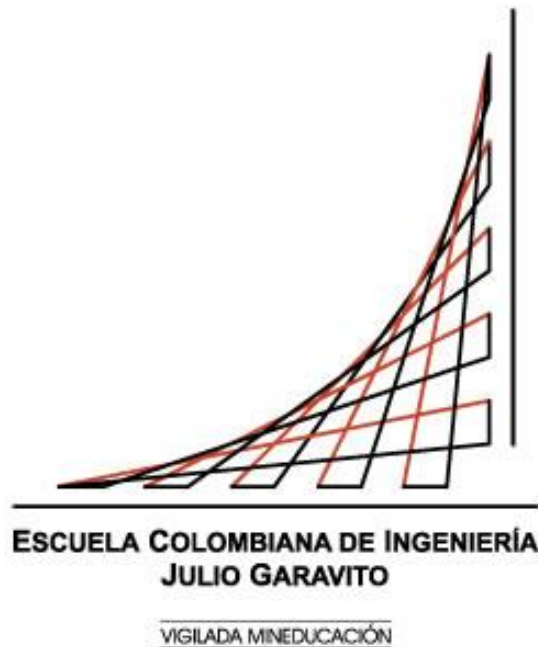


**MODELACIÓN FÍSICA DE LAS RAÍCES EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA:
Resistencia mecánica y leyes de escala.**



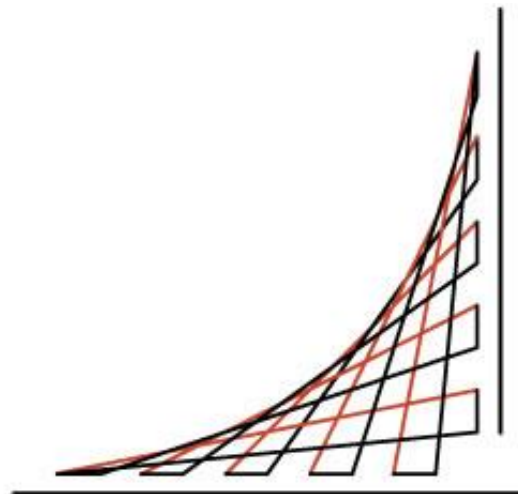
**BROCHERO VERGARA MAYRA ALEJANDRA
LEÓN SANABRIA CAMILO ANDRÉS**

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2020

SEMILLERO DE GEOTÉCNIA

MODELACIÓN FÍSICA DE LAS RAÍCES EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA:

Resistencia mecánica y leyes de escala.



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

VIGILADA MINEDUCACIÓN

BROCHERO VERGARA MAYRA ALEJANDRA

LEÓN SANABRIA CAMILO ANDRÉS

Trabajo de investigación para optar al énfasis en Geotecnia

DIRECTOR:

PhD. CATALINA LOZADA LÓPEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2020

Contenido

Índice de ilustraciones	6
Índice de tablas.....	7
Índice de gráficos.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ARBOL DE PROBLEMAS.....	10
3. OBJETIVOS	11
3.1. Objetivo General	11
3.2. Objetivos Específicos	11
4. JUSTIFICACIÓN	12
5. ESTADO DEL ARTE	17
5.1. Aplicaciones del sistema vetiver manual técnico de referencia.	17
5.2. Técnicas experimentales realizadas para Vetiver Panamá, S.A.	17
5.3. Vetiver Systems Application - A Technical Reference Manual. Authors - Paul Truong, Tran Tan Van, and Elise Pinners.....	17
5.4. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster.	18
5.5. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial.	19
6. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1. Modelación física	19
6.2. Análisis de estabilidad	22
6.3. Pasto vetiver	23
7. METODOLOGÍA	24
7.1. Montaje experimental.....	24
7.2. Ensayos de laboratorio	25
8. ACTIVIDADES.....	26
9. CRONOGRAMA.....	27
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
10.1. Ensayos de tracción para una fibra.....	28
10.2. Ensayos de tracción para dos fibras	30
10.3. Efecto del número de fibras en la resistencia a la tracción.	32

10.4.	Modelación física de raíces utilizando fibra de fique	34
11.	DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA.....	37
11.1.	Modelación para 10g en centrífuga geotécnica	38
	Dimensiones para el Prototipo	38
	Dimensiones para el Modelo.....	38
11.2.	Simulación en SLIDE del modelo	41
11.1.	Modelación para 50g en centrífuga geotécnica	44
	Dimensiones en el Prototipo	44
	Dimensiones en el Modelo.....	45
11.2.	Propuesta de ensayos para el estudio de la influencia de las raíces en la estabilidad de taludes	47
11.3.	Ensayos para estudiar el efecto del diámetro de raíces:	47
11.4.	Ensayos para estudiar el efecto del RAR:.....	48
12.	CONCLUSIONES	48
13.	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	49
14.	BIBLIOGRAFIA.....	49

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Pruebas de carga. Lozada, C. (2019). Modelación física. Recuperado de: Diapositivas leyes de escala.	20
Ilustración 2 Modelamiento físico. Lozada, C. (2019). Modelación física. Recuperado de: Diapositivas leyes de escala.	20
Ilustración 3 Centrifuga geotécnica Escuela Colombiana de Ingeniería. Lozada, C. (2019) Modelación física. Recuperado de: Diapositivas leyes de escala.	21
Ilustración 4 Área de influencia del vetiver. Herrera, J. (2017). Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con vetiver. Recuperado de: Revista de la Escuela Colombiana De Ingeniería, N° 108.	23
Ilustración 5 Características del pasto vetiver. Agriflora (2008). Introducción al vetiver. Recuperado de: http://www.vetiverpr.info/2010/06/introduccion-al-vetiver.html	24
Ilustración 6 Probetas de fique.....	25
Ilustración 7 Reconstitución del suelo	25
Ilustración 8 Ensayo de tracción del fique	26
Ilustración 9 (RAR) Para pasto vetiver con seis meses de crecimiento. (Eab, Likitlersuang, Takahashi,2015). Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080615001274	35
Ilustración 10 Dimensiones que ocupará el caolín en la centrifuga geotécnica con 10g. Dimensiones para el modelo.....	39
Ilustración 11 Modelo para un esqueje para 10g	40
Ilustración 12 Vista en planta de la distribución de las fibras de fique para 10g	41
Ilustración 13 Análisis del talud en Slide, modelo 1. dimensiones para el prototipo a 10G.	42
Ilustración 14 Análisis del talud en Slide, modelo 2. dimensiones para el prototipo a 10G.	43
Ilustración 15 Análisis del talud en Slide, modelo 3. dimensiones para el prototipo a 10G.	43
Ilustración 16 Modelo para un esqueje para 50g	46
Ilustración 19 Vista en planta de la distribución de las fibras de fique para 50g	47

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de materiales	12
Tabla 2 Comparación de raíces.....	14
Tabla 3 Diámetro y resistencia de varias hierbas	18
Tabla 4 Propiedades mecánicas del fique	18
Tabla 5 Características del fique	19
Tabla 6 Leyes de escala	21
Tabla 7 Parámetros técnicos de la centrífuga	22
Tabla 8 Parámetros determinados en investigaciones anteriores	23
Tabla 9 Esfuerzos obtenidos para las diez probetas de una fibra	28
Tabla 10 Esfuerzos obtenidos para las diez probetas de dos fibra	30
tabla 11 Parámetros de las fibras de fique.....	36
tabla 12 Parámetros del pasto vetiver	36
tabla 13 propuesta de ensayos efecto del diámetro de la raíz.....	48
tabla 14 propuesta de ensayos efecto del RAR.	48

Índice de gráficos

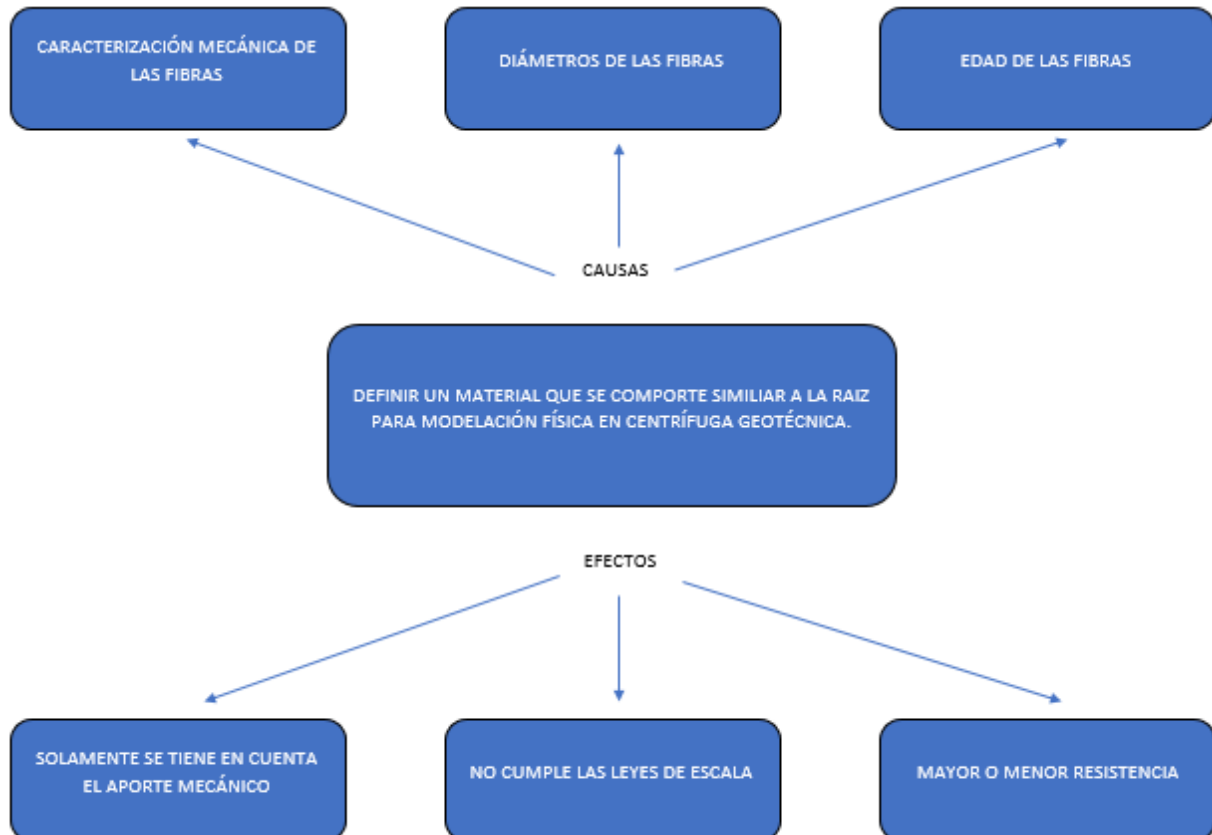
Gráfica 1 Relación entre diámetro y módulo de elasticidad	13
Gráfica 2 Clasificación del suelo para el modelo	28
Gráfica 3 Esfuerzo vs número de ensayo para una fibra.....	29
Gráfica 4 Diámetro vs Esfuerzo para una fibra.....	29
Gráfica 5 Ajuste de los esfuerzos de tracción de una fibra a la distribución normal.....	30
Gráfica 6 Número de ensayo vs esfuerzo para dos fibras.....	31
Gráfica 7 Diámetro vs esfuerzo para dos fibras.....	31
Gráfica 8 Ensayo de resistencia a la tracción con dos fibras	32
Gráfica 9 Relación entre la resistencia a la tracción y el número de fibras	32
Gráfica 10 Ajuste exponencial decreciente para una fibra	33
Gráfica 11 Ajuste exponencial decreciente para dos fibras	33
Gráfica 12 Ajuste exponencial decreciente para todas las probetas.....	34
Gráfica 13 Comportamiento de esfuerzo a la tracción vs diámetro del vetiver. Herrera, J. (2015). Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con vetiver. Recuperado de: Revista de la Escuela Colombiana De Ingeniería, N° 108.....	34

1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de un talud juega un papel muy importante en cualquier obra lineal y más para un país como Colombia donde la topografía nos obliga permanentemente a realizar obras geotécnicas como taludes, cortes o terraplenes. Lo anterior, nos lleva a buscar alternativas no convencionales de estabilidad como la que se lleva a cabo con vegetación; para modelar estas alternativas a escala real se requiere incurrir en altos costos económicos y tiempos de montaje, sin embargo existe la posibilidad de modelar a escala reducida utilizando la centrifuga geotécnica en la que si se aplica correctamente las leyes de escala se espera poder simular en este caso el aporte mecánico de las raíces utilizando fibras de fique.

Este proyecto tiene como fin la caracterización de los materiales para simular correctamente modelo – prototipo de un talud arcilloso estabilizado con pasto vetiver. Entre algunos aspectos importantes se encuentra la caracterización mecánica de las fibras de fique y raíces del vetiver apoyados en de otros trabajos investigativos para manejar ordenes de magnitud y comparar los resultados.

2. ARBOL DE PROBLEMAS



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- Seleccionar un material que simule correctamente las raíces considerando las leyes de escala para la modelación física en geotecnia.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica para determinar la información existente acerca de las propiedades mecánicas del pasto.
- Determinar la resistencia a la tensión de las fibras naturales que permitan simular las raíces en centrífuga geotécnica.
- Caracterización de suelo de la modelación a través del límite líquido para la modelación física.
- Encontrar la relación entre el número de fibras de fique y la resistencia a la tensión con el fin de simular un conjunto de raíces que cumplan con las leyes de escala para la modelación física en centrífuga geotécnica.

4. JUSTIFICACIÓN

Para definir el material que simula las raíces del pasto vetiver se considera necesario tener un orden de magnitud en cuanto a variables como resistencia a la tensión, diámetro y módulo de elasticidad que permitan que las condiciones del prototipo sean modeladas correctamente.

