

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Estabilización de taludes mediante la técnica de
bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en
zonas tropicales, año 2019**

Jesús Nelson Sánchez Pillpa

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Huancayo, 2019

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Msc. Ing. Castillo Velarde Roberto Carlos

AGRADECIMIENTO

Al Msc. Ing. Roberto Carlos Castillo Velarde, docente de la Universidad Continental y asesor de mi tesis; por la paciencia, inspiración y el aporte de su experiencia profesional al desarrollo de mi trabajo de investigación.

A mis padres y familiares por el apoyo, confianza y por la colaboración en la elaboración de la tesis.

DEDICATORIA

A mis padres por haberme dado la vida, por ser fuente de inspiración de lucha, de perseverancia y por la confianza en el logro de mis objetivos.

A mis familiares por el apoyo incondicional, sus consejos y el ejemplo a seguir para culminar exitosamente mi carrera profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XVI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1.1. <i>Planteamiento del problema</i>	1
1.1.2. <i>Formulación del problema</i>	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1. <i>Justificación práctica</i>	3
1.3.2. <i>Justificación metodológica</i>	4
1.3.3. <i>Justificación económica</i>	4
1.4. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4.1. <i>Conceptual</i>	4
1.4.2. <i>Espacial</i>	5
1.4.3. <i>Temporal</i>	5
1.5. HIPÓTESIS	5
1.5.1. <i>Hipótesis general</i>	5
1.5.2. <i>Hipótesis específicas</i>	5
1.6. VARIABLES	6
1.6.1. <i>Variable independiente</i>	6
1.6.2. <i>Variable dependiente</i>	6
1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	6
1.8. MODELO DE PRUEBA DE HIPÓTESIS	7
1.8.1. <i>Prueba de hipótesis 1</i>	7
1.8.2. <i>Prueba de hipótesis 2</i>	7

1.8.3. Prueba de hipótesis 3	7
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	9
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	9
2.1.1. Antecedentes nacionales	9
2.1.2. Antecedentes internacionales	13
2.2. BASES TEÓRICAS	16
2.2.1. Estabilidad de taludes	16
2.2.1.1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes.....	17
2.2.1.2. Análisis de estabilidad de taludes	19
2.2.1.3. Método de análisis de equilibrio límite.....	21
2.2.1.4. Parámetros utilizados en los análisis de límite de equilibrio.....	25
2.2.1.5. Limitaciones de los métodos de límite de equilibrio	27
2.2.1.6. Métodos de análisis de límite de equilibrio	29
a. Tablas para análisis rápidos.....	30
b. Análisis de bloques o cuñas.....	31
c. Método de la espiral logarítmica.....	33
d. Métodos de círculos de falla.....	34
2.2.1.7. Comparación de los diversos métodos	42
2.2.2. Técnicas de bioingeniería para estabilización de taludes	45
2.2.2.1. Efectos de la vegetación sobre el talud	46
2.2.2.2. Efectos hidrológicos de la vegetación	47
2.2.2.3. Efectos hidráulicos	51
2.2.2.4. Efectos de refuerzo de las raíces	52
2.2.2.5. Efectos de la deforestación	57
2.2.2.6. Efectos negativos de la vegetación	57
2.2.2.7. La vegetación y la erosión.....	58
2.2.2.8. Sobrecarga y fuerzas del viento	61
2.2.3. Propiedades de las plantas y características de las raíces	61
2.2.3.1. Características de las raíces	61
2.2.3.2. Caracterización para control de la erosión	68
2.2.3.3. Estabilidad de taludes con vegetación	70
2.2.3.4. Diseño de revegetalización	73
2.2.4. Vetiveria Zizanioides	75
2.2.4.1. Ventajas y desventajas del sistema vetiver.....	81
2.2.4.2. Consideraciones para el plantado y mantenimiento de pastos vetiver.....	82
2.2.4.3. Descripción de actividades para el cultivo de pastos Vetiver	91
2.2.4.4. Realización de un presupuesto para la estabilización de taludes con pasto vetiver	95

2.2.5. Consideraciones de aporte al esfuerzo de corte mediante la resistencia a tensión del cultivo	
Vetiver	95
2.2.6. Propiedades del suelo	97
2.2.6.1. Propiedades físicas del suelo.....	97
a. Humedad natural del suelo	97
b. Análisis granulométrico del suelo	97
c. Consistencia del suelo	99
• Límite líquido	99
• Límite plástico	100
• Índice de plasticidad	100
• Límite de contracción	100
d. Clasificación de los suelos mediante el sistema SUCS.....	100
• Suelos gruesos.....	101
• Suelos finos.....	101
e. Clasificación de los suelos mediante el sistema AASHTO.....	103
2.2.6.2. Propiedades mecánicas del suelo.....	104
2.2.6.2.1. Resistencia al corte del suelo.....	104
2.2.7. Ensayos de suelos	105
a. Ensayo para determinar el contenido de humedad	105
b. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.....	106
c. Ensayo para determinar el límite líquido de suelos.....	107
d. Ensayo para determinar el límite plástico e índice de plasticidad de suelos.....	109
e. Ensayo para determinar el Peso volumétrico de suelo cohesivo	110
f. Ensayo de Corte Directo	111
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	113
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	115
3.1. METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS	115
3.1.1. Tipo de investigación.....	115
3.1.2. Nivel de investigación.....	115
3.1.3. Diseño de investigación.....	116
3.1.4. Método de investigación.....	116
3.1.5. Población y muestra	116
3.1.5.1. Población.....	116
3.1.5.2. Muestra	117
3.1.6. Técnicas de recolección de datos	117
3.1.7. Instrumentos de recolección de datos.....	117

3.1.8. Técnicas de análisis de datos	118
3.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	118
3.2.1. Localización de la zona de estudio y búsqueda de información.....	119
3.2.1.1. Ubicación de la zona de estudio.....	119
3.2.1.2. Condición actual del talud en estudio.....	120
3.2.2. Trabajos de campo.....	121
3.2.2.1. Estudio topográfico.....	121
3.2.2.2. Estudio geotécnico	122
3.2.3. Trabajos de laboratorio.....	123
3.2.4. Procesamiento y análisis de datos obtenidos.....	124
3.2.5. Casos de aplicación	124
3.2.5.1. Análisis estático y pseudoestático de estabilidad de talud sin presencia de pastos vetiver	125
3.2.5.2. Análisis estático y pseudoestático de estabilidad de talud con presencia de pastos vetiver	125
.....	125
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	126
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	126
4.1.1. Caracterización de la zona de estudio	126
4.1.1.1. Ubicación de la zona de estudio.....	126
4.1.1.2. Topografía de la zona de estudio	127
4.1.1.3. Condición actual del talud en estudio.....	128
4.1.2. Estudio Hidrológico de la zona de estudio	131
4.1.3. Propiedades físicas del suelo del talud	137
4.1.3.1. Contenido de humedad	137
4.1.3.2. Análisis granulométrico por tamizado.....	138
4.1.3.3. Límites de Atterberg	139
4.1.3.4. Peso volumétrico del suelo.....	139
4.1.3.5. Clasificación del suelo según el método SUCS y AASHTO	140
4.1.4. Propiedades mecánicas del suelo del talud	140
4.1.4.1. Ensayo de corte directo.....	141
4.1.5. Evaluación y comparación de los parámetros de resistencia sin y con presencia de raíces de pastos Vetiver.....	144
4.1.6. Aporte al esfuerzo de corte mediante la resistencia a tensión del cultivo vetiver.....	147
4.1.7. Análisis de estabilidad del talud global.....	148
4.1.7.1. Análisis de estabilidad sin presencia de cultivo de vetiver	151
4.1.7.2. Análisis de estabilidad con presencia de cultivo de vetiver.....	153
4.1.8. Evaluación y comparación de los factores de seguridad en condiciones actuales y aplicando la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver.....	156

