0,457	7,55	4,643	23,679	0,319	0,549	8,96%
200	0,076	0,508	7,75	4,592	23,419	0,331	0,555	9,96%
220	0,077	0,559	7,85	4,541	23,159	0,339	0,561	10,96%
240	0,079	0,610	8,06	4,490	22,899	0,352	0,568	11,96%
260	0,082	0,660	8,36	4,440	22,644	0,369	0,574	12,94%
280	0,083	0,711	8,46	4,389	22,384	0,378	0,581	13,94%
300	0,086	0,762	8,77	4,338	22,124	0,396	0,588	14,94%
320	0,087	0,813	8,87	4,287	21,864	0,406	0,595	15,94%
340	0,087	0,864	8,87	4,236	21,604	0,411	0,602	16,94%
360	0,087	0,914	8,87	4,186	21,349	0,415	0,609	17,92%
380	0,088	0,965	8,97	4,135	21,089	0,425	0,616	18,92%
400	0,088	1,016	8,97	4,084	20,828	0,431	0,624	19,92%

Muestra 03

Carga axial		26 kg						
Ancho muestra		5,1 cm						
Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
5	0,023	0,013	2,35	5,100	26,010	0,090	1,000	0,25%
10	0,038	0,025	3,82	5,075	25,883	0,148	1,005	0,49%
20	0,057	0,051	5,81	5,049	25,750	0,226	1,010	1,00%
30	0,065	0,076	6,58	5,024	25,622	0,257	1,015	1,49%
40	0,071	0,102	7,24	4,998	25,490	0,284	1,020	2,00%
50	0,077	0,127	7,85	4,973	25,362	0,310	1,025	2,49%
60	0,080	0,152	8,16	4,948	25,235	0,323	1,030	2,98%
70	0,086	0,178	8,72	4,922	25,102	0,347	1,036	3,49%
80	0,092	0,203	9,33	4,897	24,975	0,374	1,041	3,98%
90	0,096	0,229	9,79	4,871	24,842	0,394	1,047	4,49%
100	0,099	0,254	10,10	4,846	24,715	0,409	1,052	4,98%
120	0,106	0,305	10,81	4,795	24,455	0,442	1,063	5,98%
140	0,113	0,356	11,52	4,744	24,194	0,476	1,075	6,98%
160	0,118	0,406	11,98	4,694	23,939	0,500	1,086	7,96%
180	0,120	0,457	12,24	4,643	23,679	0,517	1,098	8,96%
200	0,126	0,508	12,80	4,592	23,419	0,547	1,110	9,96%
220	0,130	0,559	13,21	4,541	23,159	0,570	1,123	10,96%
240	0,130	0,610	13,26	4,490	22,899	0,579	1,135	11,96%
260	0,130	0,660	13,26	4,440	22,644	0,586	1,148	12,94%
280	0,130	0,711	13,21	4,389	22,384	0,590	1,162	13,94%
300	0,129	0,762	13,16	4,338	22,124	0,595	1,175	14,94%
320	0,129	0,813	13,16	4,287	21,864	0,602	1,189	15,94%
340	0,129	0,864	13,10	4,236	21,604	0,606	1,203	16,94%
360	0,128	0,914	13,05	4,186	21,349	0,611	1,218	17,92%
380	0,128	0,965	13,05	4,135	21,089	0,619	1,233	18,92%
400	0,128	1,016	13,05	4,084	20,828	0,627	1,248	19,92%