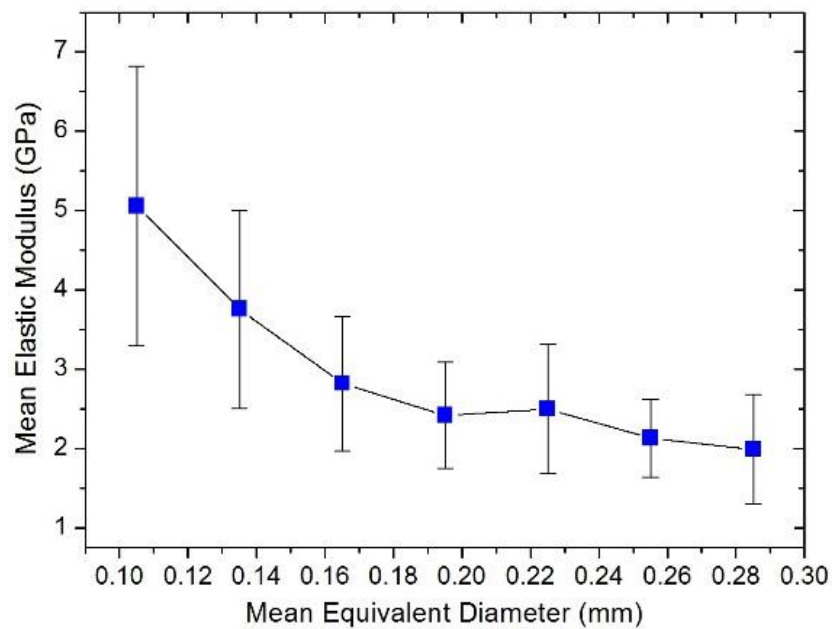
La tabla 1 corresponde a algunos materiales que pueden servir para la modelación en centrifuga geotécnica, cabe resaltar que el que mejor se adecua a las condiciones no sólo del prototipo sino de la reconstitución de las raíces es el fique sin tratar debido a que si se plantara pasto vetiver la investigación sería más compleja.

TABLA 1 COMPARACIÓN DE MATERIALES

MATERIAL	LONGITUD O DIÁMETRO	RESISTENCIA A LA TENSIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	REFERENCIA
Fique sin tratar	1mm/min 50 mm/min	34,38 MPa 42,03 MPa	757,92 MPa 858,48 MPa	Navarro y Ramírez 2014
Fique sin tratar	0,09 – 0,30 mm		2 - 5 GPa promedio	Andrade et al 2015
Fique sin tratar	D= 0,2-0,04mm	197± 65 MPa	5,7+-1,8 GPa	Gómez et al 2012
Fique sin tratar	D = 0,16-0,42 mm	43-571-promedio 132 MPa	8,2-9,1 GPa	Delvasto 2010
Pasto Vetiver (raíces)	0,2 – 2,2 mm 0,66 ± 0,32 mm	40 – 120 MPa 75 MPa promedio D (0,7 – 0,8 mm) 85,10 ± 31,2 MPa		Herrera, J. 2015
Makino Bamboo (Raíces)	20,6 ± 1,32 mm 20,6 ± 2,64 mm	20,53± 5,06 MPa 29,81 ± 11,27 MPa		Lin et al 2010
Pasto Vetiver	D= 0,7-0,8 mm	75 MPa		Noorasyikin 2016

La relación que existe entre el incremento de tensión en el ensayo de tracción y el incremento de deformación longitudinal corresponde al módulo de elasticidad, el cual para este caso se encuentra relacionado con la longitud o diámetro del material como se muestra en el gráfico 1 debido a que entre menor sea el diámetro de la

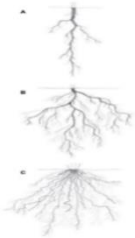
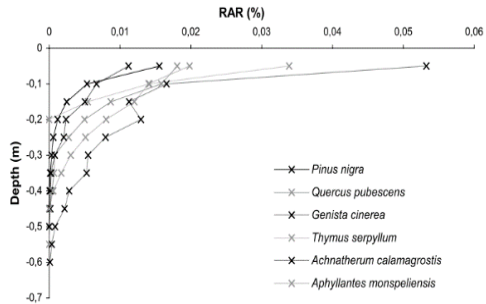
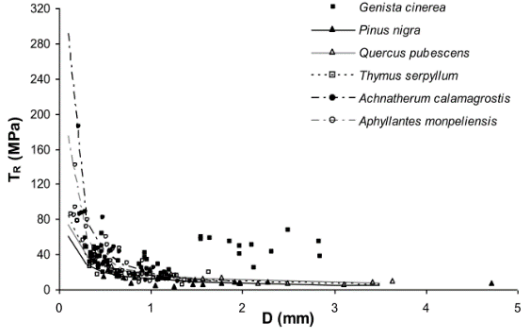
mayor es el módulo de elasticidad lo que significa que la relación que existe entre estos dos parámetros es inversamente proporcional.

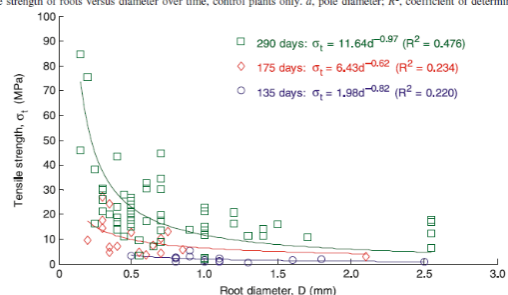
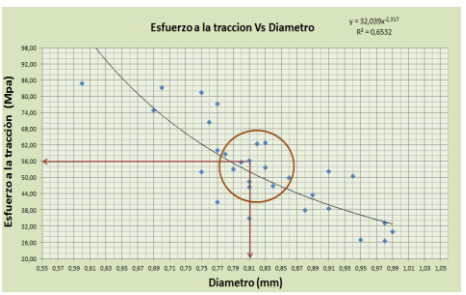


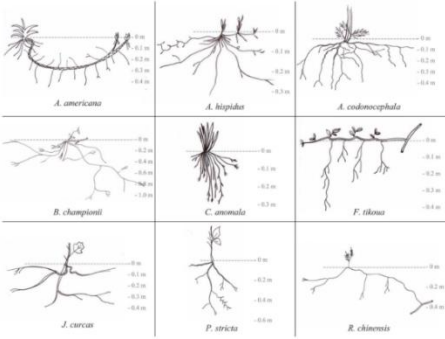
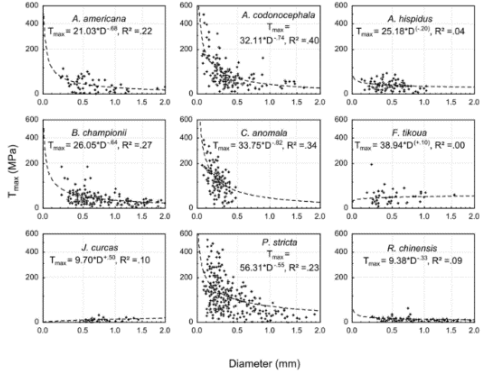
GRÁFICA 1 RELACIÓN ENTRE DIÁMETRO Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

Adicionalmente, en la tabla 2 se presentan otras investigaciones que también muestran la relación que existe entre el módulo de elasticidad y el diámetro de las raíces. Con dichas referencias se encuentra que a medida que el diámetro disminuye, la resistencia de las raíces como anclaje en obras geotécnicas en este caso taludes es mayor.

TABLA 2 COMPARACIÓN DE RAÍCES

ESPECIE	CARACTERÍSTICAS	PROFUNDIDAD Y FORMA DE LAS RAÍCES.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LA RAÍZ	REFERENCIA
<p>- Dos especies de árbol: <i>Pinus nigra</i> y <i>Quercus pubescens</i>.</p> <p>- Dos especies de arbustos: <i>Genista cinerea</i> y <i>Thymus serpyllum</i></p> <p>- Dos especies de hierbas: <i>Achnatherum calamagrostis</i> and <i>Aphyllantes monspeliensis</i>.</p>	<p>Especies provenientes de Del noreste Sisteron (Alpes-24 25 de-Haute-Provence department, France).</p> <p>Clima montañoso sub-mediterraneo</p>	<p>(A) Tap-like root system of juvenile trees (<i>P. nigra</i> and <i>Q. pubescens</i>) with a vigorous central vertical root and few fine laterals, (B) Tap-like root system of shrubby species (<i>G. cinerea</i> and <i>T. serpyllum</i>) with an identifiable larger central root and many thinner laterals and (C) heart root system of graminoid-shaped herbaceous species (<i>A. calamagrostis</i> and <i>A. monspeliensis</i>) with many fibrous roots.</p> <p>(B)</p>  <p>La relación del area de raíces RAR se presenta en la siguiente figura:</p> 		<p>(Burylo, et al., 2010).</p>

ESPECIE	CARACTERÍSTICAS	PROFUNDIDAD Y FORMA DE LAS RAÍCES.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LA RAÍZ	REFERENCIA
<p>Willow (Salix viminalis, var. Tora; Cheviot Trees Ltd., Berwick-upon-Tweed, UK)</p>	<p>La especie se seleccionó debido a su rápido crecimiento y por ser el árbol pionero usado en geingeniería.</p> <p>Los árboles de willow de 70mm de largo y 4mm de diámetro se almacenaron a -4°C antes de ser sembrados en el talud del modelo</p> <p>Para la escala seleccionada de N=15, si la raíz del modelo es 1mm en el prototipo esta será de 15mm y para una profundidad de raíz en el modelo de 10mm en el prototipo corresponde a 1.5m</p>	<p>El factor de escala utilizado para la modelación fue de N=15.</p> <p>Para los willow jóvenes (29 días) se encontró una variación del diámetro de la raíz entre 0.7 y 2.6mm (promedio 1.3mm) y un RAR promedio de 0.035% en la posición del plano de falla.</p> <p>Para los willows de mayor edad (290 días) se encontró un diámetro promedio de 0.4mm. El RAR promedio fue de 0.031%.</p>	<p>Fig. 1. Tensile strength of roots versus diameter over time, control plants only. d, pole diameter; R^2, coefficient of determination.</p> 	<p>(Sonnenberg, et al., 2010)</p>
				<p>Herrera, J. 2015</p>

ESPECIE	CARACTERÍSTICAS	PROFUNDIDAD Y FORMA DE LAS RAÍCES.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LA RAÍZ	REFERENCIA
	<p>En el estudio realizado por los autores se demostró que todas las especies de plantas tienen una composición de raíces necesaria para eficientemente estabilizar las fallas superficiales en taludes.</p> <p>Se sugiere el uso de mezcla de especies, así como el uso espacial de las mismas. Estas mezclas han demostrado ser eficientes al disminuir la erosión.</p>	<p>Las especies utilizadas en el estudio mencionado se muestran a continuación</p> 	<p>Ensayos de resistencia a la tracción de las especies seleccionadas se muestran en la siguiente figura.</p> 	<p>(Ghestem, et al., 2014)</p>

5. ESTADO DEL ARTE

5.1. Aplicaciones del sistema vetiver manual técnico de referencia.

Indica que el sistema vetiver es una medida amigable con el medio ambiente, económica, de bajo mantenimiento y efectiva cuando es utilizada para la conservación de suelos, estabilización de taludes inclinados y rehabilitación de tierras.

Adicionalmente, muestra que las raíces del vetiver amarran el suelo y al mismo tiempo impiden que sea separado por flujos de agua de alta velocidad. Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia período i, año 2014.

Por medio de esta investigación se define que el vetiver es un sistema radicular de largo entre [2,3.5m] en los que las raíces son fuertes y masivas que permiten la reducción en la erosión y estabilización del suelo de la ladera en la que se plantan en filas a través de la pendiente.

Por otro lado, encontraron que las raíces de vetiver refuerzan un suelo por transferencia de esfuerzo de corte de la matriz del suelo a las inclusiones de tracción, de tal manera que la resistencia al corte de los primeros [1-2m] es mejorada y estabilizada por el vetiver.

Finalmente la investigación menciona que se han llevado a estudios en otros países y estos muestran que el uso de vetiver sirve para taludes con pendientes entre 30-60° mientras que en altas pendientes se debe hacer uso de geotextiles y/o métodos mecánicos y que la resistencia a la tensión de la raíz varía entre 180 y 40MPa para un rango de diámetro de 0.2 a 2.2 mm pero que para un diámetro común de raíz entre [0.7,0.8mm] la resistencia media corresponde a 75MPa.

5.2. Técnicas experimentales realizadas para Vetiver Panamá, S.A.

Dichas técnicas muestran que las raíces crecen hasta 4 metros de profundidad y que tienen una resistencia a tensión igual a 75MPa y que adicionalmente mejora la resistencia al corte del suelo hasta en un 40%.

5.3. Vetiver Systems Application - A Technical Reference Manual. Authors - Paul Truong, Tran Tan Van, and Elise Pinnars.

Como se observa en la tabla 3, caracterizaron algunas raíces de plantas y determinaron para cada una de ellas la resistencia a la tracción para mostrar que

esta propiedad en el vetiver es casi tres veces mayor que la de todas las plantas analizadas.

TABLA 3 DIÁMETRO Y RESISTENCIA DE VARIAS HIERBAS

Césped	Diámetro medio de raíces (mm)	Resistencia media a la tracción (MPa)
Juncellus tardío	0.38 ± 0.43	24.50 ± 4.2
Hierba Dallis	0.92 ± 0.28	19,74 ± 3,00
Trébol blanco	0.91 ± 0.11	24,64 ± 3,36
Vetiver	0.66 ± 0.32	85,10 ± 31,2
Ciempies común	0.66 ± 0.05	27,30 ± 1,74
Bahia grass	0.73 ± 0.07	19,23 ± 3,59
Hierba de manila	0.77 ± 0.67	17.55 ± 2.85
grama	0.99 ± 0.17	13,45 ± 2,18

(TRUONG, VAN, PINNERS, 2000). THE VETIVER SYSTEM FOR INFRASTRUCTURE PROTECTION AND DISASTER MITIGATION .
 RECUPERADO DE: [HTTP://WWW.VETIVER.ORG/TVN-HANDBOOK%20SERIES/TVN-SERIES2-1-INFRASTRUCTURE.HTM#STAB2](http://www.vetiver.org/TVN-HANDBOOK%20SERIES/TVN-SERIES2-1-INFRASTRUCTURE.HTM#STAB2)

5.4. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster.

Mencionan que, en investigaciones llevadas a cabo por la Universidad de los Andes de Colombia, el fique ha sido caracterizado mediante ensayos de tensión, análisis del comportamiento mecánico y ha generado como resultado las propiedades que se presentan en la tabla 4.

TABLA 4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FIQUE

<i>Propiedad</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Resistencia a la Tensión (MPa)	305,15	200,00	625,20
Módulo de Elasticidad (GPa)	7,52	5,50	25,50
Porcentaje de elongación a la fractura (%)	4,96	3,20	5,70

(CONTRERAS, HORMAZA, MARAÑÓN, 2009). FRACTOGRAFÍA DE LA FIBRA NATURAL EXTRAÍDA DEL FIQUE Y DE UN MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON TEJIDO DE FIBRA DE FIQUE Y MATRIZ RESINA POLIÉSTER. RECUPERADO DE:
[HTTP://WWW.RLMM.ORG/ARCHIVOS/S01/N1/RLMMART-09S01N1-P57.PDF](http://www.rlmm.org/ARCHIVOS/S01/N1/RLMMART-09S01N1-P57.PDF)

Adicional a esto, señalan que, para obtener la tensión de las fibras de fique, las muestras se someten a ensayos bajo la norma ASTM C1557

5.5. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial.