4.1.9. Evaluación y comparación de presupuestos de estabilización de talud según la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver versus el método de corte de taludes “Banquetas”	157
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	162
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
5.1. CONCLUSIONES.....	165
5.2. RECOMENDACIONES	167
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
ANEXOS.....	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de Operacionalización de variables.	6
Tabla 2: Factores que influyen en la estabilidad de taludes.	18
Tabla 3: Factores de zona "Z"	20
Tabla 4: Zonificación sísmica.....	20
Tabla 5: Resumen de metodologías utilizadas en análisis de estabilidad de taludes.....	22
Tabla 6: Resumen de Métodos de análisis de estabilidad de taludes.	30
Tabla 7: Lista de tablas para el cálculo de la estabilidad de taludes.	31
Tabla 8: Comparación de los resultados del cálculo de factor de seguridad para varios métodos.....	43
Tabla 9: Diferencias básicas entre diversos métodos de análisis de estabilidad de taludes.	44
Tabla 10: Valores de Et/Eo para diversas coberturas vegetales.	49
Tabla 11: Componentes de la planta y sus funciones.	50
Tabla 12: Valores del coeficiente de Manning n para diferentes tipos de vegetación (Temple, 1982).	51
Tabla 13: Tipos de anclaje de las raíces (adaptado de Tsukamoto y Kusakabe, 1984).....	55
Tabla 14: Erosión relativa de acuerdo a la vegetación.	59
Tabla 15: Variación de la velocidad de erosión con la altura de la vegetación (pastos) (según Department of the Navy).....	60
Tabla 16: Fuerza tractiva máxima permisible de un revestimiento de vegetación según HEC 15 (Federal Highway Administration) (Lancaster y otros 1999).....	60
Tabla 17: Ensayos de resistencia a la tensión de algunas raíces de plantas tropicales.....	65
Tabla 18: Características de los árboles utilizados en Hong-Kong (Greenway, 1998).....	69
Tabla 19: Sistemas de protección utilizando biotecnología.	74
Tabla 20: Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta.....	75
Tabla 21: Espaciamiento recomendado para fajinas vivas.....	78
Tabla 22: Características de plantas usadas en estabilización de taludes.....	80
Tabla 23: Plantas utilizadas comúnmente en estabilización de taludes.	80
Tabla 24: Diámetro promedio y resistencia a la tensión promedio de raíces de varios pastos.....	95
Tabla 25: Resistencia a tensión de haces de raíces de Vetiver.	96
Tabla 26: Tamaño de partículas.	98
Tabla 27: Tamaños estándar de tamices.....	98
Tabla 28: Característica del suelo según el índice plasticidad	100
Tabla 29: Clasificación SUCS para suelos gruesos.....	102
Tabla 30: Clasificación SUCS para suelos finos.....	102
Tabla 31: Clasificación AASHTO para suelos granulares y finos.	103
Tabla 32: Masa mínima de la porción de suelo según el tamaño máximo.	106
Tabla 33: Normas Técnicas de ensayos del suelo.	124
Tabla 34: Cantidad de ensayos de laboratorio realizados.....	124

Tabla 35: Características geométricas del talud	127
Tabla 36: Resumen del cálculo de la precipitación registrada mensual.	131
Tabla 37: Precipitación media – Promedio aritmético.....	132
Tabla 38: Coeficiente de escorrentía en la zona de estudio.....	133
Tabla 39: Precipitación efectiva media en la zona de estudio.	134
Tabla 40: Tasa de infiltración media en la zona de estudio.	136
Tabla 41: Resumen del contenido de humedad del suelo.....	138
Tabla 42: Resumen del análisis granulométrico del suelo.....	138
Tabla 43: Porcentaje granulométrico de suelo.....	139
Tabla 44: Resultados del límite líquido, plástico e índice de plasticidad.....	139
Tabla 45: Resultado del peso unitario del suelo.	139
Tabla 46: Clasificación de muestras de suelo representativas.	140
Tabla 47: Parámetros de resistencia de la calicata C-01, C-02.....	141
Tabla 48: Parámetros de resistencia de la calicata C-03, C-04.....	142
Tabla 49: Resumen de Parámetros de Resistencia sin presencia de raíces de pastos Vetiver.	142
Tabla 50: Parámetros de resistencia de la calicata C-01, C-02.....	143
Tabla 51: Parámetros de resistencia de la calicata C-03, C-04.....	143
Tabla 52: Resumen de Parámetros de Resistencia con presencia de raíces de pastos Vetiver.	144
Tabla 53: Efecto de las raíces sobre la cohesión y el ángulo de fricción.....	145
Tabla 54: Máximos esfuerzos de corte con raíces de Vetiver.	146
Tabla 55: Resistencia a tensión de haces de raíces de Vetiver.	148
Tabla 56: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global en condición actual.	153
Tabla 57: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global con técnica de bioingeniería.	156
Tabla 58: Factores de seguridad sin y con la técnica de bioingeniería.....	156
Tabla 59: Consideraciones técnicos.....	157
Tabla 60: Consideraciones técnicos para el trazado.	158
Tabla 61: Dimensiones del surco de establecimiento del Vetiver.....	158
Tabla 62: Consideraciones para adición de sustrato de siembra del Vetiver.	158
Tabla 63: Criterios técnicos para el cálculo del total de esquejes de Vetiver.	158
Tabla 64: Establecimiento de esquejes de Vetiver.	158
Tabla 65: Volumen de agua para riego.....	159
Tabla 66: Consideraciones de resiembra de Vetiver.	159
Tabla 67: Consideraciones de fertilización del Vetiver.	159
Tabla 68: Consideraciones de poda del Vetiver.	159
Tabla 69: Presupuesto para la estabilización de taludes con Vetiver.....	160
Tabla 70: Presupuesto para la estabilización de taludes con Vetiver.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Nomenclatura de taludes y laderas.	17
Figura 2: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.	18
Figura 3: Zonas sísmicas, diseño sismorresistente.	20
Figura 4: Ejemplo de un análisis de estabilidad del talud.	21
Figura 5: Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante.	24
Figura 6: Formas de la superficie de falla.	25
Figura 7: Esquema de grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio.	25
Figura 8: Métodos de análisis de estabilidad de taludes.	29
Figura 9: Tipos de bloques o cuñas para análisis de estabilidad de los taludes.	32
Figura 10: Suposiciones de localización de cuñas para calcular factores de seguridad.	32
Figura 11: Esquema del método del bloque deslizante.	33
Figura 12: Talud y superficie de falla espiral logarítmica.	34
Figura 13: Alternativas de procedimiento de localización de los círculos de falla para el análisis de estabilidad de taludes.	34
Figura 14: Fuerzas en un análisis de arco circular ($\emptyset=0$).	35
Figura 15: Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas.	36
Figura 16: Fuerzas que actúan sobre una dovela en un análisis de estabilidad del arco circular con dovelas.	36
Figura 17: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.	36
Figura 18: Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método ordinario o de Fellenius.	37
Figura 19: Esquema de fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop simplificado.	39
Figura 20: Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú.	40
Figura 21: Paralelismo de las fuerzas entre dovelas en el método de Spencer.	41
Figura 22: Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer.	41
Figura 23: Diferencias entre los resultados de varios métodos. En cuál de los casos es fundamental saber cuál de los métodos es el que da el verdadero valor del Factor de Seguridad.	42
Figura 24: Estabilización de taludes utilizando vegetación.	45
Figura 25: Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico sub superficial.	47
Figura 26: Efecto de la altura del pasto y de la velocidad sobre la rugosidad n (Hewlett y otros, 1987). ...	51
Figura 27: Efectos de los esfuerzos del flujo de agua sobre una cobertura de pastos.	52
Figura 28: Efecto estabilizante de las raíces contra deslizamientos de tierra.	53
Figura 29: Efecto de arco de las raíces de los árboles.	53
Figura 30: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos.	53
Figura 31: Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles.	54