Talud N°4
Muestra 01

Carga axial	6,50 kg
Ancho muestra	5,1 cm

Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
0	0,000	0,000	0,00	5,100	26,010	0,000	0,250	0,00%
10	0,030	0,025	3,06	5,075	25,883	0,118	0,251	0,49%
20	0,044	0,051	4,49	5,049	25,750	0,174	0,253	1,00%
30	0,057	0,076	5,81	5,024	25,622	0,227	0,254	1,49%
40	0,063	0,102	6,42	4,998	25,490	0,252	0,255	2,00%
50	0,071	0,127	7,24	4,973	25,362	0,285	0,256	2,49%
60	0,076	0,152	7,75	4,948	25,235	0,307	0,258	2,98%
70	0,079	0,178	8,06	4,922	25,102	0,321	0,259	3,49%
80	0,082	0,203	8,36	4,897	24,975	0,335	0,260	3,98%
90	0,085	0,229	8,67	4,871	24,842	0,349	0,262	4,49%
100	0,087	0,254	8,87	4,846	24,715	0,359	0,263	4,98%
120	0,090	0,305	9,18	4,795	24,455	0,375	0,266	5,98%
140	0,093	0,356	9,48	4,744	24,194	0,392	0,269	6,98%
160	0,094	0,406	9,59	4,694	23,939	0,401	0,272	7,96%

Muestra 02

Carga axial	13 kg
Ancho muestra	5,1 cm

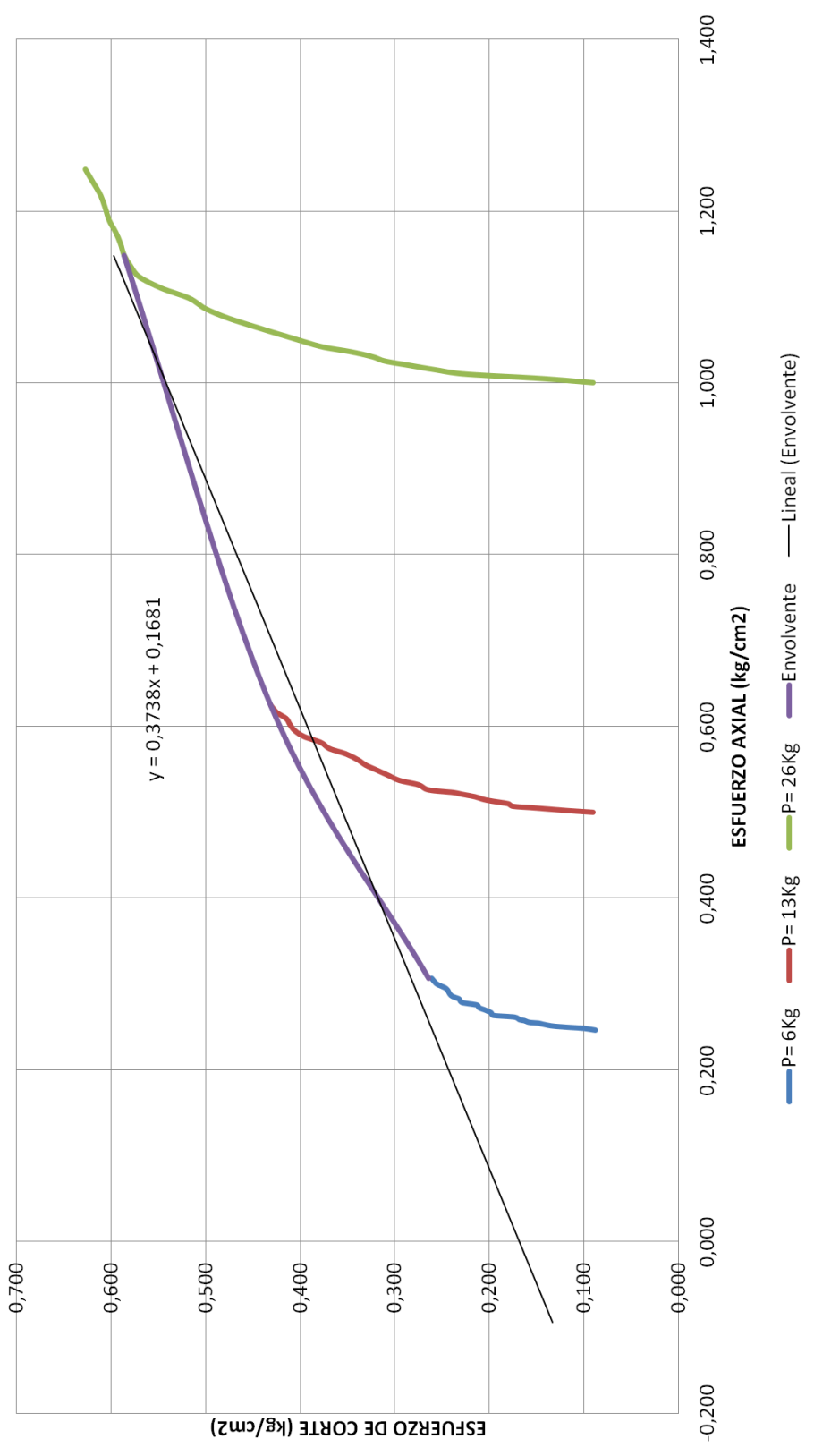
Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
0	0,000	0,000	0,00	5,100	26,010	0,000	0,500	0,00%
10	0,059	0,025	6,02	5,075	25,883	0,233	0,502	0,49%
20	0,074	0,051	7,55	5,049	25,750	0,293	0,505	1,00%

Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Horizontal (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
30	0,086	0,076	8,77	5,024	25,622	0,342	0,508	1,49%
40	0,096	0,102	9,79	4,998	25,490	0,384	0,510	2,00%
50	0,103	0,127	10,50	4,973	25,362	0,414	0,513	2,49%
60	0,107	0,152	10,91	4,948	25,235	0,432	0,515	2,98%
70	0,112	0,178	11,42	4,922	25,102	0,455	0,518	3,49%
80	0,117	0,203	11,93	4,897	24,975	0,478	0,521	3,98%
90	0,121	0,229	12,34	4,871	24,842	0,497	0,524	4,49%
100	0,126	0,254	12,85	4,846	24,715	0,520	0,526	4,98%
120	0,131	0,305	13,36	4,795	24,455	0,546	0,532	5,98%
140	0,133	0,356	13,56	4,744	24,194	0,560	0,538	6,98%
160	0,132	0,406	13,46	4,694	23,939	0,562	0,543	7,96%

Muestra 03

Carga axial	26,01 kg							
Ancho muestra	5,1 cm							
Deformación Horizontal (0,001")	Carga de corte(KN)	Deformación Vertical (cm)	Carga de corte (kg)	Largo (cm)	Ac (cm2)	Esfuerzo de corte (kg/cm2)	Esfuerzo axial (kg/cm2)	$\Delta L/L_0$
0	0,000	0,000	0,00	5,100	26,010	0,000	1,000	0,00%
10	0,074	0,025	7,55	5,075	25,883	0,292	1,005	0,49%
20	0,102	0,051	10,40	5,049	25,750	0,404	1,010	1,00%
30	0,126	0,076	12,85	5,024	25,622	0,502	1,015	1,49%
40	0,139	0,102	14,17	4,998	25,490	0,556	1,020	2,00%
50	0,144	0,127	14,68	4,973	25,362	0,579	1,026	2,49%
60	0,155	0,152	15,81	4,948	25,235	0,627	1,031	2,98%
70	0,160	0,178	16,32	4,922	25,102	0,650	1,036	3,49%
80	0,165	0,203	16,83	4,897	24,975	0,674	1,041	3,98%
90	0,171	0,229	17,44	4,871	24,842	0,702	1,047	4,49%
100	0,176	0,254	17,95	4,846	24,715	0,726	1,052	4,98%
120	0,184	0,305	18,76	4,795	24,455	0,767	1,064	5,98%
140	0,197	0,356	20,09	4,744	24,194	0,830	1,075	6,98%
160	0,206	0,406	21,01	4,694	23,939	0,878	1,087	7,96%