Para obtener la caracterización de los parámetros mecánicos de las fibras naturales de fique emplearon una máquina universal de ensayos marca INSTRON modelo 3366 con mordazas neumáticas especiales para ensayos en fibras y una celda de carga de 100N. De este modo y como se observa en la tabla 5 encontraron la resistencia máxima a la tensión de las fibras de fique

TABLA 5 CARACTERÍSTICAS DEL FIQUE

Característica	Fique	Media
Diámetro equivalente, (mm)	0,160 – 0,420	0,240
Densidad aparente, (gr/cm ³)	0,720	----
Densidad específica, (gr/cm ³)	1,740	---
Absorción de agua, (%)	60	
Resistencia máxima a la tensión, (MPa)	43 – 571	132,400
Elongación ultima, (%)	9,800	
Módulo de elasticidad	8,200 – 9,100	

(MUÑOZ, HIDALGO, MINA, 2014). FIBRAS DE FIQUE UNA ALTERNATIVA PARA EL REFORZAMIENTO DE PLÁSTICOS. INFLUENCIA DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL. RECUPERADO DE: [HTTP://WWW.SCIOLO.ORG.CO/PDF/BSAA/V12N2/V12N2A07.PDF](http://www.scielo.org.co/pdf/BSAA/v12n2/v12n2a07.pdf)

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Modelación física

La modelación física en geotecnia es un factor importante que permite comprender, analizar y determinar distintas propiedades o comportamientos del suelo frente a numerosas posibilidades de carga, falla y respuesta de este en situaciones ingenieriles, en particular para este caso de investigación, en geotecnia.

La modelación en escala real es la herramienta que permite representar adecuadamente fenómenos que ocurren en gran magnitud sobre el suelo en la vida real o cotidianamente, así mismo en situaciones ingenieriles importantes que requieren un estudio detallado por parte del comportamiento del suelo para llevarse a cabo de manera correcta. Para ello se plantea que las condiciones de esfuerzos y deformaciones en el prototipo y en el modelo se mantienen, lo cual facilita la realización de la modelación manteniendo las mismas condiciones respecto al

prototipo modelado a escala real, como por ejemplo se observa en la ilustración 1; la modelación de una prueba de carga de cimentaciones.



ILUSTRACIÓN 1 PRUEBAS DE CARGA. LOZADA, C. (2019). MODELACIÓN FÍSICA. RECUPERADO DE: DIAPOSITIVAS LEYES DE ESCALA.

Una clara desventaja de este proceso de modelamiento a escala real es el alto costo de construcción, ya que se requiere una gran inversión para realizar adecuadamente este modelamiento, también el tiempo de experimentación al ser fiel al modelo causa que se agregue un grado de complicación extra al momento de modelar adecuadamente.

Sin embargo, se pueden realizar efectivamente estos procesos de modelación en escala reducida, prototipo (escala real) y modelo (escala reducida), obteniendo resultados igual de satisfactorios de si se implementase un modelamiento a escala real, el costo de construcción es relativamente más económico e igualmente el tiempo al momento de realizar este proceso de modelación. En el proceso de modelación física como se observa en la ilustración 2, las condiciones de los esfuerzos y deformaciones en el prototipo y en el modelo deben mantenerse.

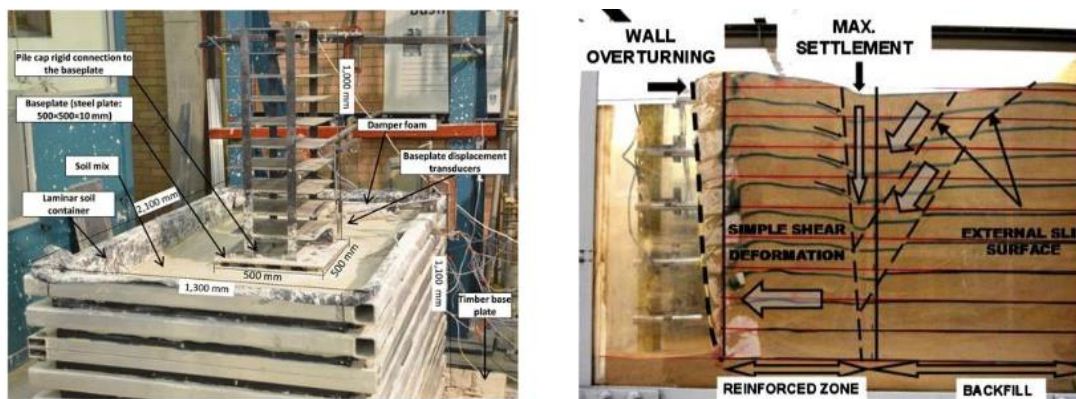


ILUSTRACIÓN 2 MODELAMIENTO FÍSICO. LOZADA, C. (2019). MODELACIÓN FÍSICA. RECUPERADO DE: DIAPOSITIVAS LEYES DE ESCALA.

Partiendo de la ecuación 1 debido a que los esfuerzos y deformaciones tanto en el prototipo como en el modelo deben mantenerse y a su vez se genera un aumento en las fuerzas de masa al incrementar la aceleración de la gravedad en el modelamiento.

$$\sigma = \rho gh \quad (1)$$

Una de las ventajas de la centrifuga geotécnica que se plantea en la investigación es que permite aumentar efectivamente N veces la aceleración de la gravedad aplicada a un modelo reducido deseado.

En la tabla 6, se observan las leyes de escala que permiten realizar un modelamiento correcto bajo parámetros establecidos y demostrados de Modelo - Prototipo; con la finalidad de que los resultados obtenidos en este proceso tengan concordancia y sean los que se requieran para cumplir satisfactoriamente con lo planteado.

TABLA 6 LEYES DE ESCALA

Dimensiones	Ley de escala	Modelo/Prototipo
Aceleración	m/s ²	N
Longitud	m	1/N
Esfuerzo	kPa	1
Deformación	...	1
Densidad	kg/m ³	1
Peso unitario	N/m ³	N
Fuerza	N	1/N ²
Temperatura	°C	1
Tiempo: Difusión	s	N ²

LOZADA, C. (2019). MODELACIÓN FÍSICA. RECUPERADO DE: DIAPOSITIVAS LEYES DE ESCALA.

Para llevar a cabo la investigación, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito cuenta con la centrifuga geotécnica que se observa en la ilustración 3, la cual se adapta a la capacidad y dimensiones requeridas para la simulación de la vegetación como sistema de anclaje en una ladera.

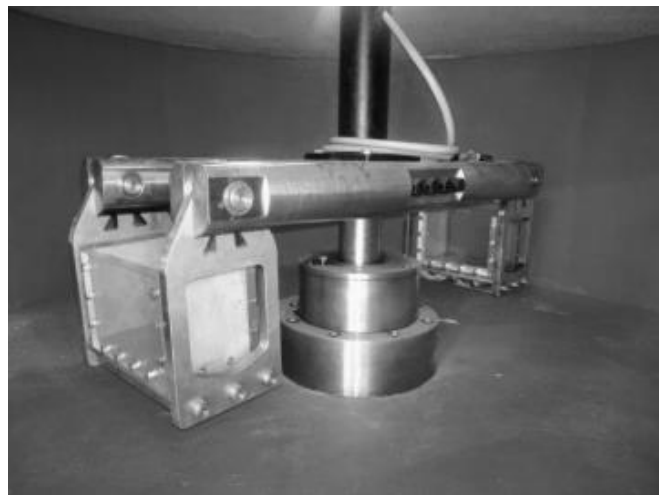


ILUSTRACIÓN 3 CENTRIFUGA GEOTÉCNICA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. LOZADA, C. (2019) MODELACIÓN FÍSICA. RECUPERADO DE: DIAPOSITIVAS LEYES DE ESCALA.

Dicha centrifuga tiene los parámetros técnicos mostrados en la tabla 7, los cuales sirvieron para simular adecuadamente el tema en investigación.

TABLA 7 PARÁMETROS TÉCNICOS DE LA CENTRÍFUGA

Rango de aceleración	10 to 200 g
Radio a la plataforma	610 mm
Rampa de aceleración recomendada	1 min
Rampa de frenado recomendada	2 min
Velocidad máxima	582.6 RPM @ 200g
Carga a la aceleración máxima de 200g	12 kg
Dimensiones útiles (canastas basculantes):	
• Largo	230 mm
• Ancho	150 mm
• Alto	150 mm
Desbalance máximo	1%
G-fuerza	2.4 g ton
Conectores rotativos	4 @ 100 PSI
Potencia eléctrica del motor	5 HP

LOZADA, C. (2019). MODELACIÓN FÍSICA. RECUPERADO DE: DIAPOSITIVAS LEYES DE ESCALA.

6.2. Análisis de estabilidad

Los parámetros geomecánicos y su cuantificación principalmente en función de la ley de rotura son un factor importante debido a que para poder realizar adecuadamente el proceso de modelación, los materiales como el suelo a modelar y las fibras de fique que simularán el pasto Vetiver tienen que cumplir con determinadas especificaciones o relaciones para el proceso de modelamiento.

Sin embargo, es necesario que los parámetros que se obtuvieron como resultado se puedan traducir o relacionar en base a la estabilidad de la ladera o talud. Igualmente se pretende identificar como varía el factor de seguridad de este, al igual que la influencia de la pendiente en la modelación.

Previamente, algunos investigadores han realizado ensayos de este tipo con la finalidad de comparar la capacidad de soporte que puede aportar la vegetación de pasto vetiver en función de sus raíces, evaluando posteriormente los factores de seguridad de las laderas o taludes, el ensayo de corte directo es clave para identificar lo anteriormente mencionado, así como también los valores de la cohesión y el ángulo de fricción del material y algunos de esos resultados obtenidos se observa en la tabla 8.

TABLA 8 PARÁMETROS DETERMINADOS EN INVESTIGACIONES ANTERIORES

Parámetros de análisis

Nombre	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
Suelo	21	5	32
Suelo y vetiver	19	65	37

HERRERA, J. (2017). EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS DE LADERA CUBIERTOS CON VETIVER. RECUPERADO DE: REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, N° 108.

El análisis con el pasto Vetiver implica recordar los resultados obtenidos, así mismo los valores del factor de seguridad de la ladera o talud con el fin de establecer las zonas en las cuales se requiera conocer las propiedades del suelo y como cambiarían dependiendo de la simulación de la condición de vegetación a cargo del pasto vetiver. El área de influencia de la planta como se observa en la ilustración 4 es prácticamente perpendicular al plano en el cual se siembran sus semillas ya que las raíces crecerán seguramente de esa misma manera, es decir, perpendiculares a dicho plano.

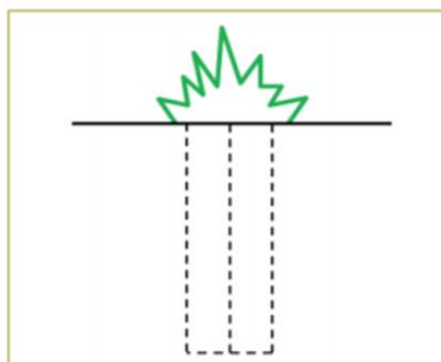


ILUSTRACIÓN 4 ÁREA DE INFLUENCIA DEL VETIVER. HERRERA, J. (2017). EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS DE LADERA CUBIERTOS CON VETIVER. RECUPERADO DE: REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, N° 108.

6.3. Pasto vetiver

El pasto Vetiver se caracteriza por tener hojas de largo comprendido entre [0.3 m, 1 m] y ancho entre [4mm,10mm], su sistema radicular es de corta extensión en relación con el largo que posee sobre el eje vertical; es decir, se extiende aproximadamente 0,5 metros ya que principalmente se desarrolla entre 2m a 4m en profundidad. De igual manera y como se observa en la ilustración 5 se caracterizan porque tener raíces muy fuertes, rígidas, largas, verticales y de espesor uniforme.



ILUSTRACIÓN 5 CARACTERÍSTICAS DEL PASTO VETIVER. AGRIFLORA (2008). INTRODUCCIÓN AL VETIVER. RECUPERADO DE: [HTTP://WWW.VETIVERPR.INFO/2010/06/INTRODUCCION-AL-VETIVER.HTML](http://www.vetiverpr.info/2010/06/introduccion-al-vetiver.html)

La mayoría de las raíces son muy finas y su diámetro promedio se encuentra entre [0.5mm-1.0mm], adicionalmente tienen una fuerza de tensión promedio probada de alrededor de 75 MPa incrementando considerablemente la resistencia al cortante del suelo en la medida que desarrolla su sistema radicular (Hengchaovanich y Nilaweera, 1996, citado por TRUONG et al., 2009).

El pasto Vetiver posee una gran ventaja y es que crece en un amplio rango de fertilidad de suelos, se adapta bien desde una altura al nivel del mar, hasta los 2500 metros de altura sobre el nivel del mar, también se adecua a mayores alturas, pero su crecimiento es lento, es originario de zonas pantanosas, es resistente a altos niveles de humedad y finalmente algo importante es que resiste estar sumergido por largos periodos de tiempo.

7. METODOLOGÍA

7.1. Montaje experimental

Con el objetivo de llevar a cabo la simulación en centrifuga geotécnica se requieren ensayos previos que definan el material que simule las raíces y el suelo en el modelo.

Para la caracterización mecánica se definió que las fibras de fique son el material adecuado que posee una resistencia a la tracción similar a la de las raíces del pasto vetiver por tal motivo como se observa en la ilustración 6 se prepararon probetas con longitud libre de 8 cm como parámetro fijo y diámetro variable entre 0,2-0,37mm para todos los ensayos.