Figura 32: Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces (Tsukamoto y Kusakabe 1984).....	55
Figura 33: Fuerza de anclaje de arbustos y de hierbas de raíz profunda.....	56
Figura 34: Efecto de arco de la vegetación.....	57
Figura 35: Efectos negativos de las raíces de los arboles sobre revestimientos y muros.....	58
Figura 36: Erosión por turbulencia causada por una cobertura vegetal superficial incompleta.....	58
Figura 37: Esquema de la fuerza de tracción del viento.....	61
Figura 38: Efecto de la permeabilidad sobre la profundidad de las raíces.....	63
Figura 39: Tipos de raíz.....	63
Figura 40: Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para raíces de siete especies vegetales tropicales.....	66
Figura 41: Esquema del análisis propuesto para calcular el factor de seguridad teniendo en cuenta el efecto de la vegetación.....	71
Figura 42: Elementos de arquitectura y paisajismo en el diseño de revegetalización.....	73
Figura 43: Esquema de una planta de vetiver y su efecto sobre la estabilidad de un talud.....	76
Figura 44: Estacas vivas.....	77
Figura 45: Fajinas vivas.....	78
Figura 46: Fajinas vivas en cruz o capas de maleza.....	79
Figura 47: Relleno de una cárcava utilizando estacas vivas y fajinas.....	79
Figura 48: Hileras de Vetiver.....	84
Figura 49 : Curva granulométrica de un suelo e interpretación de la curva.....	99
Figura 50: Límites de Atterberg.....	99
Figura 51: Carta de Casagrande (Suelos finos y orgánicos).....	103
Figura 52: Diagrama de esfuerzo – deformación.....	104
Figura 53: Envolvente de falla para arena y arcilla ensayada en corte directo.....	105
Figura 54: Secado en el horno de la muestra representativa.....	105
Figura 55: Tamizado de la muestra representativa.....	107
Figura 56: Determinación del límite líquido de la muestra representativa.....	108
Figura 57: Determinación del límite plástico de la muestra representativa.....	109
Figura 58: Determinación del peso específico de la muestra representativa.....	111
Figura 59: Determinación de los parámetros de resistencia del suelo.....	112
Figura 60: Procedimiento metodológico.....	119
Figura 61: Localización y ubicación política de la zona de estudio.....	119
Figura 62: Situación actual del talud en estudio.....	120
Figura 63: Levantamiento topográfico del talud en estudio.....	121
Figura 64: Superficie topográfica del talud en estudio.....	122
Figura 65: Toma de muestras de los puntos de muestreo.....	123

Figura 66: Localización y ubicación política de la zona de estudio.....	126
Figura 67: Plano topográfico de la zona de estudio. (Anexo 3)	127
Figura 68: Muestreo del área de estudio.	129
Figura 69: Caracterización del suelo del talud en estudio.	129
Figura 70: Clasificación de los estratos del talud en estudio.	130
Figura 71: Perfil estratigráfico del talud en estudio. (Anexo 5)	130
Figura 72: Interfaz del software Slide.	148
Figura 73: Definición del método de equilibrio límite con la que se evaluará.	149
Figura 74: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de Corte Directo sin presencia de raíces de Vetiver (C-01, C-02).	149
Figura 75: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de Corte Directo sin presencia de raíces de Vetiver (C-03, C-04).	150
Figura 76: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de Corte Directo con presencia de raíces de Vetiver (C-03, C-04), considerando la cohesión aportada por la resistencia a la tensión de raíces (tabla 55).	150
Figura 77: Proceso de análisis de estabilidad de taludes con los datos ingresados.	151
Figura 78: Análisis estático para el talud en estudio sin presencia de Vetiver.....	151
Figura 79: Análisis estático para el talud en estudio sin presencia de Vetiver.....	152
Figura 80: Análisis pseudoestático para el talud en estudio sin presencia de Vetiver.....	152
Figura 81: Análisis pseudoestático para el talud en estudio sin presencia de Vetiver.....	153
Figura 82: Análisis estático para el talud en estudio con presencia de Vetiver	154
Figura 83: Análisis estático para el talud en estudio con presencia de Vetiver	154
Figura 84: Análisis pseudoestático para el talud en estudio con presencia de Vetiver.....	155
Figura 85: Análisis pseudoestático para el talud en estudio con presencia de Vetiver.....	155
Figura 86: Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con Dron.	173
Figura 87: Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con Dron.	173
Figura 88: Determinación del contenido de humedad natural de las muestras.	179
Figura 89: Análisis granulométrico por tamizado de las muestras.....	179
Figura 90: Ensayos de límite líquido de las muestras.....	180
Figura 91: Ensayos de límite plástico de las muestras.	180
Figura 92: Preparación de especímenes para el ensayo de corte directo sin presencia de raíces de pastos Vetiver.	181
Figura 93: Preparación de especímenes para el ensayo de corte directo con presencia de raíces de pastos Vetiver.	181
Figura 94: Factor de seguridad Bishop (análisis estático).	206
Figura 95: Factor de seguridad Janbú (análisis estático).	206
Figura 96: Factor de seguridad Bishop (análisis pseudoestático-sísmico).	207

Figura 97: Factor de seguridad Janbú (análisis pseudoestático-sísmico)	207
Figura 98: Factor de seguridad Bishop (análisis estático)	208
Figura 99: Factor de seguridad Janbú (análisis estático)	208
Figura 100: Factor de seguridad Bishop (análisis pseudoestático-sísmico)	209
Figura 101: Factor de seguridad Janbú (análisis pseudoestático-sísmico)	209

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Histograma de precipitación media.....	133
Gráfico 2: Histograma de precipitación media efectiva.....	135
Gráfico 3: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-01, C-02.....	141
Gráfico 4: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-03, C-04.....	142
Gráfico 5: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-01, C-02.....	143
Gráfico 6: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-03, C-04.....	144
Gráfico 7: Envolvente de falla C-01, C-02.....	145
Gráfico 8: Envolvente de falla C-03, C-04.....	145
Gráfico 9: Cohesión y ángulo de fricción del suelo sin y con raíces de vetiver.....	146
Gráfico 10: Esfuerzo cortante del suelo sin y con raíces de vetiver.	147
Gráfico 11: Factores de seguridad estático y pseudoestático sin y con bioingeniería de vetiver.	157
Gráfico 12: Variación de costos de bioingeniería – vetiver en comparación con Corte - Banquetas.....	161

RESUMEN

La tesis titulada: “ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019”, tuvo como objetivo principal identificar la variabilidad de estabilidad mediante la aplicación de la técnica de bioingeniería haciendo uso del aporte de las raíces del pasto vetiver para la resistencia del corte al suelo del talud ubicado en la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, provincia de Oxapampa, región Pasco.

La metodología empleada fue del tipo aplicada, a través de ensayos de laboratorio, que permitieron la inserción de las raíces de vetiver para la evaluación en las propiedades de resistencia al corte del suelo y la evaluación de la estabilidad, frente a la aplicación de la técnica de bioingeniería.