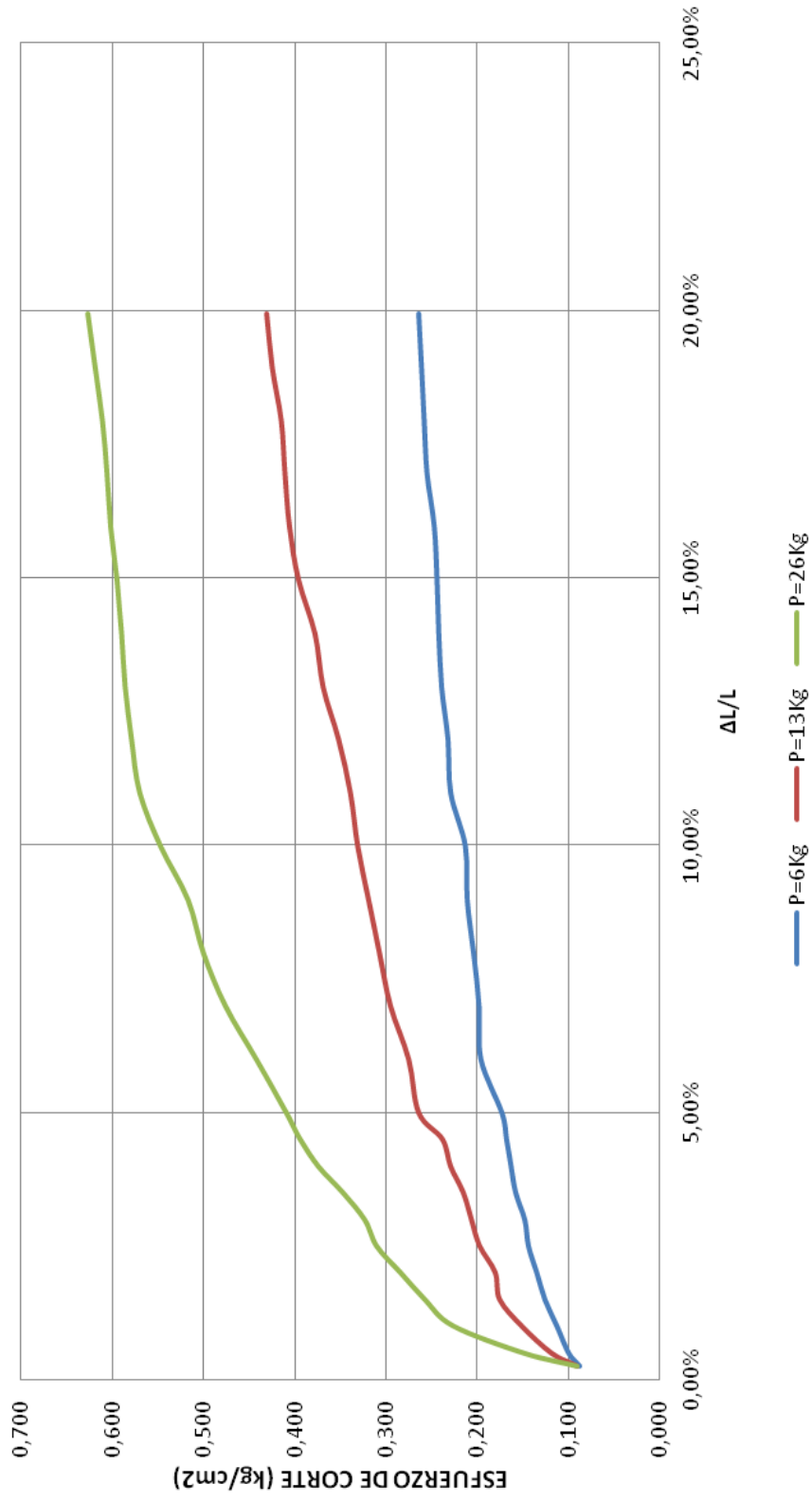
Arcilla Talud N°3



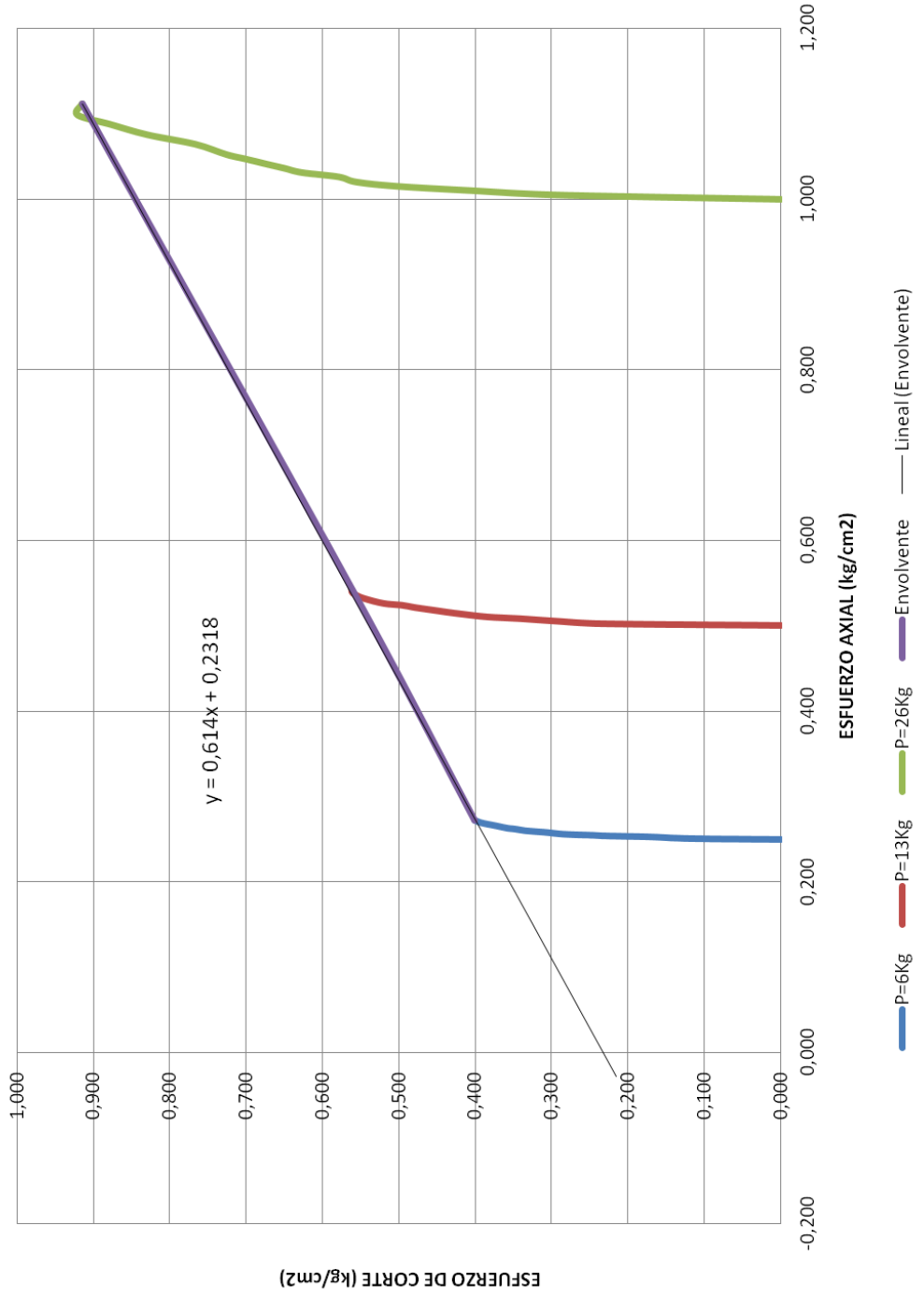
1
2

8,96%
9,96%

Arcilla Talud N°3



Arcilla Limosa Talud N°4



Arcilla Limosa Talud N°4