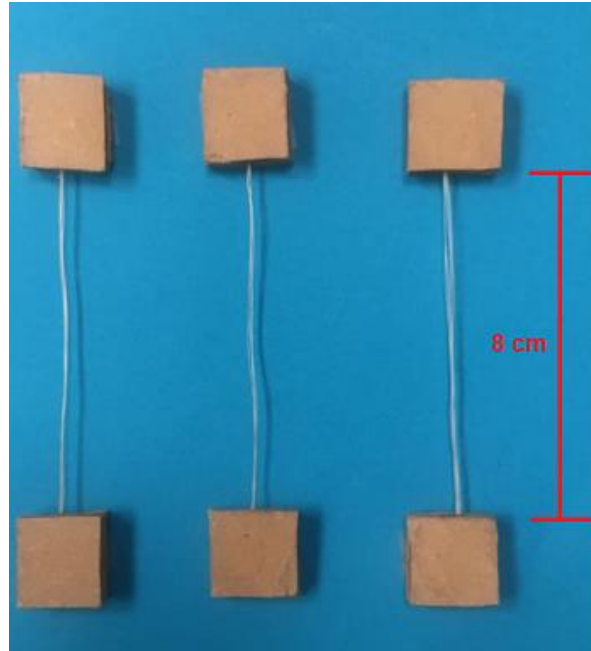


ILUSTRACIÓN 6 PROBETAS DE FIQUE

Para la modelación en centrifuga geotécnica del prototipo con suelo arcilloso se utilizó caolín, material al que se le realizó límite líquido como se observa en la ilustración 7 debido a que tienen características similares.

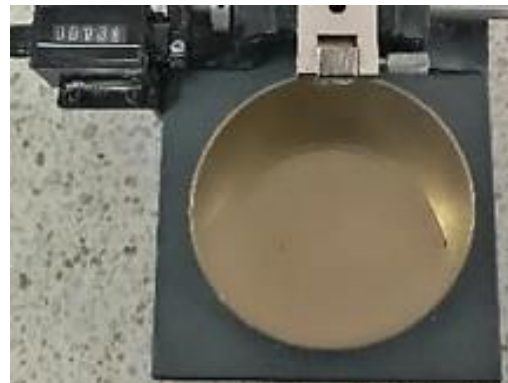
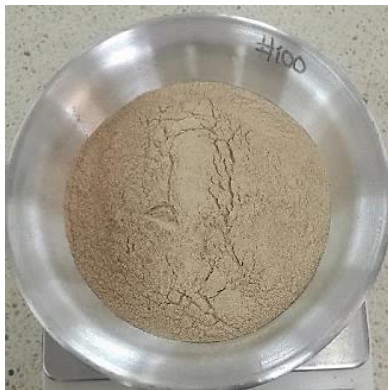


ILUSTRACIÓN 7 RECONSTITUCIÓN DEL SUELO

Ensayos realizados

- Ensayo de límite líquido
- Ensayo de tracción en fibras

7.2. Ensayos de laboratorio

Para la reconstitución del suelo se prepararon muestras de caolín y bentonita con porcentajes de 60% - 40%, 70% - 30%, 80% - 20%, 90% - 10% y 100%

respectivamente, se determinó que el mejor caracterizaba el suelo del prototipo 100% caolín.

Para la caracterización de las fibras de fique se utilizó la máquina que mide la resistencia a la tracción del laboratorio de ensayos de elementos mecánicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Como se observa en la ilustración 8 la probeta está constituida por el fique con longitud y diámetro conocido adicionalmente pequeños agarres en a los extremos para facilitar el ensayo.



ILUSTRACIÓN 8 ENSAYO DE TRACCIÓN DEL FIQUE

8. ACTIVIDADES

- Investigar la literatura respectiva para modelar adecuadamente el problema.
- Identificar parámetros y propiedades de la vegetación presente en el talud.
- Definir parámetros fijos y variables a lo largo de la investigación.
- Caracterización de las fibras de fique para la sección modelada del talud.
- Realizar ensayos de límites de Atterberg.
- Consolidar, reconstituir y preparar adecuadamente el suelo a ensayar teniendo en cuenta que el material a utilizar es caolín.
- Ensayos de tracción de las fibras de fique para el modelo.

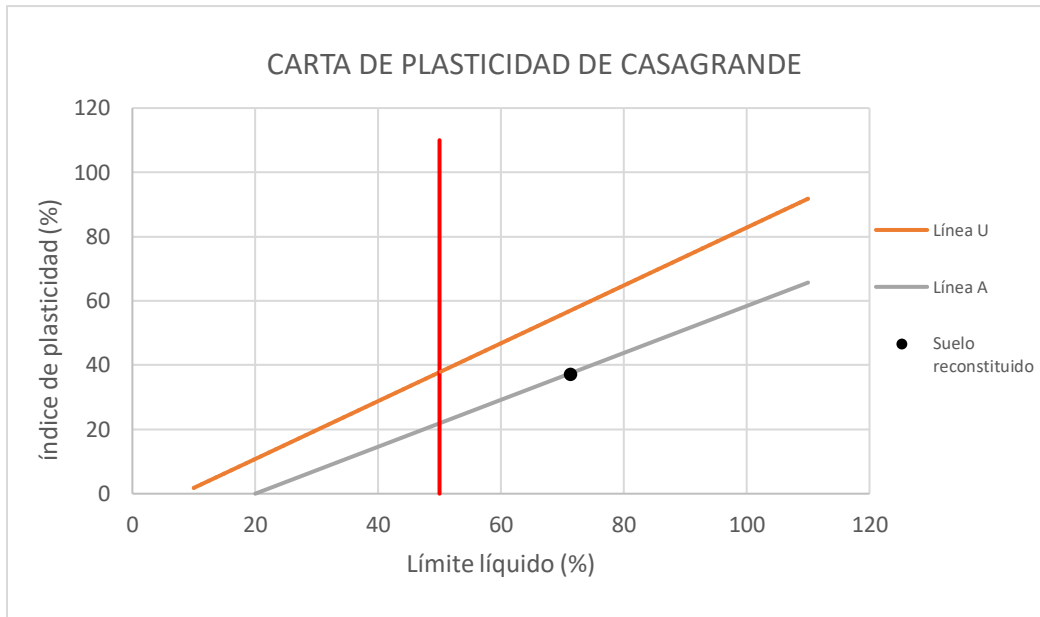
9. CRONOGRAMA

No.	ACTIVIDAD	RESPONSABLE		FECHA DE ENTREGA
		Brochero, M	León, C	
1	Investigar la literatura respectiva para modelar adecuadamente el problema	X	X	01/2020
2	Identificar parámetros y propiedades de la vegetación presente en el talud.	X		01/2020
3	Definir parámetros fijos y variables a lo largo de la investigación.	X	X	02/2020
4	Caracterización de las fibras de fique para la sección modelada del talud.		X	02/2020
5	Realizar ensayos de límites de Atterberg.	X		02/2020
6	Consolidar, reconstituir y preparar adecuadamente el suelo a ensayar teniendo en cuenta que el material a utilizar es caolín.		X	02/2020
7	Ensayos de tracción de las fibras de fique para el modelo	X	X	03/2020

10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los ensayos para la reconstitución del suelo con 100% caolín, el límite líquido es de 71,2% y el índice de plasticidad 37,4% calculado a partir de la correlación $IP = 0,73 * (LL - 20)$ de la carta de plasticidad de Casagrande que sirve para los suelos de grano fino y orgánico.

El gráfico 2 corresponde a la carta de plasticidad de Casagrande, la cual se usa para saber a qué tipo de suelo corresponde el de la modelación. Este gráfico muestra que el caolín es una arcilla de alta plasticidad conocida como CH.



GRÁFICA 2 CLASIFICACIÓN DEL SUELO PARA EL MODELO

10.1. Ensayos de tracción para una fibra

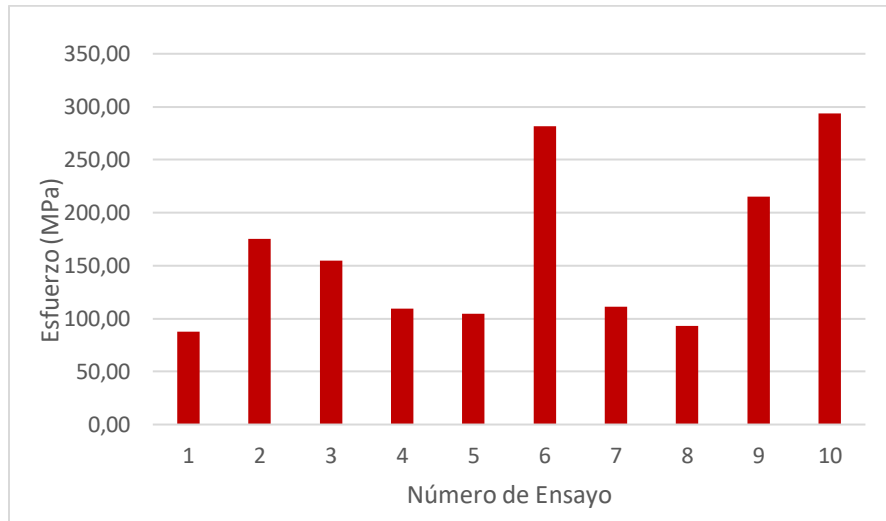
Para llevar a cabo el ensayo de tracción inicialmente se crearon diez probetas de una sola fibra similar a las que se muestran en la ilustración 6 con el fin de establecer parámetros de las fibras se midió el diámetro antes del ensayo de tracción.

Después de ensayar cada una de las fibras en la máquina que mide la resistencia a la tracción del laboratorio de ensayos de elementos mecánicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que se muestra en la ilustración 8, los resultados permitieron establecer el esfuerzo que se generó relacionando la fuerza realizada hasta la falla de las fibras de fique y el área de cada probeta. Tabla 9

TABLA 9 ESFUERZOS OBTENIDOS PARA LAS DIEZ PROBETAS DE UNA FIBRA

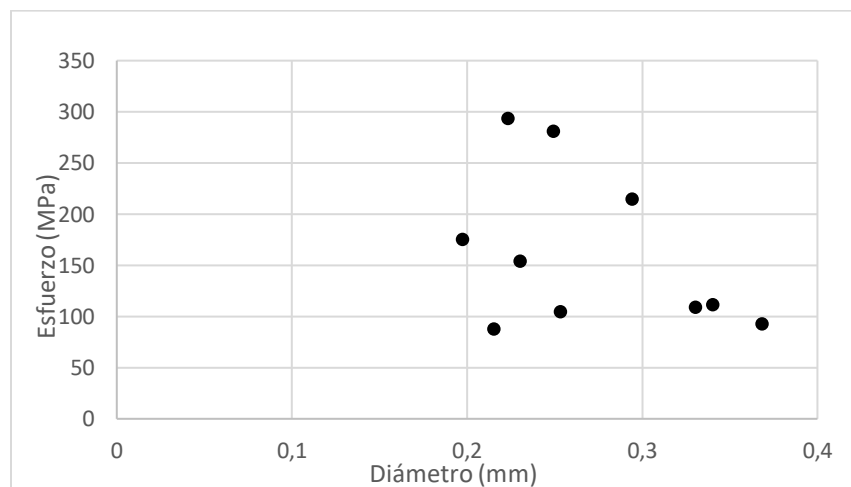
No. Probeta	Diámetro(mm)	Fuerza (N)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)
1-1	0,22	3,19	0,04	87,87
1-2	0,20	5,35	0,03	175,52
1-3	0,23	6,42	0,04	154,52
1-4	0,33	9,34	0,09	109,20
1-5	0,25	5,27	0,05	104,83
1-6	0,25	13,71	0,05	281,55
1-7	0,34	10,12	0,09	111,46
1-8	0,37	9,88	0,11	92,89
1-9	0,29	14,60	0,07	215,06
1-10	0,22	11,48	0,04	293,93

Estos resultados son observados en el gráfico 3, los cuales son obtenidos netamente del ensayo.



GRÁFICA 3 ESFUERZO VS NÚMERO DE ENSAYO PARA UNA FIBRA

Como se quiere encontrar la relación entre el diámetro de las fibras de fique con los resultados de los ensayos de tracción, el gráfico 4 resume este cuestionamiento debido a que según (Hengchaovanich y Nilaweera, 1996, citado por TRUONG et al., 2009) “la fuerza de tensión de las raíces de vetiver se incrementa con una reducción en el diámetro de las raíces”, y para las fibras se comprueba que el fique tiene un comportamiento similar al pasto vetiver debido a que a menor diámetro de las fibras en las probetas ensayadas mayor es la fuerza de tensión alcanzada por las mismas antes de la falla.

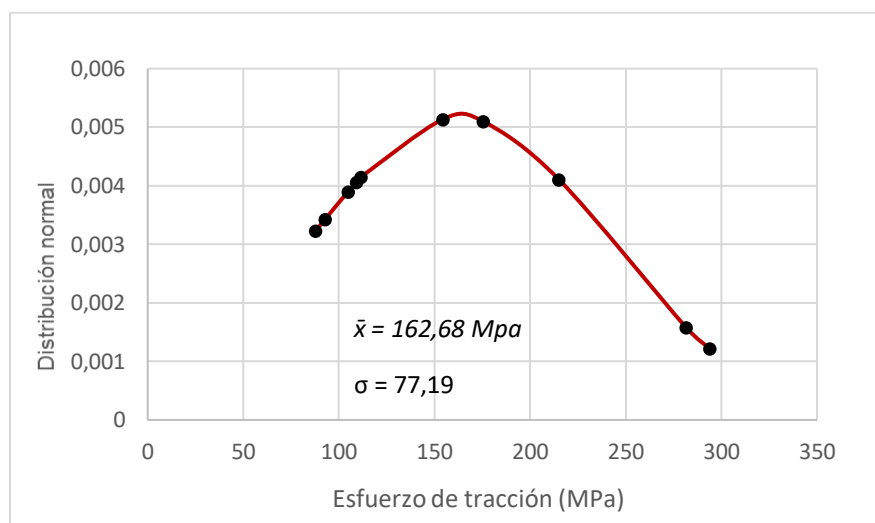


GRÁFICA 4 DIÁMETRO VS ESFUERZO PARA UNA FIBRA

Para comprobar la similitud de las raíces del pasto vetiver con las probetas ensayadas en cuanto a los esfuerzos a tracción soportados se realizó un ajuste apoyado en la distribución normal debido a que es un modelo teórico capaz de

aproximar satisfactoriamente el valor de una variable aleatoria continua a una situación ideal, en este caso el esfuerzo a tracción.

Como se muestra en el gráfico 5, los resultados obtenidos concuerdan con los resultados de las investigaciones de Gómez et al, Delvasto y Herrera J que se encuentran descritos en la tabla 1, debido a que donde la resistencia a la tracción resulto ser similar al de las raíces del pasto vetiver por lo tanto el fique es un buen material para realizar el modelamiento físico en centrifuga.