Los resultados obtenidos del trabajo de investigación reflejaron que, la condición del talud en base a las características del suelo y geométricas del área, sin considerar el aporte de las raíces del pasto vetiver, determinan estratos de arena limo-arcillosa (SC-SM) y arena arcillosa (SC) con grados de cohesión de 0.0503 kg/cm² y 0.0538 kg/cm² y ángulos de fricción de 20.41° y 19.14° respectivamente. Sin embargo, los parámetros de resistencia se modifican al aporte de raíces del pasto vetiver, determinando un grado de cohesión de 0.0404 kg/cm² y 0.0382 kg/cm², y ángulos de fricción de 22.41° y 24.61° para los estratos mencionados.

Además, se refleja una configuración inestable con factor de seguridad de 0.905 y 0.881 (análisis estático), y de 0.751 y 0.728 (análisis pseudoestático). Mientras que, con la aplicación de la técnica de bioingeniería, la condición de estabilidad determinada es de 1.504 y 1.444 (análisis estático) y de 1.278 y 1.218 (análisis pseudoestático). Para determinar las configuraciones de estabilidad e inestabilidad se utilizó el método de Bishop y Janbú.

Entonces, se concluye que, la variabilidad mediante el empleo de pastos vetiver, determina mejoras de estabilidad en un 66% y 70% para condiciones estáticas y pseudoestáticas respectivamente. Se pasa de un factor inestable a uno estable. Se reducen de los costos en un 33%, en comparación a la técnica de la medida convencional de cortes para banquetas.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, Bioingeniería, Resistencia al corte del suelo, Corte directo, Raíces de Vetiver, Método de equilibrio límite.

ABSTRACT

The thesis entitled: "STABILIZATION OF SLOPES THROUGH THE BIOENGINEERING TECHNIQUE WITH CROP OF VETIVER PASTURES IN TROPICAL AREAS, YEAR 2019", had as main objective to identify the variability of stability through the application of the bioengineering technique making use of the contribution of the roots of vetiver grass for the resistance of the cut to the ground of the slope located in the progressive 33 + 450 km of the Pozuzo - Santa Rosa road, Oxapampa province, Pasco region.

The methodology used was of the applied type, through laboratory tests, which allowed the insertion of vetiver roots for the evaluation of the properties of resistance to cutting of the soil and the evaluation of stability, compared to the application of the technique Bioengineering.

The results obtained from the research work reflects that the condition of the slope based on the characteristics of the soil and the geometric of the area, without considering the contribution of the roots of the vetiver grass, determine silt-clay sand strata (SC-SM) and clayey sand (SC) with degrees of cohesion of 0.0503 kg / cm² and 0.0538 kg / cm², and friction angles of 20.41 ° and 19.14 ° respectively. However, the resistance parameters are modified to the contribution of vetiver grass roots, determining a degree of cohesion of 0.0404 kg / cm² and 0.0382 kg / cm², and friction angles of 22.41 ° and 24.61 ° for the mentioned strata.

In addition, an unstable configuration is reflected with a safety factor of 0.905 and 0.881 (static analysis), and 0.751 and 0.728 (pseudostatic analysis). While, with the application of the bioengineering technique, the determined stability condition is 1,504 and 1,444 (static analysis) and 1,278 and 1,218 (pseudostatic analysis). To determine the stability and instability configurations the Bishop and Janbu method was used.

Then, it is concluded that, the variability through the use of vetiver grasses determines stability improvements of 66% and 70% for static and pseudostatic conditions respectively. It goes from an unstable factor to a stable one. Costs are reduced by 33%, compared to the conventional measurement technique of cuts for sidewalks.

Key words: Slope stability, Bioengineering, Soil cut resistance, Direct cut, Vetiver roots, Limit equilibrium method.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente ha propiciado que se realicen investigaciones que brinden soluciones ingenieriles amigables con el entorno ambiental, tanto para las obras de construcción de carreteras, canales, viviendas y otros; así, también, como para la mitigación de desastres naturales, buscando que estas se vuelvan imprescindibles para el desarrollo sostenible del país.

Uno de los problemas de construcción que se ha evidenciado actualmente, tiene que ver con la estabilidad de taludes que se encuentran ubicados en vías nacionales importantes. Ante este hecho, las soluciones que se han planteado, generalmente no han sido las más adecuadas o amigables con el entorno ambiental.

Tal es así que, la presente investigación busca dar solución a este problema, a través del reforzamiento de suelos mediante la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver.

Generalmente, en las zonas tropicales, las fallas producidas en los taludes son superficiales y no profundos. En algunos casos, estos se deben a la meteorización ocasionados por factores externos como: las precipitaciones, escorrentías sobre el suelo y fallas por los efectos sísmicos. Asimismo, estas fallas también suelen ser provocados por múltiples alteraciones realizadas por los hombres, como, por ejemplo, con el proceso de la deforestación que influye en la erosión de los suelos.

La vegetación aumenta la resistencia de los suelos como un sistema de refuerzo, ya que puede proteger e incrementar la estabilidad de los taludes al reducir la erosión, reforzar el suelo e inhibir los deslizamientos, pero si seguimos deforestando nuestro planeta y sumando a esto se incrementan los factores naturales (lluvias torrenciales), los taludes estarán más expuestos.

En las zonas tropicales del Perú abundan los suelos arcillosos y limosos; por esta razón, el estudio de alternativas amigables con el medio ambiente, así como sostenibles, son importantes para lograr el mejoramiento del suelo con el uso adecuado de la vegetación.

Tal es así que, en el presente trabajo de investigación, se tuvo como objetivo identificar la estabilización de taludes empleando la técnica de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales. Así también, se buscó determinar la influencia de las raíces en la resistencia al corte de los suelos, evaluándose las resistencias al corte de los suelos encontrados, con los suelos con refuerzos de raíces de pastos vetiver, determinándose los efectos en la resistencia al corte de suelos y el incremento de los factores de seguridad contra el deslizamiento de taludes.

Para ello, la investigación se estructura en cinco capítulos:

En el capítulo I, se describe el planteamiento de la investigación donde se aprecia la problemática, objetivos, justificación, delimitación de la investigación, formulación de la hipótesis y las variables que se investigan.

En el capítulo II, se presenta el marco teórico, donde se describen los antecedentes respecto a las técnicas de bioingeniería para estabilización de taludes. En las bases teóricas se presentan y describen puntos importantes para la investigación como: estabilización de taludes, técnicas de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver, resistencia al corte de suelos y factores de seguridad contra deslizamientos de taludes.

En el capítulo III, se presenta el marco metodológico, por lo que se detalla el tipo, nivel, diseño, método de la investigación. Aquí también se describe la población, muestra, instrumentos para la recolección y análisis de datos.

En el capítulo IV, se analizan y discuten los resultados, en relación a la información recolectada, así como los resultados de los ensayos que se realizaron. También se presentan los procesos de modelamiento del talud.

En el capítulo V, se responden a las preguntas de los problemas de investigación mediante las conclusiones y recomendaciones a las que se arribaron.

Finalmente, se presentan los anexos que comprenden los ensayos de laboratorio realizados, análisis y modelamiento del talud, memorias de cálculo y el panel fotográfico.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, uno de los problemas constantes en las regiones del país en el campo de la construcción, son los deslizamientos y erosiones de los taludes. Estos están propensos principalmente a las condiciones ambientales como las lluvias intensas (en ocasiones extremas), agentes antrópicos que afectan directamente las condiciones de las laderas de los taludes y, además, el crecimiento insostenible en laderas y áreas no aptas.

Bajo estas perspectivas las soluciones brindadas en la actualidad, generalmente, no siempre son las más adecuadas con el entorno ambiental. Es por ello, que la investigación se basó en los fenómenos de deslizamientos y erosión, ocasionados por factores externos como las precipitaciones y las características mecánicas del suelo, que generan daños considerables a las carreteras, vías de comunicación importantes para la población.

El talud ubicado en la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, de la provincia de Oxapampa en la región Pasco, sufre continuamente cambios morfológicos del suelo, debido a las características climatológicas (clima tropical), propias del lugar, así también por encontrarse en constante erosión y deslizamiento de materiales sólidos por la zona accidentada donde se ubica, lo que pone en peligro su estabilidad y sus estructuras viales y, además, lo más importante, pone en riesgo la vida de las personas.

Debido a esto, se genera la necesidad impetuosa de plantear e investigar alternativas que empleen nuevas técnicas compatibles con el medio ambiente, como es el caso de la bioingeniería con cultivos de pastos vetiver, con los cuales se pueden solucionar problemas de inestabilidad de taludes, dejando de lado el uso de métodos convencionales que son igual de eficientes, pero que presentan impactos negativos, a largo plazo, al medio ambiente.

Es preciso mencionar que, en esta investigación, se desarrolló la aplicación de medidas no estructurales a partir del análisis de estabilidad del talud. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos que permitieron evaluar la propuesta de solución de la técnica de bioingeniería, analizando escenarios con y sin cultivos de vetiver, con el fin de determinar la variación que genera la utilización de este método y así difundirlo para otros casos de estudio.

Por otro lado, se demostró que el cuidado del medio ambiente se logra con el uso de la técnica de bioingeniería ya que es una alternativa natural de estabilización, a comparación del sistema convencional que afecta al medio ambiente por la presencia de agentes químicos en los materiales de las obras de estabilización, extracción y explotación de agregados de canteras naturales que llegan a contaminar la construcción de estas estructuras, creando un impacto negativo en el ecosistema y medio ambiente. Es importante referir que, esta parte de la selva (Pozuzo – Santa Rosa) forma parte del Parque Nacional Yanachaga – Chemillén, el cual es área protegida porque su biodiversidad se encuentra en peligro de extinción (SERNANP, 2017).

En base a lo sustentado, surge el presente trabajo de investigación, el cual plantea la aplicación de una nueva alternativa de estabilizar taludes mediante técnicas de bioingeniería, empleando cultivos de pastos vetiver en taludes de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, los cuales permiten minimizar los deslizamientos, controlar la erosión que presentan de manera recurrente y cuidado del medio ambiente.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

- ✓ ¿En qué medida la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales, mejorará en la estabilidad del talud?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿En qué medida la condición actual del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa se ajusta para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales?
- ✓ ¿Cuál es la magnitud de las características físicas y mecánicas del suelo del talud para la evaluación de aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales?
- ✓ ¿En qué medida varía el factor de seguridad de estabilidad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

- ✓ Identificar la variabilidad de estabilidad del talud mediante la aplicación de la técnica de bioingeniería en zonas tropicales empleando cultivo de pastos Vetiver.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Identificar la condición actual de estabilidad del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.
- ✓ Determinar la magnitud de las características físicas y mecánicas del suelo del talud para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.
- ✓ Calcular el porcentaje de variación del factor de seguridad de estabilidad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Justificación práctica

En la presente investigación, cuyo talud en estudio, se encuentra ubicado en la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, sufre continuamente de cambios morfológicos del suelo, debido al clima tropical dónde se ubica, ocasionando

que este sector sea vulnerable ante posibles erosiones y desplazamiento de materiales sólidos, poniendo en peligro su estabilidad y estructuras viales. Este problema se ha incrementado los últimos años, lo que pone en riesgo no solo la infraestructura, sino también, vidas humanas. Para solucionar este tema, se realizó un estudio topográfico, geotécnico e hidrológico, donde se planteó la técnica de bioingeniería. A través de la investigación, se presentan los resultados obtenidos que permitieron evaluar la propuesta de solución, analizando escenarios con y sin cultivos de vetiver, con el fin de determinar la variación que genera la utilización de este método y así difundirlo para otros casos de estudio y podamos, como ingenieros, plantear, identificar y comparar estos problemas con otra alternativa de solución, identificando así, la opción más conveniente.

1.3.2. Justificación metodológica

La presente investigación plantea la utilización de la técnica de bioingeniería para la solución de problemas de inestabilidad y control de erosión de taludes, la cual abarca un análisis de estabilización usando cultivos de pastos vetiver para el talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, los cuales pueden solucionar problemas locales en cuanto a la erosión y deslizamiento, planteando nuevas alternativas de estabilización.

1.3.3. Justificación económica

En la presente investigación se plantea el uso de la técnica de bioingeniería mediante el empleo de cultivos de pastos vetiver, con el fin de evaluar si es o no, una herramienta eficaz, ecológica, autosustentable y particularmente a un bajo costo en el control de inestabilidad y erosión de taludes.

1.4. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Conceptual

La presente investigación contempla conceptos de estabilidad de taludes y control de la erosión aplicando la técnica de bioingeniería mediante el uso de cultivos de pastos vetiver en zonas tropicales. Esta investigación se enfoca en el planteamiento e implementación de elementos biológicos como son los pastos vetiver, como parte de

minimizar y dar solución en cuanto a la erosión y deslizamiento de taludes en zonas tropicales.

1.4.2. Espacial

La presente investigación se desarrolló en base a taludes presentes en zonas tropicales en este caso ubicadas en la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, los cuales presentan constantemente fenómenos de erosión y deslizamientos, debido a la recurrencia de inestabilidad en estas zonas. El desarrollo de los ensayos de suelos encontrados en estas zonas, se realizó en un laboratorio especializado de mecánica de suelos.

1.4.3. Temporal

El desarrollo del proyecto de investigación, así como la recopilación de datos, levantamiento topográfico, realización de ensayos en laboratorio, estudio del pasto Vetiver y análisis de estabilidad del talud, para su posterior desarrollo de conclusiones, se llevó a cabo en los meses de junio y setiembre del 2019.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis general

- ✓ La aplicación de la técnica de bioingeniería mediante las plantaciones de cultivos de pastos vetiver en zonas tropicales mejora la estabilidad de talud.

1.5.2. Hipótesis específicas

- ✓ La condición actual de estabilidad que presenta el talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa es de una configuración inestable, según las características del suelo y geométricas que presenta el talud.
- ✓ En el talud de estudio los suelos comunes son de mediana y alta cohesividad, cuya propiedad mecánica de resistencia aumenta en su magnitud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales.
- ✓ El factor de seguridad de estabilidad del talud aumenta considerablemente debido a la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

- ✓ Técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver.

1.6.2. Variable dependiente

- ✓ Estabilidad de talud.

1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1: Matriz de Operacionalización de variables.

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES				
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019				
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>X1: Técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver.</p>	<p>La bioingeniería estudia y describe el uso de la vegetación en la ingeniería civil de la construcción. También puede aplicarse a modificaciones ambientales como la protección de la superficie del suelo, la estabilización de laderas, del curso del agua, la protección de costas, las barreras de vegetación y la mejora ecológica de un área.</p>	<p>Se entiende por bioingeniería al uso de la vegetación para la estabilización de taludes y control de la erosión, así como es única en el sentido de que las partes de la planta por sí mismas o sea las raíces y el follaje funcionan como los elementos estructurales mecánicos para la protección del talud.</p>	<p>Propiedades del Vetiver</p>	<p>Resistencia a la tensión</p> <p>Diámetro de raíz</p> <p>Resistencia suelo-raíz</p>
<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Y1: Estabilidad de talud.</p>	<p>La estabilidad de taludes estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o realizar una obra de construcción de ingeniería civil, siendo un aspecto directamente relacionado con la ingeniería geológica - geotécnica.</p>	<p>Se entiende por estabilidad de taludes a la seguridad que la conformación de tierra o roca presenta a su falla de movimiento, es decir, la comparación entre la resistencia de la conformación o capacidad a no perder su geometría frente a las solicitaciones internas y externas a las que está expuesta.</p>	<p>Características físicas y mecánicas del suelo</p> <p>Condición actual del talud</p> <p>Factor de seguridad de estabilidad del talud</p>	<p>Tipo de suelo</p> <p>Ángulo de fricción</p> <p>Grado de Cohesión</p> <p>Peso específico</p> <p>Pendiente media</p> <p>Altura media</p> <p>Perfil longitudinal y estratigráfico.</p> <p>Superficie de falla.</p> <p>Método de análisis de estabilidad.</p> <p>Condición de análisis de estabilidad.</p>

Fuente: Elaboración Propia.