GRÁFICA 5 AJUSTE DE LOS ESFUERZOS DE TRACCIÓN DE UNA FIBRA A LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

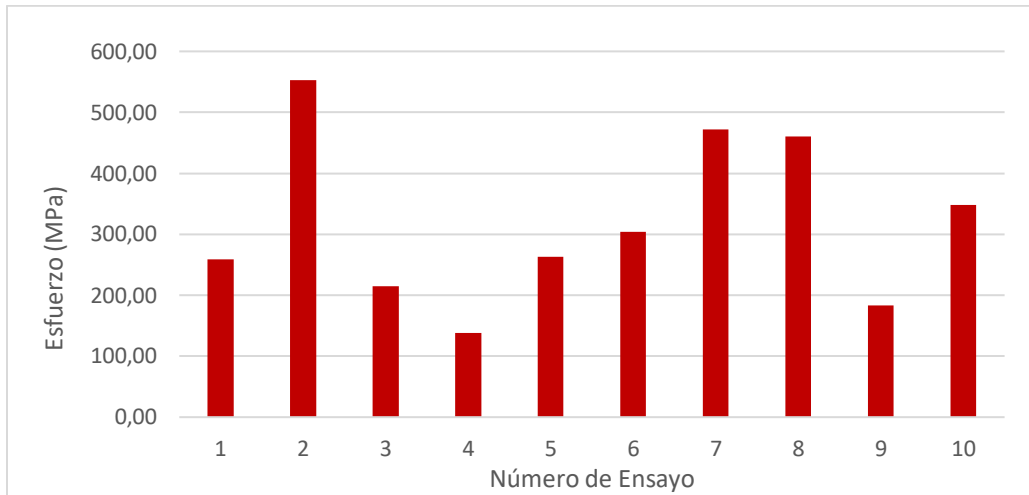
10.2. Ensayos de tracción para dos fibras

Para hacer nuevamente los ensayos de tracción en la máquina de ensayos de elementos mecánicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito mostrada en la ilustración 6 se realizó el mismo procedimiento que se llevó a cabo con las probetas de una fibra porque se utilizó la misma longitud libre de 8 cm entre agarres y se elaboraron diez ensayos, el único cambio es que por probeta el número de fibras es dos.

TABLA 10 ESFUERZOS OBTENIDOS PARA LAS DIEZ PROBETAS DE DOS FIBRA

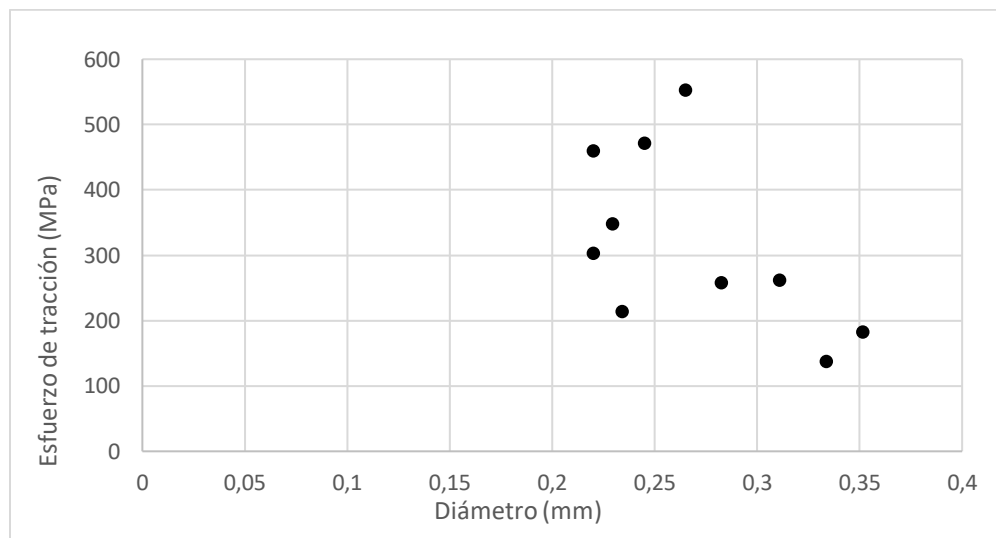
No. Probeta	Diámetro (mm)	Fuerza (N)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)
2-1	0,28	16,22	0,06	258,78
2-2	0,27	30,49	0,06	552,81
2-3	0,23	9,22	0,04	214,39
2-4	0,33	12,03	0,09	137,72
2-5	0,31	19,95	0,08	262,62
2-6	0,22	11,54	0,04	303,58
2-7	0,25	22,27	0,05	472,39
2-8	0,22	17,51	0,04	460,63
2-9	0,35	17,80	0,09	183,43
2-10	0,23	14,42	0,04	348,59

En resumen, el gráfico 6 muestra los esfuerzos obtenidos del ensayo de tracción para las diez probetas de dos fibras.



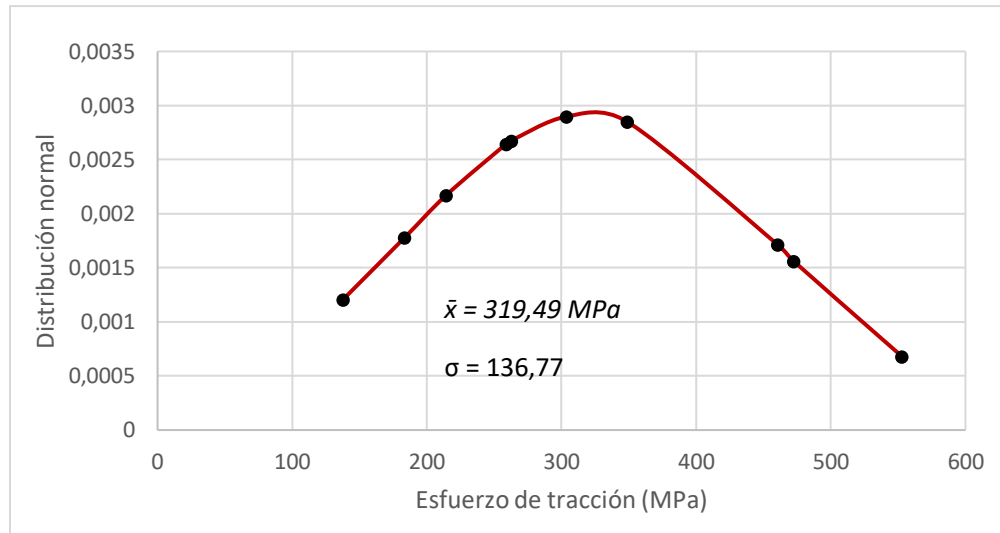
GRÁFICA 6 NÚMERO DE ENSAYO VS ESFUERZO PARA DOS FIBRAS

En el gráfico 7, se encuentra que la relación mencionada en el diámetro de las fibras de fique con los resultados de los ensayos de tracción nuevamente es inversa debido a que a mayor diámetro menor es el esfuerzo de tracción soportado por las fibras antes de la falla.



GRÁFICA 7 DIÁMETRO VS ESFUERZO PARA DOS FIBRAS

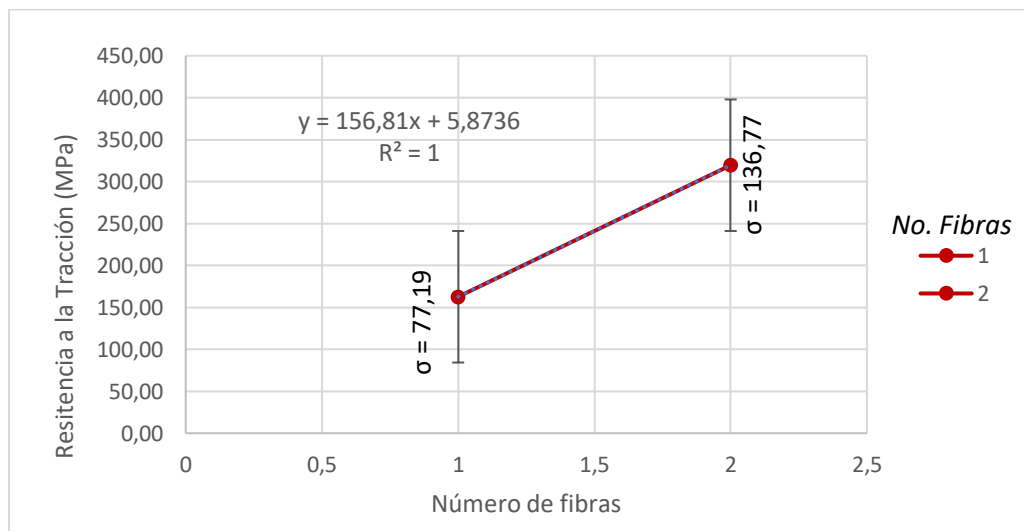
En el gráfico 8 se ve reflejado el mismo ajuste estadístico que se usó para las probetas de una fibra, pero esta vez es importante mencionar que el esfuerzo soportado aumentó debido a que para este ensayo se colocaron dos fibras de fique en una probeta; adicionalmente se muestra que la desviación estándar es muy grande, lo que indica que los datos se encuentran muy dispersos respecto a la media para este ensayo.



GRÁFICA 8 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CON DOS FIBRAS

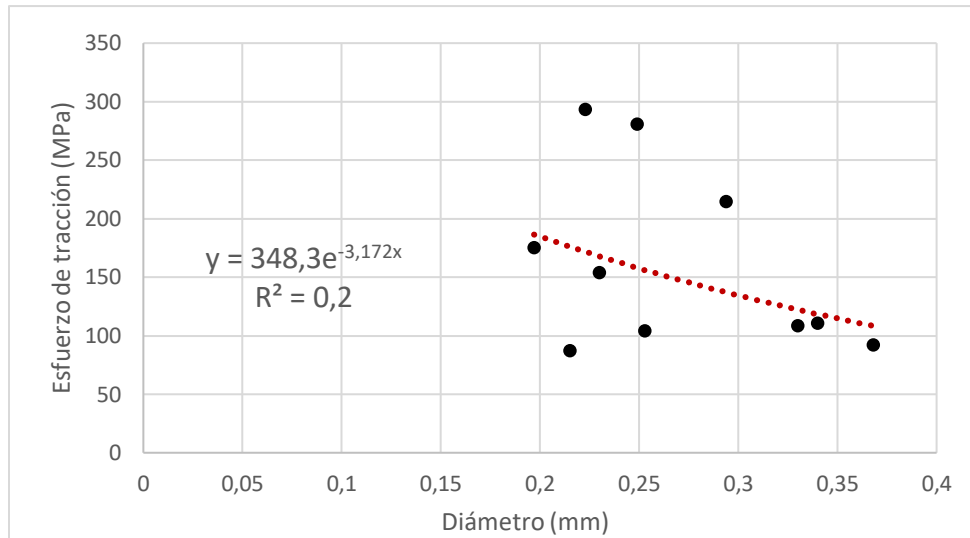
10.3. Efecto del número de fibras en la resistencia a la tracción.

El gráfico 9 muestra que a medida que se incrementa el número de fibras por probeta la resistencia a la tracción se duplica aproximadamente, cabe resaltar que dos ensayos no son suficientes para asegurar que esta hipótesis se cumpla siempre.



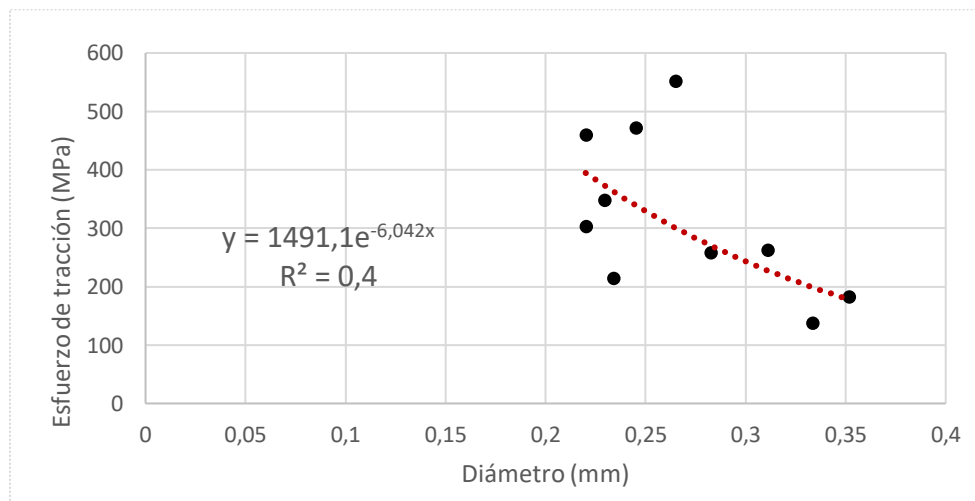
GRÁFICA 9 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y EL NÚMERO DE FIBRAS

A partir del gráfico 7 se busca encontrar el comportamiento del esfuerzo de tracción de las fibras de fique dependiendo el diámetro, algunos autores describen el ajuste de la regresión con un comportamiento exponencial decreciente para las raíces de pasto vetiver pero con el fin de encontrar mayor relación con las fibras del prototipo y el modelo, el gráfico 10 muestra el mejor ajuste obtenido para el material correspondiente a una fibra.



GRÁFICA 10 AJUSTE EXPONENCIAL DECRECIENTE PARA UNA FIBRA

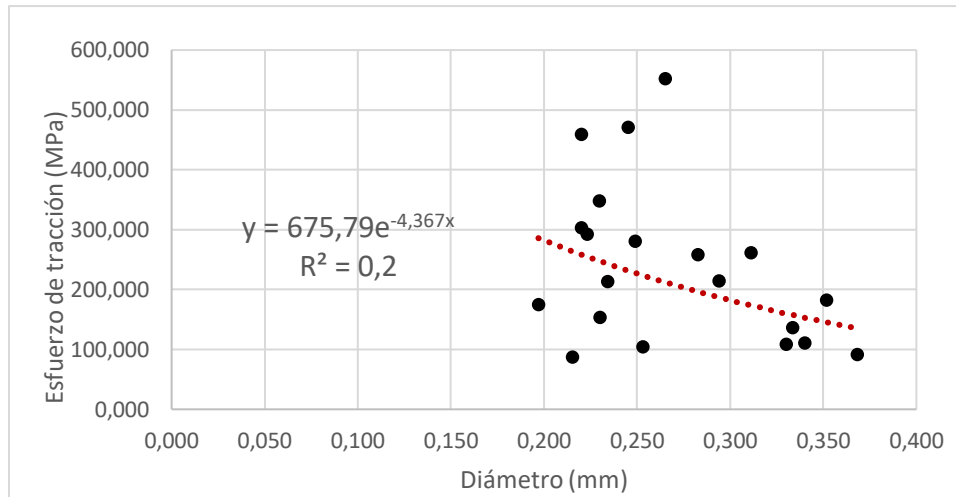
Debido a que el coeficiente R^2 es muy bajo de 0,17 siendo este el mejor ajuste encontrado se considera que faltan pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento esfuerzo de tracción respecto al diámetro para una fibra de fique.