1.8. MODELO DE PRUEBA DE HIPÓTESIS

1.8.1. Prueba de hipótesis 1

- **Hipótesis Científica:** La condición actual de estabilidad que presenta el talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa es de una configuración inestable, según las características del suelo y geométricas que presenta el talud.
- **Ho: No existe** una inestabilidad de la condición actual del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, según las características del suelo y geométricas presentadas.
- **H1: Existe** una inestabilidad de la condición actual del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, según las características del suelo y geométricas presentadas.

1.8.2. Prueba de hipótesis 2

- **Hipótesis Científica:** En el talud de estudio los suelos comunes son de mediana y alta cohesividad, cuya propiedad mecánica de resistencia aumenta en su magnitud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.
- **Ho: No existe** un aumento en su magnitud de la propiedad mecánica de resistencia del suelo común de mediana y alta cohesividad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.
- **H1: Existe** un aumento en su magnitud de la propiedad mecánica de resistencia del suelo común de mediana y alta cohesividad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.

1.8.3. Prueba de hipótesis 3

- **Hipótesis Científica:** El factor de seguridad de estabilidad del talud aumenta considerablemente debido a la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales.
- **Ho: No existe** un aumento considerable del factor de seguridad de estabilidad del talud debido a la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales.

- **H1: Existe** un aumento considerable del factor de seguridad de estabilidad del talud debido a la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales.

La *contrastación de hipótesis* se realiza en la *discusión de resultados*, según los *antecedentes de la investigación* mediante la comparación de resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Las obras de ingeniería geotécnica desempeñan una significativa contribución al desarrollo de una población, ya que solucionan posibles desastres naturales mediante la estabilización de suelos a nivel de taludes.

A continuación, se presenta los estudios referidos como antecedentes de la investigación, los cuales son temas sobre uso de técnicas de bioingeniería en el control de la inestabilidad y control de la erosión de los taludes.

2.1.1. Antecedentes nacionales

(De la Cruz Fallaque, 2005), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Universidad Nacional de Ingeniería, la tesis titulada: *“Uso de la Bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes”*. “La investigación planteó como objetivo principal evaluar las bondades del uso de la vegetación para controlar la pérdida de suelo en taludes debido a la erosión del flujo por escorrentía superficial. La metodología desarrollada se basó en procedimientos experimentales, los cuales describen los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para evaluar el uso de pastos sin refuerzo adicional y pastos reforzados con geosintéticos, en taludes sometidos a la erosión del flujo superficial producto de las lluvias. Para hacer una comparación, también se probaron taludes de suelo sin protección. La especie herbácea usada fue Tanzania (*Panicum Maximum*), que es una variedad amazónica, y el tipo de suelo fue limoso arenoso sin cohesión.

Las pruebas consistieron en escurrir diferentes descargas en taludes con similar topografía, tipo de suelo y con las coberturas mencionadas en el párrafo anterior. De cada prueba se obtuvieron parámetros de erosión, los cuales fueron usados para evaluar el uso de cada condición. Por último, concluye que, el comportamiento y la protección de un pasto en control de erosión, varía con el incremento del esfuerzo cortante hidráulico que está en función del caudal de escorrentía. Si el incremento de esfuerzo cortante es considerable, el pasto puede fallar siendo arrastrado por el flujo, en este caso es necesaria la protección adicional”.

(Fernandez Espinoza, 2015), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Pontificia Universidad Católica del Perú, la tesis titulada: *“Propuesta de restauración del tramo urbano del río Rímac mediante la aplicación de Bioingeniería”*. “Esta investigación tuvo como objetivo principal analizar y evaluar una propuesta para la restauración de un tramo del río Rímac, perteneciente al área urbana, mediante la aplicación de una alternativa de bioingeniería. Este método tiene base en el establecimiento de una barrera de vegetación en los márgenes del río con la finalidad de reducir su velocidad de escorrentía y por ende su efecto erosivo. La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la subcuenca bajo río Rímac y presenta una longitud de 1 080 metros. Esta comprende los distritos de San Martín de Porres, Lima y el Rímac. La metodología se basó en la recopilación y análisis de la información referente a la caracterización de la zona de estudio. Asimismo, de acuerdo a las visitas de campo se identificaron puntos críticos con potenciales fallas en voladizo (cantilever), zonas de inundación y acumulación de materiales sólidos.

En consecuencia, se desarrolló la simulación para un régimen permanente y no permanente, en donde se obtuvieron mapas de inundaciones, variación de velocidades y esfuerzos cortantes, así como la elevación de la superficie de agua. Asimismo, se evaluó la estabilidad global del terreno mediante análisis estáticos y pseudo-estáticos para la determinación de factores de seguridad. Por lo cual, se propusieron para las condiciones actuales la utilización del vetiver como alternativa de bioingeniería para el establecimiento de la barrera de vegetación en los márgenes del río. En consecuencia, para determinar la variación de la conducta hidráulica y de los factores de seguridad, se procedió a realizar un nuevo modelamiento hidráulico y análisis de estabilidad global con las consideraciones de la propuesta de solución.

Mediante la comparación de ambos escenarios se corroboró las asunciones iniciales en disminución de la velocidad y aumento del coeficiente de seguridad. Por consiguiente, se concluyó, y se comprobó que la utilización del vetiver como método de bioingeniería constituye una herramienta integral, pues permite mejorar las condiciones mecánicas, hidráulicas y medioambientales de tramo analizado”.

(Huariccallo Maquera, 2013), para optar el grado de Ingeniero Agrícola, sustentó en la Universidad Nacional del Altiplano, la tesis titulada: *“Propuesta de estructuras de Biotecnología para el control de erosión hídrica (cárcava) en la comunidad de Challacollo-Ilave-Puno-2013”*. “Este trabajo de investigación tuvo como principal objetivo proponer estructuras de biotecnología para el control de la erosión hídrica en la comunidad de Challacollo; vegetación con las mejores características físicas de la zona, para ello se describió y evaluó los procesos, mecanismos de la erosión hídrica que se presentan en la cárcava, a fin de controlar en función a los materiales disponibles en la comunidad. La metodología se basó en la evaluación de las características físicas de tres vegetaciones existentes en la comunidad, más los factores primordiales para el trasplante de una vegetación (clima y suelo), en dos zonas: una donde crece la vegetación y la cárcava donde se trasplantará, obteniendo así las estructuras de biotecnología que controlarán los procesos de carcavamiento, como los muros de piedra, muros de gaviones, colchonetas de gaviones. Por último, se concluyó que, la vegetación con buenas características físicas y adecuadas de suelo para el trasplante es “*Pennisetum clandestinum*” (kikuyo), además de que las estructuras de tecnología y la vegetación determinada, forman una estructura rígida de biotecnología, llegando así a disminuir y controlar la erosión hídrica en cárcava, mitigando las grandes pérdidas de áreas agrícolas, evitando el arrastre de sedimentos a las partes bajas de la microcuenca; por consiguiente, alterando la textura del suelo, reduciendo área de recarga de acuíferos.

(Mays Arratea, 2017), para optar el grado de Ingeniero Ambiental, sustentó en la Universidad de Huánuco, la tesis titulada: *“Reducción de la erosión hídrica del suelo, con la utilización de la Vetiveria Zizanioides en la Microcuenca de Tingoragra – Nauyan Rondos, Provincia de Huánuco 2017”*. “Este trabajo de investigación tuvo como principal objetivo reducir la erosión hídrica, utilizando la Vetiveria “*Chrysopogon Zizanioides*” en los suelos de la microcuenca de Tingoragra - Rondos.

La metodología se centró en la evaluación de los parámetros como la de cuantificar la pérdida de suelo y parámetros fisicoquímicos del suelo, y describir de manera de análisis cada uno de las tres microparcels. Llegando a las conclusiones de evidenciar que el suelo de la microcuenca Tingoragra – Rondos, es Franco, con altos porcentajes de arena y limo; obteniendo resultados de pérdida de nutrientes de (P, Ca y Mg) en Kg/ha, producto de las escorrentías superficiales durante las precipitaciones altas en los meses de noviembre a febrero; así como también de que los resultados del mayor volumen de suelo erosionado superficialmente producto de las precipitaciones es la Microparcela 03 – (Sin Plantaciones) con 11.68 (Ton/Ha/Periodo de lluvia), seguido por la Microparcela 02 – (Plantación de Plantas Nativas) con 8.2 (Ton/Ha/Periodo de lluvia), y finalmente la Microparcela 01 – (Plantación de Vetiveria Zizanoide) con 4.59 (Ton/Ha/Periodo de lluvia). Concluyendo de esta manera la disminución del suelo erosionado por precipitación, sembrando la Vetiveria Zizanoide dentro de la microparcela con las varillas de erosión”.

(Martinez Galvez, 2006), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Universidad Nacional de Ingeniería, la tesis titulada: *“Estabilización de taludes con reforestación”*. “Este trabajo de investigación es una recopilación de la información existente sobre la teoría de análisis a taludes, los problemas que afectan a la estabilidad del talud, la función de las plantas en la estabilidad de taludes, los métodos y la aplicación de la bioingeniería a la estabilización de taludes, las especies recomendadas y usadas en nuestro medio, los trabajos complementarios que garanticen la efectividad del método y la experiencia obtenida en distintos trabajos realizados. Las especies forestales recomendadas son principalmente de la zona central andina, que es donde se ha realizado el estudio. La inclusión de otras especies forestales implicaría la observación e investigación en otras zonas y un estudio mucho más extenso. De manera aplicativa se realizó una evaluación de estabilidad a un proyecto en ejecución, con problemas de deslizamientos. Los objetivos de la evaluación fueron, mediante una revisión a los diseños de los muros de contención planeados y análisis de estabilidad global y local al talud, los motivos del deslizamiento sucedido y plantear una solución al problema dentro del contexto de la tesis. Concluyendo así que, un sistema de reforestación es aplicable como estabilizador en taludes, si la posible falla del talud no compromete la vida de seres, construcciones o equipos.

Esta restricción surge debido a que el comportamiento de las plantas, como elemento de refuerzo mecánico es incierto, ya que depende de numerosas condiciones (velocidad de crecimiento, posibilidades de establecimiento, adecuadas condiciones climáticas y edafológicas, etc.). Concluyó que se puede estabilizar un talud mediante reforestación, cuando éste no represente en si un riesgo para la vida de seres, para construcciones o equipos; para taludes con condiciones elevadas de riesgo es conveniente aplicar la biotecnia, donde el elemento estabilizador principal depende de estructuras inertes y la vegetación representa una importante protección contra la erosión, regulación de la humedad y en forma secundaria un aporte a la estabilización mecánica del talud”.

2.1.2. Antecedentes internacionales

(Quiros Castegnaro, 2012), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Universidad de Costa Rica, la tesis titulada: *“Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos”*. “La investigación planteó como objetivo principal determinar de manera experimental el aumento de la resistencia al corte en suelos limosos y arcillosos de alta compresibilidad, así como en suelos limosos arenosos causado por las raíces del pasto Vetiver. Se realizó un análisis del incremento en la resistencia al corte en suelos proporcionado por las raíces de las plantas, para el posterior desarrollo de una metodología de diseño de taludes tomando en cuenta los efectos de dichas raíces. El desarrollo de la metodología de diseño, se basó en el uso de información experimental, obtenida a partir de la realización de distintos ensayos de laboratorio; así como de modelos matemáticos que reflejen el comportamiento mecánico del suelo con presencia de raíces. Concluyendo que, a partir de la realización de ensayos experimentales en laboratorio, se logró encontrar un método de bajo costo y sencillo para evaluar el efecto de las raíces en la estabilidad de taludes. Esto se consiguió mediante la realización de ensayos de resistencia a la tracción de raíces de la planta que se desea evaluar.”

(Wellmann Castellanos, 2017), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Universidad de San Carlos de Guatemala, la tesis titulada: *“Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas”*.

“Este proyecto de investigación tuvo como objetivo principal proponer como alternativa para la reducción de riesgo ante la amenaza de un deslizamiento masivo con

la utilización del pasto vetiver en el talud ubicado dentro del parque ecológico Las Ardillas de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizó varios estudios para disminuir el riesgo, los daños y las pérdidas materiales y de vidas humanas que pueden llegar a generarse si ocurre un desprendimiento masivo en el área, uno de los cuales es el presente trabajo de graduación, en el cual se analizaron las propiedades físicas y mecánicas del pasto vetiver para ser utilizado como un material dentro del campo de acción de la bioingeniería. La metodología desarrollada fue que, primero se realizó un estudio de los antecedentes generales del uso del pasto en situaciones similares en otros países; luego, se estudiaron las características que constituyen un riesgo, las características propias del pasto vetiver y el comportamiento de los taludes al momento de fallar. Asimismo, se evidenció su aplicación, analizando su climatología, características topográficas y las propiedades mecánicas del material realizando un ensayo experimental para determinar el esfuerzo máximo a tensión que soportan las raíces del pasto vetiver. Concluye la investigación que, la siembra del pasto vetiver puede mejorar las condiciones mecánicas y de seguridad en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas, el cual sufre de erosión laminar, por viento y escorrentía; también, ayuda a regular la inestabilidad por deslizamientos de las masas de suelo. Se propone la siembra de este pasto como una medida de control de riesgo, la cual debe ser implementada junto con otros métodos para lograr una estabilización efectiva; entre estos métodos están: la realización de bermas para reducir la pendiente paulatinamente y un control del río que avanza al pie del talud.”

(Sanchez Restrepo, y otros, 2019), para optar el grado de Ingeniero Civil, sustentó en la Universidad Santo Tomás Villavicencio, la tesis titulada: *“Control de la erosión de taludes mediante el uso de Vetiver y Micorrizas Arbusculares, zona de Soceagro en el Municipio de Villavicencio - Meta”*. “La investigación planteó como objetivo principal evaluar la eficiencia del pasto Vetiver colonizado con Micorrizas Arbusculares, el control de la erosión de taludes en una unidad experimental del Piedemonte llanero. La metodología desarrollada fue que, mediante el producto de la relación simbiótica entre ambos organismos, se obtiene una alteración positiva de las características biológicas y propiedades físicas de la planta, entre lo que se destaca, un comprobado y considerable aumento en la longitud radicular de la misma, obteniendo así mejoras en cuanto a la estabilización del talud y control de la erosión, gracias al aumento de las propiedades

mecánicas del suelo por acción de la raíz potencializada por las Micorrizas. Concluyendo que la implementación de vetiver es un camino viable y rentable económicamente para el control de la erosión en taludes y suelos de gran parte del Piedemonte, previniendo así la vulnerabilidad. Además, presentó un aumento en las propiedades del pasto vetiver positivas, pero aun no considerables para plantar un cambio realmente significativo, por la imposibilidad de extender la investigación y debido al tiempo de desarrollo del pasto.”