GRÁFICA 11 AJUSTE EXPONENCIAL DECRECIENTE PARA DOS FIBRAS

Para la relación entre el esfuerzo de tracción y el diámetro para las probetas con dos fibras, gráfico 11 el ajuste es mayor debido a que el coeficiente R^2 corresponde a 0,43, el cual presenta un aumento con respecto a la regresión realizada para los ensayos con probetas de una fibra.

Con los dos gráficos presentados anteriormente, se cree que el comportamiento de las fibras de fique es similar al de las fibras de pasto vetiver debido a que a menor diámetro el esfuerzo de tracción es mayor teniendo en cuenta que así el coeficiente R^2 para cada una de las pruebas no haya sido cercado a uno, el ajuste con mayor aproximación tiende a una función exponencial decreciente gráfico 12.

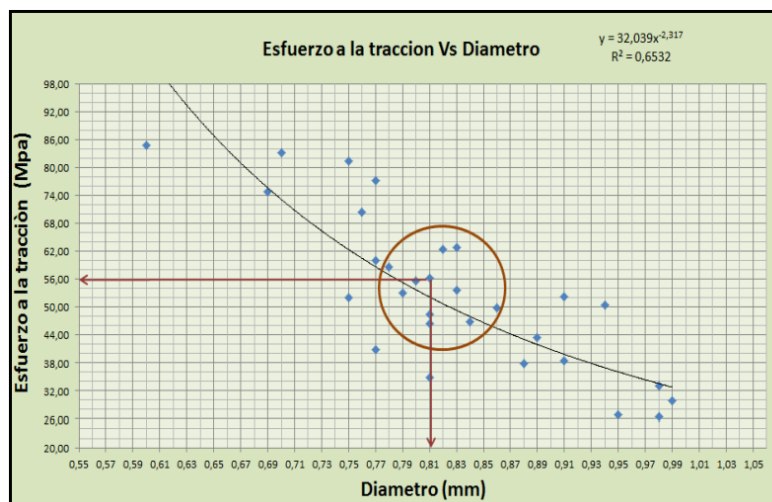


GRÁFICA 12 AJUSTE EXPONENCIAL DECRECIENTE PARA TODAS LAS PROBETAS

10.4. Modelación física de raíces utilizando fibra de fique

Teniendo en cuenta que el diámetro aproximado para las raíces del pasto vetiver es de 500mm y que según la literatura la relación área de raíces sobre el área proyectada total (RAR) típica se encuentra entre 0.5% y 8% se puede llevar a cabo la modelación física en la centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito utilizando fibras de fique debido a la siguiente justificación.

Según Herrera, J.2015 el ajuste obtenido para la relación que se encuentra entre el esfuerzo de tracción en MPa y el diámetro en mm del pasto vetiver está dado por una regresión exponencial decreciente $y = 32,039x^{-2,317}$ y descrita en la gráfica 13.

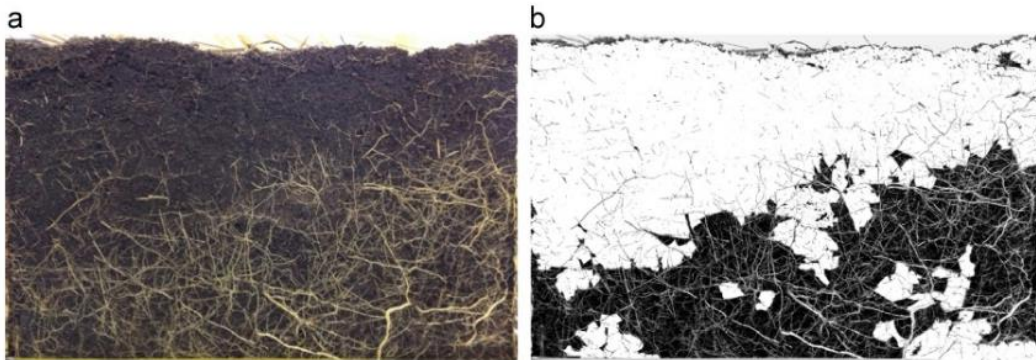


GRÁFICA 13 COMPORTAMIENTO DE ESFUERZO A LA TRACCIÓN VS DIÁMETRO DEL VETIVER. HERRERA, J. (2015). EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS DE LADERA CUBIERTOS CON VETIVER. RECUPERADO DE: REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, N° 108.

Hengchaovanich y Nilaweera (1996) mencionan que el diámetro de raíces para el pasto vetiver varía entre 0,2 a 2,2 mm aproximadamente y que la fuerza de tensión promedio de diseño es de 75 MPa para diámetros entre 0,7 a 0,8 mm.

Esta información nos permite establecer que para un diámetro promedio de este rango, el cual corresponde a 1,1 mm para una raíz de pasto vetiver en el prototipo resulta un esfuerzo de tracción de 26MPa utilizando la información de la gráfica 13.

Con base en Eab 2015 el RAR corresponde al 4% aproximadamente para un pasto vetiver de seis meses de crecimiento ilustración 9, lo cual es consecuente con el rango típico mencionado anteriormente entre 0.5% a 8 %. Por lo tanto, se opta por utilizarlo para la modelación con la regresión planteada como resultado de los ensayos de tracción de Herrera J. (2015) donde relaciona el diámetro de las raíces de 1.1 mm con un esfuerzo de 26 MPa.



Determination of root area ratio: (a) root photograph taken from 6-month group vetiver and (b) binary image with results of root area ratio of 4.56%.

ILUSTRACIÓN 9 (RAR) PARA PASTO VETIVER CON SEIS MESES DE CRECIMIENTO. (EAB, LIKITLERSUANG, TAKAHASHI, 2015). LABORATORY AND MODELLING INVESTIGATION OF ROOT-REINFORCED SYSTEM FOR SLOPE STABILISATION. RECUPERADO DE: [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0038080615001274](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080615001274)

En resumen, para la modelación en centrifuga geotécnica de pasto vetiver de aproximadamente seis meses de sembrado se tienen las siguientes especificaciones.

- RAR del 4%
- Área transversal que ocupa un esqueje 0,50 m².
- Diámetro de una raíz de pasto vetiver 1,1 mm.
- Profundidad del esqueje 300 mm.

Con la información anterior, se determina el número de raíces correspondientes a un esqueje.

- ✓ Cálculo de número de raíces de pasto vetiver por esqueje.

$$RAR = 4\% = \frac{\text{Área raíces}}{\text{Área total}}$$

$$\text{Área raíces} = 4\% * \text{Área total}$$

$$\text{Área raíces} = 0.04 * \frac{\pi}{4} * (0.5m)^2 = 7.85 * 10^{-3}m^2$$

Conociendo el diámetro promedio de una raíz tenemos que el área de una raíz corresponde a:

$$\text{Área raíz} = \frac{\pi}{4} * (1.1 \times 10^{-3}m)^2 = 9.50 * 10^{-7}m^2$$

$$\text{Número de raíces} = \frac{\text{Área raíces}}{\text{Área raíz}} = \frac{7.85 * 10^{-3}m^2}{9.50 * 10^{-7}m^2} = 8263 \text{ raíces}$$

Finalmente, el número de raíces que corresponden a un esqueje en el prototipo es de 8263.

Esfuerzo de tracción para una fibra.

Para la modelación de las raíces en centrífuga geotécnica se establecieron los parámetros necesarios a través de los ensayos de tracción con las fibras de fique y con otras investigaciones para el pasto vetiver.

Los parámetros que se muestran en la tabla 11 corresponden a los de la fibra de fique. De manera para la modelación se escogió un rango de diámetro de $0,27 \pm 0,06$ mm y de esfuerzos de tracción de $162,68 \pm 77,19$ MPa.

TABLA 11 PARÁMETROS DE LAS FIBRAS DE FIQUE

No. Fibras	Diámetro promedio (mm)	Esfuerzo de tracción (MPa)	Desv. Estándar
1	$0,27 \pm 0,06$	162,68	77,19
2	$0,27 \pm 0,06$	319,49	136,77

Como se mencionaba anteriormente para la modelación es necesario establecer los parámetros del pasto vetiver los cuales se encuentran en la tabla 12, cabe resaltar se escogió un diámetro 1.2 mm y un esfuerzo de tracción de 21 MPa.

TABLA 12 PARÁMETROS DEL PASTO VETIVER

Referencia	Diámetro promedio(mm)	Esfuerzo de tracción (MPa)
Herrera, J. 2015	0,2-2,2	40-120
Herrera, J. 2015	$0,66 \pm 0,32$	$85,1 \pm 31,2$
Hengchaovanich, 1996	1,2	54

Con los datos anteriormente establecidos, se relaciona el esfuerzo de tracción del esqueje de pasto vetiver mencionado anteriormente con una edad de seis meses y la probeta del modelo con fique que simulen el mismo esfuerzo. Adicionalmente la elección del diámetro del esqueje para llevar a cabo la simulación correcta con el mismo RAR que está relacionado con la distribución de las raíces en el suelo.

$$\sigma_{raíces} = 8263 \text{ raíces} * 26 \text{ MPa} = 214838 \text{ MPa}$$

Debido a que las leyes de escala indican que los esfuerzos deben mantenerse entre prototipo y modelo para la simulación en centrífuga geotécnica se tiene que el número de fibras de fique corresponde a:

$$\text{Número de fibras} = \frac{214838 \text{ MPa}}{162 \text{ MPa}} = 1326 \text{ fibras de fique}$$

Adicionalmente como la centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito tiene un rango de gravedades de 10 a 200, para la modelación se establecen 10 g como gravedad de vuelo debido a que la literatura indica que para este tipo de simulaciones esté entre 8g y 15g. Este parámetro estaría entre el rango que establece la máquina y el recomendado en otras investigaciones.

Por lo anterior se tiene que el diámetro del modelo corresponde a:

$$10g = n = \frac{Dp}{Dm} = \frac{500 \text{ mm}}{Dm}$$
$$Dm = \frac{500 \text{ mm}}{10} = 50 \text{ mm}$$

Para comprobar que el RAR para el modelo de y del prototipo se está manteniendo se tiene que:

$$RAR \text{ modelo} = \frac{0.27 \text{ mm}^2 * 1326}{50 \text{ mm}^2} = 0.039$$

$$RAR \text{ modelo} = 0.039 * 100 = 3.9\% \approx 4\%$$

En razón a lo anterior, para la modelación en centrífuga geotécnica de un talud con suelo arcilloso y de pasto vetiver como vegetación para generar refuerzo de anclaje se determinó que la simulación se puede realizar con fibras de fique ubicadas de forma radial debido a que es la mejor estructuración según la morfología estudiada del pasto vetiver.

Adicional a esto para la modelación de las condiciones del prototipo se aconseja utilizar caolín para la simulación del suelo y como una gravedad de vuelo de 10g.

11. DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Con el fin de llevar a cabo la simulación en la centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito se debe tener en cuenta las dimensiones útiles de la misma para así adecuar las condiciones calculadas anteriormente.

11.1. Modelación para 10g en centrifuga geotécnica

Dimensiones para el Prototipo

Inicialmente se busca analizar el comportamiento de un suelo arcilloso con raíces de pasto vetiver, es decir sin considerar una ladera. De acuerdo con las dimensiones de la caja para la construcción de los modelos físicos y con una gravedad de 10g, el suelo del prototipo tiene las siguientes dimensiones.

- Altura: 1 metro
- Largo: 2,3 metros
- Ancho: 1,5 metros

Adicionalmente se debe tener en cuenta las dimensiones que ocupa un esqueje en el prototipo.

- Profundidad de las raíces desde la superficie: 0,3 metros
- Diámetro: 0,5 metros

Dimensiones para el Modelo

Con las leyes de escala, la gravedad de vuelo y las dimensiones tanto de la centrifuga geotécnica como del prototipo se calculan las dimensiones del modelo.

$$Lm = \frac{Lp}{n}$$

- ✓ Altura del suelo en la modelación que en este caso será caolín.

$$Lm = \frac{1 \text{ m}}{10 \text{ g}}$$

$$Lm = 0,1 \text{ m} = 100\text{mm}$$

Para el ancho y largo del modelo se mantienen las dimensiones útiles de la centrifuga geotécnica como se observa en la ilustración 10.

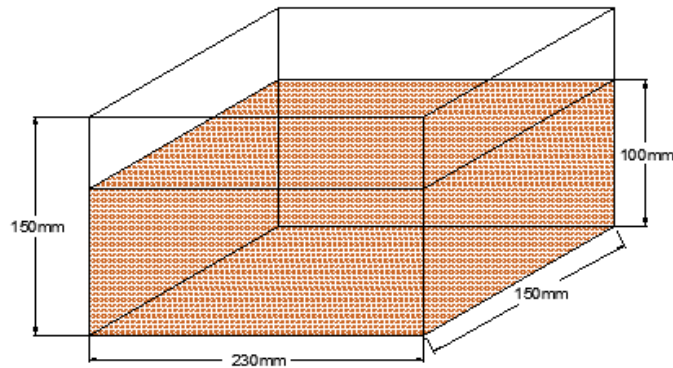


ILUSTRACIÓN 10 DIMENSIONES QUE OCUPARÁ EL CAOLÍN EN LA CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA CON 10g. DIMENSIONES PARA EL MODELO

Como se mencionaba anteriormente para la simulación en la centrífuga geotécnica se considera pertinente que la distribución de las fibras de fique sea radial debido a la morfología de las raíces del pasto vetiver.

Con base en Machado Et al 2015, que indica que la relación área de raíces sobre el área proyectada total y el aporte mecánico tanto en resistencia y cohesión se da para RAR máximos de un 8% y en una profundidad de 100 a 300 milímetros, se determinó anteriormente que la profundidad para el prototipo será de 300 milímetros.

Aplicando las leyes de escala se tiene que para el modelo las fibras de fique se encontrarán a la siguiente profundidad desde la superficie

$$hm = \frac{hp}{n}$$

$$hm = \frac{300 \text{ mm}}{10 \text{ g}}$$

$$Lm = 30 \text{ mm}$$

En resumen, la ilustración 11 muestra la distribución de las fibras de fique que representan un esqueje de pasto vetiver y las dimensiones que ocupará la composición caolín - fibras en la centrífuga geotécnica para la modelación.

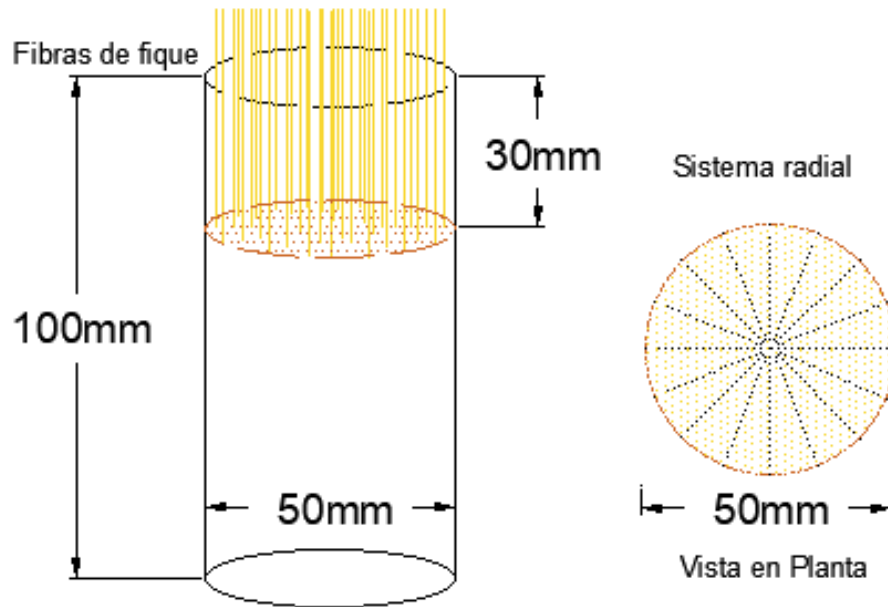


ILUSTRACIÓN 11 MODELO PARA UN ESQUEJE PARA 10G

Por último, para la distribución de los esquejes de fibra de fique se tuvo en cuenta las dimensiones mostradas en la ilustración 10, de tal forma que el espaciamento entre esquejes para el pasto vetiver según la literatura corresponde a un rango entre 10 a 15 cm también se cumpliera en el modelo.

Por conveniencia en la distribución se escogió un espaciamento en el prototipo (E_p) de (15 cm = 150 mm) por tal razón el espaciamento en el modelo (E_m) siguiendo las leyes de escala corresponde a:

$$E_m = \frac{E_p}{n}$$

$$E_m = \frac{150 \text{ mm}}{10g}$$

$$E_m = 15 \text{ mm}$$

Adicionalmente como el rango de separación mínimo entre esquejes corresponde a 10 cm, este valor se escogió como distancia entre borde a primer esqueje. En la ilustración 12 se puede observar finalmente la distribución de cada esqueje representado por las fibras de fique teniendo en cuenta todos los parámetros mencionados.

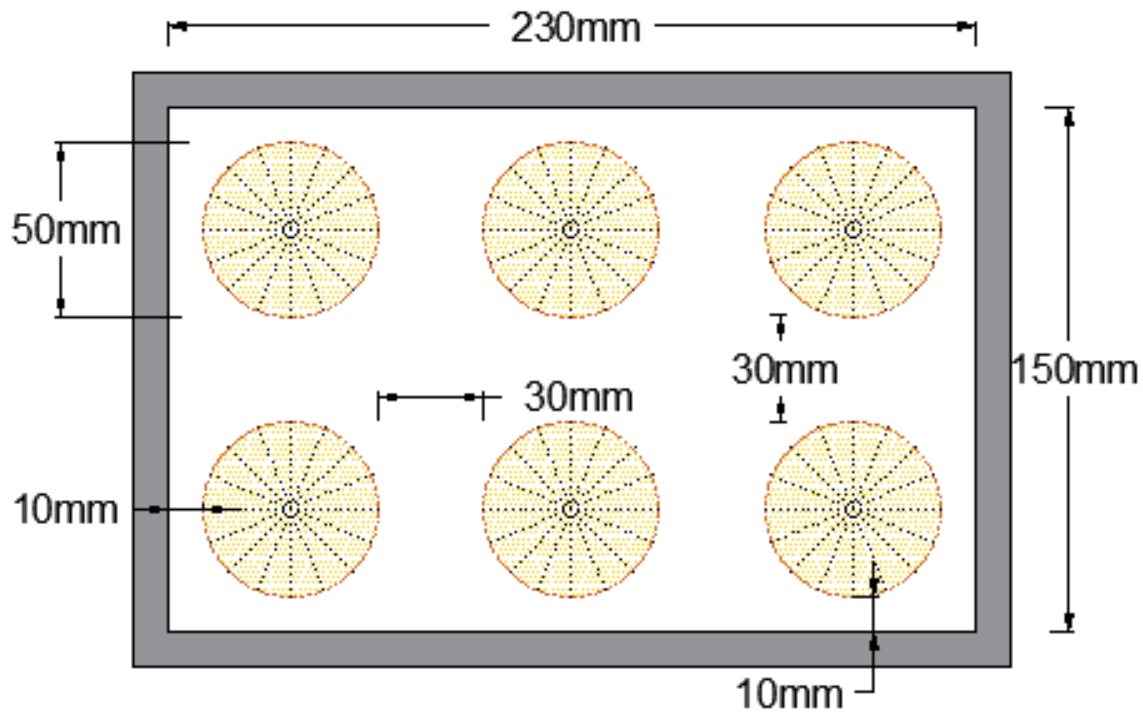


ILUSTRACIÓN 12 VISTA EN PLANTA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS DE FIQUE PARA 10G

11.2. Simulación en SLIDE del modelo

Si se utilizara el análisis anterior en el que se concluyó que para la investigación es necesario hacer los ensayos de laboratorio en la centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito con 10g de vuelo y las respectivas dimensiones, el factor de seguridad sería muy alto para el talud debido a que utilizando el programa Slide (se presenta análisis de estabilidad en el software) para dicha altura este no fallaría. Por lo tanto, se propone llevar a cabo los ensayos con una mayor gravedad en la centrifuga geotécnica, para este caso 50g. Contemplando que no afecta la distribución de las fibras de fique como representación de las raíces del pasto vetiver en el modelo, debido a que los esfuerzos que son lo principal en este análisis se mantienen, es decir solo el aporte mecánico de las fibras es el que importa por lo anterior se utiliza la misma cantidad de fibras pero en una diferente distribución.

Como se mencionó anteriormente para el análisis se plantearon los siguientes modelos en slide, los modelos se realizaron con el modelo Mohr – Coulomb para condiciones de falla no drenadas:

Para el primer modelo se consideraron los siguientes parámetros.

- ✓ Resistencia al corte no drenado de 20 KPa
- ✓ Pendiente 2:1

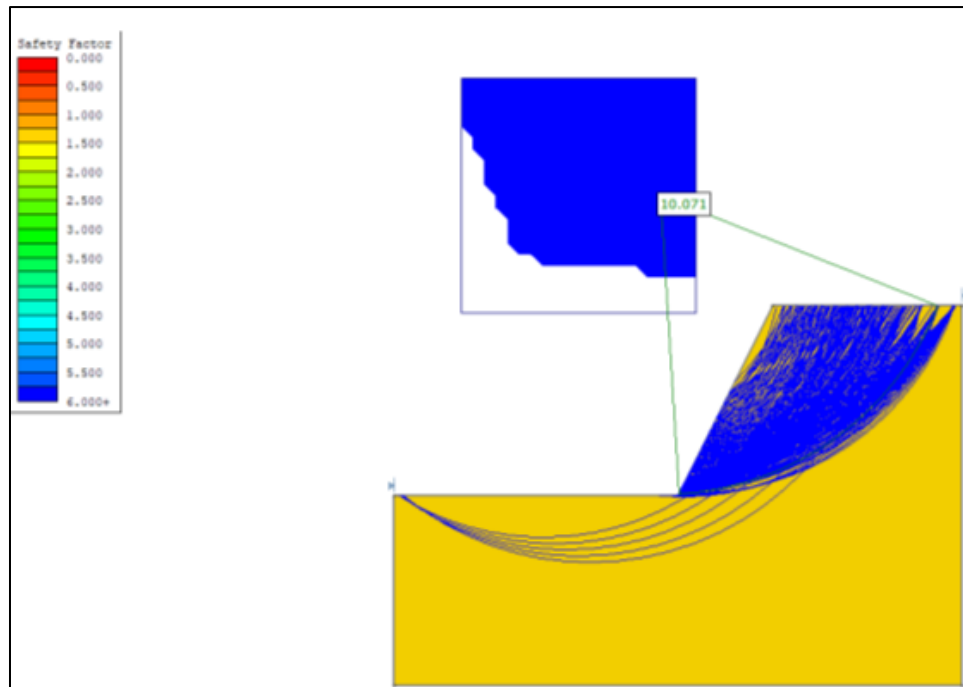


ILUSTRACIÓN 13 ANÁLISIS DEL TALUD EN SLIDE, MODELO 1. DIMENSIONES PARA EL PROTOTIPO A 10G.

Con estos dos parámetros y con los resultados mostrados en la ilustración 13, se determina que el factor de seguridad es de 10.07 lo que nos indica que el talud es muy estable y que para las gravedades a las cuales se pretende volar no habría necesidad de estabilizar el talud, entonces con estas dimensiones no sería posible analizar el refuerzo con pasto vetiver.

Adicional a este análisis, se realizó una segunda modelación con los siguientes parámetros

- ✓ Resistencia al corte no drenado de 10 KPa
- ✓ Pendiente 2:1

Del modelo mostrado en la ilustración 14 se tiene que el factor de seguridad es de 5.04, el cual de igual manera que en el caso anterior, es un factor de seguridad alto, por lo tanto, para estas dimensiones tampoco es posible analizar el refuerzo con pasto vetiver para las gravedades de vuelo propuestas.

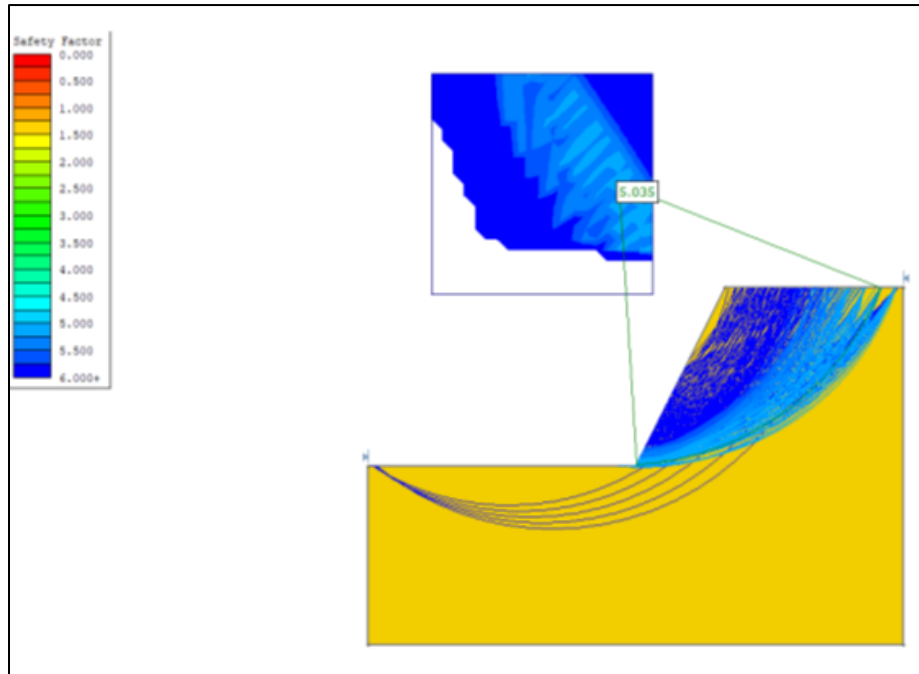


ILUSTRACIÓN 14 ANÁLISIS DEL TALUD EN SLIDE, MODELO 2. DIMENSIONES PARA EL PROTOTIPO A 10G.

Y por último se realizó un modelo en el que se consideraron los siguientes parámetros

- ✓ Resistencia al corte no drenado 20 KPa
- ✓ Talud completamente vertical

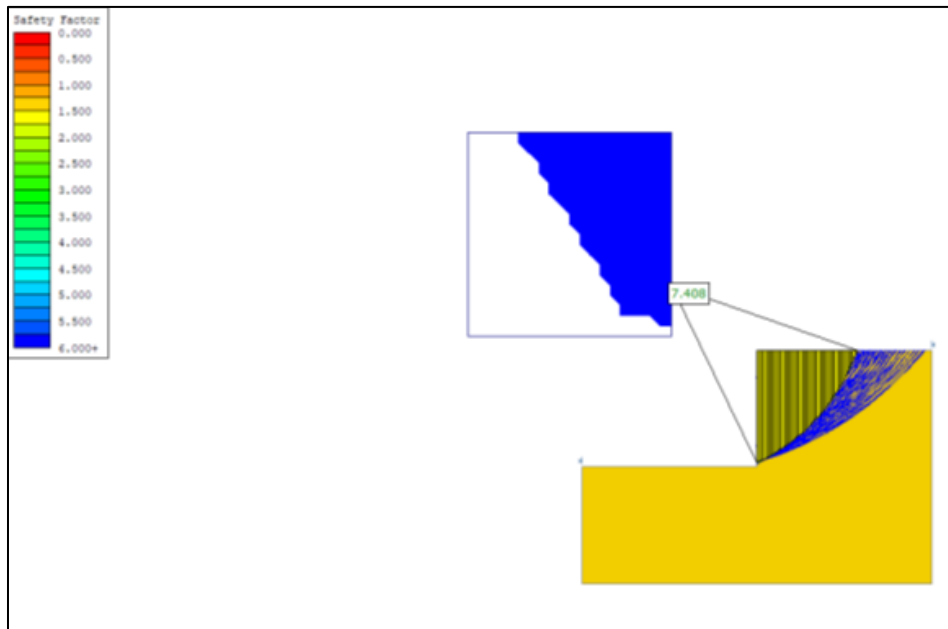


ILUSTRACIÓN 15 ANÁLISIS DEL TALUD EN SLIDE, MODELO 3. DIMENSIONES PARA EL PROTOTIPO A 10G.

Del cual el resultado para el factor de seguridad es 7.4, el cual es alto considerando que se dejó completamente vertical el talud, se concluye que se requiere llevar a cabo la modelación en centrifuga geotécnica con una gravedad superior a 10g por lo tanto como se propuso anteriormente se hará a 50g, lo cual se especifica a continuación.

11.1. Modelación para 50g en centrifuga geotécnica

Con el fin de poder llevar a cabo la simulación en la centrifuga geotécnica y que el talud falle, se lleva a cabo nuevamente el análisis dimensional con las leyes de escala para la modelación física para una gravedad de 50g.

Manteniendo el esfuerzo entre el prototipo y el modelo según las leyes de escala se tiene lo siguiente

$$\sigma_{raíces} = 8263 \text{ raíces} * 26 \text{ MPa} = 214838 \text{ MPa}$$

$$\text{Número de fibras} = \frac{214838 \text{ MPa}}{162 \text{ MPa}} = 1326 \text{ fibras de fique}$$

Nuevamente el número de fibras de fique corresponde a 1326.

A partir de las 50g se tiene que el diámetro de la sección transversal del esqueje de raíces del modelo corresponde a:

$$50g = n = \frac{Dp}{Dm} = \frac{500 \text{ mm}}{Dm}$$

$$Dm = \frac{500 \text{ mm}}{50} = 10 \text{ mm}$$

Para el cual se tiene que el RAR corresponde a:

$$RAR \text{ modelo} = \frac{0.27 \text{ mm}^2 * 1326}{10 \text{ mm}^2} = 0.97$$

$$RAR \text{ modelo} = 0.97 * 100 = 97\%$$

El RAR calculado difiere al RAR encontrado en la literatura. Debido a que los esfuerzos se mantienen en el modelo y en el prototipo, se espera que este parámetro no afecte el comportamiento mecánico del talud. Para comprobar esta hipótesis, deberán realizarse modelos físicos con diferentes RAR.

Dimensiones en el Prototipo

De acuerdo con las dimensiones de la caja para la construcción de los modelos físicos y con una gravedad de 50g, para el suelo del prototipo se tienen las siguientes dimensiones.

- Altura: 5 metros
- Largo: 11,5 metros
- Ancho: 7,5 metros

Adicionalmente se debe tener en cuenta las dimensiones que ocupa un esqueje en el prototipo.

- Profundidad de las raíces desde la superficie: 0,3 metros
- Diámetro: 0,5 metros

Dimensiones en el Modelo

Con las leyes de escala, la nueva gravedad de vuelo y las dimensiones registradas anteriormente tanto de la centrifuga geotécnica como del prototipo se calculan las dimensiones del modelo.

$$Lm = \frac{Lp}{n}$$

- ✓ Altura del suelo en la modelación que en este caso será caolín.

$$Lm = \frac{5 \text{ m}}{50 \text{ g}}$$

$$Lm = 0,1 \text{ m} = 100\text{mm}$$

Con el fin de mantener las dimensiones útiles de la centrifuga geotécnica se conservan las que se muestran en la ilustración 10.

En resumen, para el modelo final las siguientes son las dimensiones que tendrá

- Altura: 100 mm
- Largo: 150 mm
- Ancho: 230 mm

Para este caso no se mantiene el RAR inicial, sin embargo, para la modelación se evaluará el aporte mecánico total de las fibras de fique, es decir se mantienen los esfuerzos, esto debido a que es muy complejo simular un RAR correcto, teniendo en cuenta que las separaciones se encuentran en milímetros.

Aplicando las leyes de escala, se tiene que para el modelo las fibras de fique se encuentran a la siguiente profundidad desde la superficie:

$$hm = \frac{hp}{n}$$

$$hm = \frac{300 \text{ mm}}{50 \text{ g}}$$

$$L_m = 6 \text{ mm}$$

En resumen, la ilustración 16 muestra las dimensiones que ocupará la composición caolín - fibras en la centrífuga geotécnica para la modelación teniendo en cuenta el cambio en las gravedades de vuelo.

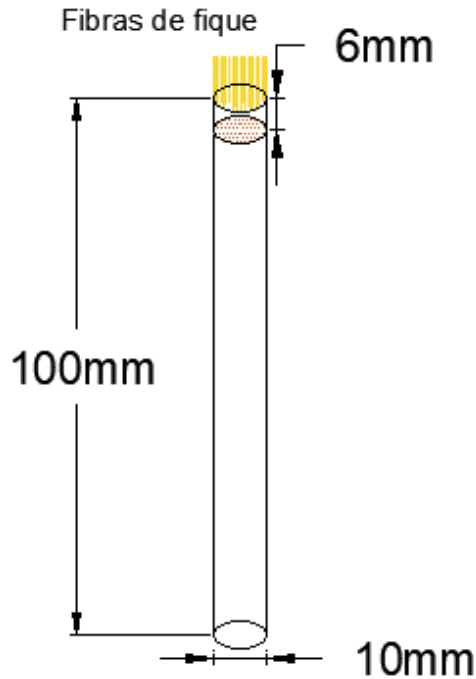


ILUSTRACIÓN 16 MODELO PARA UN ESQUEJE PARA 50G

Por último, para la distribución de los esquejes de fibra de fique en las dimensiones útiles de la centrífuga geotécnica se organizó como se observa en la ilustración 16, Conservando el espaciado entre esquejes para el pasto vetiver mencionado anteriormente entre un rango entre 10 a 15 cm.

El espaciado en el prototipo (E_p) corresponde a (15 cm = 150 mm) por tal razón el espaciado en el modelo (E_m) siguiendo las leyes de escala corresponde a

$$E_m = \frac{E_p}{n}$$

$$E_m = \frac{150 \text{ mm}}{50g}$$

$$E_m = 3 \text{ mm}$$

En la ilustración 19 se puede observar finalmente la distribución de cada esqueje de pasto vetiver representado por las fibras de fique en el modelo teniendo en cuenta todos los parámetros mencionados.

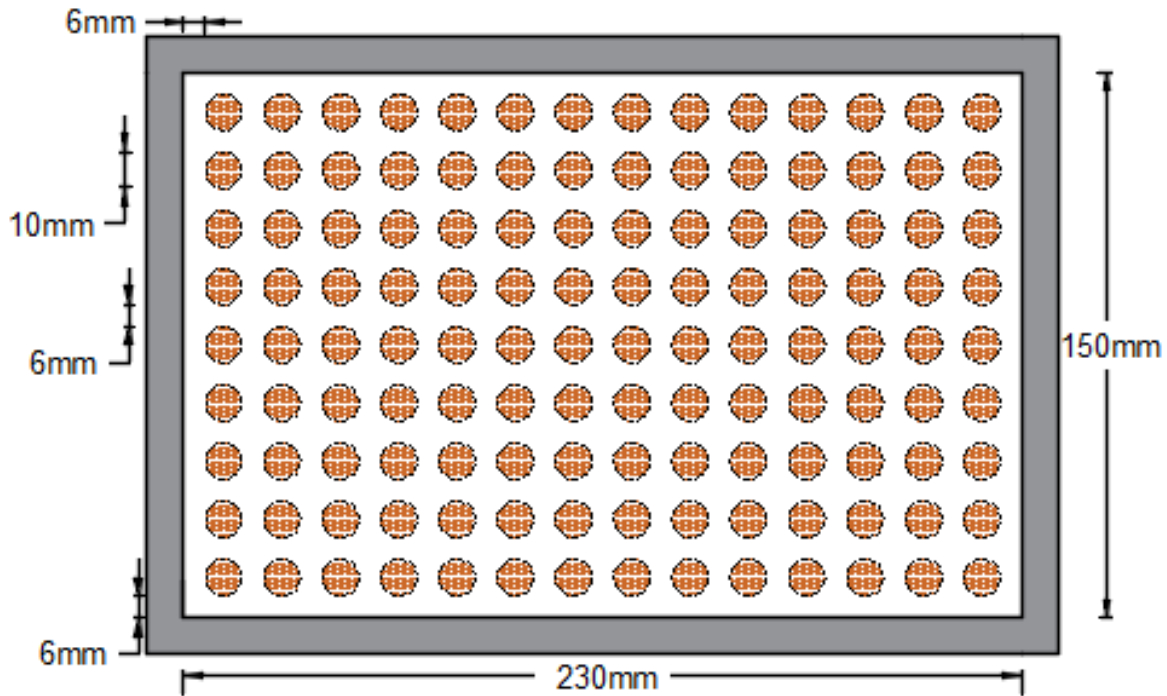


ILUSTRACIÓN 17 VISTA EN PLANTA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS DE FIQUE PARA 50G

11.2. Propuesta de ensayos para el estudio de la influencia de las raíces en la estabilidad de taludes

Para la modelación física del efecto de las raíces en la estabilidad de un talud se propone realizar vuelos en máquina centrífuga con una gravedad igual a 50 G. Esto con el fin de lograr un talud inestable sin raíces y posteriormente lograr la estabilización con raíces simuladas. Los modelos propuestos cumplen con esfuerzo total a tensión del conjunto de raíces tratando de simular el mismo esfuerzo en el modelo y en el prototipo. Sin embargo, al realizar los ensayos con esta gravedad hay dos parámetros que no cumplen con las dimensiones del prototipo: diámetro de las raíces y RAR (Relación de área de Raíces). Sin embargo, la hipótesis que se plantea es que estos parámetros no afectan el comportamiento global del talud. Para validar esta hipótesis se proponen los siguientes ensayos:

11.3. Ensayos para estudiar el efecto del diámetro de raíces:

- Cantidad de raíces constante: 8263
- Pendiente constante $M1=45^\circ$
- Distribución de raíces constante igual que ilustración 19.
- RAR= Constante para cada valor de la gravedad.

En este ensayo se varía la gravedad para poder aumentar el diámetro de la raíz

TABLA 13 PROPUESTA DE ENSAYOS EFECTO DEL DIÁMETRO DE LA RAÍZ.

MODELO	G	PROFUNDIDAD DE RAÍCES (mm)	ALTURA TALUD (m)
M-1	10	30	1
M-2	30	10	3
M-3	50	6	5
M-4	60	5	6

11.4. Ensayos para estudiar el efecto del RAR:

Para estudiar el efecto del RAR se realizarán ensayos con la misma gravedad y con diferentes densidades de raíces RAR con el fin de estudiar el efecto en la estabilidad.

- Gravedad: 50 G
- Profundidad raíces: 6mm
- Pendiente: M1=45°

TABLA 14 PROPUESTA DE ENSAYOS EFECTO DEL RAR.

Modelo	RAR
M-1	10%
M-2	30%
M-3	50%
M-4	100%

12. CONCLUSIONES

- ✓ Se pueden simular las raíces del pasto vetiver utilizando fibras de fique, dado que no se simula el aporte de una sola raíz sino el aporte del esqueje completo, si bien el número de fibras no es el mismo de raíces por esqueje, se logra que el esfuerzo del modelo y del prototipo sea el mismo.
- ✓ La resistencia promedio de una fibra de fique es 162 MPa, lo cual concuerda con otros resultados obtenidos en la bibliografía y el aporte total será el número de fibras por la resistencia promedio de una de ellas.
- ✓ Debido a las dimensiones útiles de la centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito se encuentra que inicialmente a 10g el modelo del talud que se quiere realizar no fallará debido a los análisis realizados en el software Slide por lo tanto se cree pertinente aumentar las gravedades de vuelo para que las condiciones en el modelo sean favorables y adicionalmente las dimensiones del talud del prototipo sean lo más cerca posible a la realidad.

- ✓ Se determina que la distribución de las raíces tanto en el modelo como en el prototipo no tienen relevancia debido a que lo importante para el análisis es el esfuerzo de tracción que posee el esqueje como un todo por lo tanto esto disminuye los inconvenientes a la hora de la simulación debido a que las distancias entre fibras de fique son en milímetros y controlarlas es muy difícil.

13. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

- ✓ Para la caracterización del material que simula las raíces se recomienda hacer ensayos de resistencia a la tracción de diferentes materiales con el fin de tener mayor similitud entre prototipo y modelo.
- ✓ Encontrar la máquina especializada en realizar ensayos de resistencia a la tracción para el material del modelo con el fin de no tener inconveniente en el agarre de las fibras de fique a la hora de llevar a cabo el ensayo debido a que en este proyecto se presentaron varios inconvenientes.
- ✓ Para futuros trabajos se recomienda llevar a cabo ensayos como resistencia al corte en condición no drenada
- ✓ Se recomienda realizar más ensayos variando únicamente la distribución RAR para determinar si hay alguna influencia en la resistencia al corte.
- ✓ Se recomienda realizar más ensayos de resistencia para mayores números de fibras para ajustar mejor la regresión.

14. BIBLIOGRAFIA

Herrera, J. (2015). Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver en la vía Neiva-Vegalarga departamento del huila (Maestría en Ingeniería Civil). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá D.C., Colombia

Huamani, A. (2014). Propuesta de estabilización de taludes con pasto vetiver en el canal de irrigación- Tingo de Ponaza (Practica Pre-Profesional). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú.

Escobar, D. Orduña, L. (2014). Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia periodo I, año 2014 (Pregrado en Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C., Colombia

Contreras, M. Hormaza, W. Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. S1. (57-67).

Andrade, M. Rodríguez, G. Amoy, P. Colorado, H. Muylaert, F. Neves, S. (2015). Fique Fiber Tensile Elastic Modulus Dependence with Diameter Using the Weibull Statistical Analysis. Rio de Janeiro, Brazil.

Delvasto, S. Toro, E.F. Perdomo, F. Mejía de Gutiérrez, R. (2009). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. Universidad del valle. Cali, Colombia.

Muñoz, M. Hidalgo, M. Mina, J. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. Biotecnología en el sector agropecuario y Agroindustrial. Vol. 12, No. 2, (60-70).

Ni, J.J. Leung, A.K. Ng, C.W.W. Shao, W. (2017). Modelling Hydro-Mechanical reinforcements of plants to slope stability. elsevier.95.99-109.enero 2020. De Science Direct Base de Datos.

Noorasyikin, M.N. Zainab, M. (2016). A Tensile Strength of Bermuda Grass and Vetiver Grass in Terms of Root Reinforcement Ability Toward Soil Slope Stabilization. Soft Soil Engineering International Conference. 2016.

Lin, D. Huang, B. Lin, S. (2009). 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. elsevier.36.992-1006.enero 2020. De Science Direct Base de Datos.

The Vetiver System for Infrastructure protection and disaster mitigation. Vetiver. Recuperado de <http://www.vetiver.org/TVN-Handbook%20series/TVN-series2-1-infrastructure.htm#stab2>

Soluciones ambientales en Biotecnología. Vetiver. Recuperado de https://www.vetiver.org/PAN_APC_overviewo1.pdf

Aplicaciones del sistema vetiver, Manual técnico de referencia. Vetiver. Recuperado de http://www.vetiver.org/TVN_manual_spanish%20o.pdf