(Herrera Passos, 2017), para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia, sustentó en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, la tesis titulada: *“Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto Vetiver (Chrysopogon Zizanioides) en la vía Neiva-Vegalarga Departamento del Huila”*. “La investigación planteó como objetivo principal evaluar la resistencia al corte de los suelos en laderas cubiertos con pasto Vetiver. La metodología desarrollada se centró en el estudio de la influencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo, siguiendo el criterio de falla de Mohr Coulomb y en la simulación de estas condiciones en función de la estabilidad de la ladera. Según los resultados obtenidos se evidencia que el sistema vetiver refuerza mecánicamente el suelo mediante la transferencia de la resistencia al corte debido al aumento presente en los parámetros de resistencia como consecuencia a la alta resistencia a la tensión que poseen las raíces. Además, el número y el tamaño de las raíces que atraviesan la superficie de deslizamiento son extremadamente importantes. La resistencia a la tracción disminuye con el aumento de diámetro de la raíz, lo que implica que el diámetro de la raíz más fino contribuye a la mayor resistencia a la tracción. Concluyendo que, el sistema vetiver para el aumento de las propiedades de resistencia del suelo es eficiente en términos de las condiciones analizadas”.

(Miranda Muñoz, 2016), para optar el grado de Magister en Ciencias Ambientales, sustentó en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, la tesis titulada: *“Revisión panorámica del uso del pasto Vetiver (Chrysopogon Zizanioides) en restauración de taludes como técnica de bioingeniería del suelo”*. “La investigación planteó como objetivo principal analizar la factibilidad de uso del pasto Vetiver en restauración de taludes en el territorio colombiano, específicamente en un tramo de la vía Florencia – Huila en el departamento de Caquetá. La metodología desarrollada, así como la idea principal de la

investigación es la de establecer comparativamente las ventajas y desventajas del uso de este pasto como técnica de bioingeniería del suelo para control de taludes con relación a las técnicas de ingeniería civil tradicionales aplicadas para los mismos fines.

Muchas investigaciones demuestran esas diferencias, y también algunas características importantes como la fortaleza, la longitud y la unión en manojos de la raíz, resisten la presión de las partículas del suelo aumentando su cohesión y estabilizando los taludes además de comportarse de manera similar y en algunos casos mejor que estructuras de concreto y de hierro como son las puntillas de tierra (soil nails), ya que las raíces no se corroen y en cambio sí se fortalecen con el pasar de los años”.

El resultado de la recopilación de antecedentes de investigación, pretenden establecer las bondades del pasto vetiver como la técnica de bioingeniería más recomendada para el control de erosión de suelos y restauración de los mismos. Esto se desprende de los resultados presentados en trabajos de investigación en diversas partes del país y del mundo, demostrando niveles altos de satisfacción en el ámbito social, económico y medioambiental. En tal sentido, basándonos en lo expuesto, el presente trabajo de investigación ofrecerá una posición personal, recomendando el uso de pasto vetiver en labores de recuperación de suelos.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Estabilidad de taludes

Según (Suárez Díaz, 2006), talud es la conformación de tierra o roca (natural o artificial), cuya geometría mantiene una inclinación respecto al plano horizontal. Las laderas o taludes naturales son originados debido a los procesos geológicos que soporta a lo largo del tiempo una conformación de tierra, en cambio, los taludes artificiales o talud, son originados debido a la intervención humana, con el fin de satisfacer sus necesidades como en el caso de las vías de transporte y viviendas.

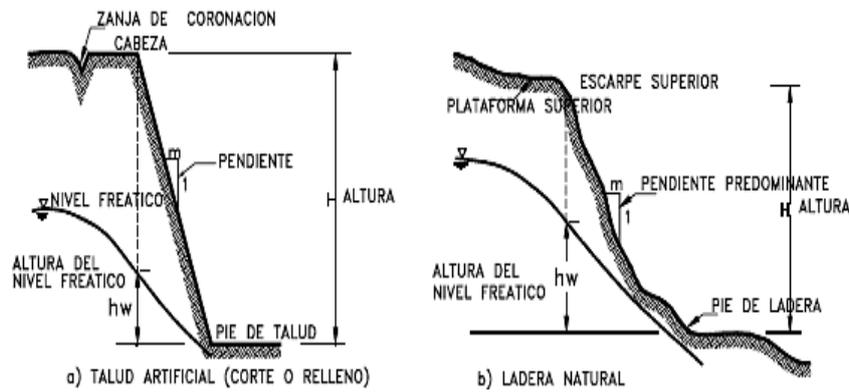


Figura 1: Nomenclatura de taludes y laderas.

Fuente: (Suárez Díaz, 2006).

Evaluar y analizar la estabilidad de un talud involucra un estudio, en donde se caracteriza la resistencia del suelo, establece el perfil del talud, evalúa las condiciones de filtración y agua subterránea, selección de una superficie de deslizamiento o falla y calcular el factor de seguridad. Es que, a partir de este factor de seguridad, (se elige en base al destino del talud) se debe determinar la superficie de falla crítica. (Suárez Díaz, 2006)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se entiende por estabilidad de taludes a la seguridad que la conformación de tierra o roca presenta a su falla de movimiento, es decir, la comparación entre la resistencia de la conformación o capacidad a no perder su geometría frente a las sollicitaciones internas y externas a las que está expuesta.

Además (Suárez Díaz, 2006), menciona que dentro de las metodologías de análisis de estabilidad, se encuentran los métodos de equilibrio límite, los métodos numéricos, los métodos dinámicos para análisis de flujos entre otros. Cabe mencionar que para esta investigación se utilizaron los métodos de equilibrio límite.

2.2.1.1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes

(Suárez Díaz, 2006) explica que, para que un talud tenga condición de inestable, ésta es debido a los factores influyentes que existen, las cuales están sintetizadas en dos grandes grupos.

Según lo mencionado líneas arriba, el grupo de factores condicionantes intrínsecos se entiende a las condiciones propias o de naturaleza del talud, en cambio el grupo de factores externos o desencadenantes son relativos a condiciones externas siendo los mayores causantes de la inestabilidad de un

talud, ya que una mínima variación en estos factores puede ocasionar grandes movimientos de masa de tierra. (Suárez Díaz, 2006)

Tabla 2: Factores que influyen en la estabilidad de taludes.

FACTORES INFLUYENTES EN LA INESTABILIDAD DE UN TALUD		
FACTORES CONDICIONANTES	Geológicos	Litología, estratigrafía, discontinuidades.
	Hidrológicos	Cambios en las presiones de poros o hidrostáticas.
	Geomorfológicos	Áreas con altas pendientes, topografía irregular.
	Climáticos	Efectos erosivos
FACTORES DESENCADENANTES	Naturales	Precipitaciones extraordinarias, infiltraciones, variación de temperatura, sismos.
	Antrópicos	Deforestación, asentamientos humanos en laderas, minería, vialidad.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“Los deslizamientos generalmente son llamados movimientos de masa de tierra, lo cual consiguen un movimiento progresivo a lo largo de diversas superficies a través de una franja.” (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)

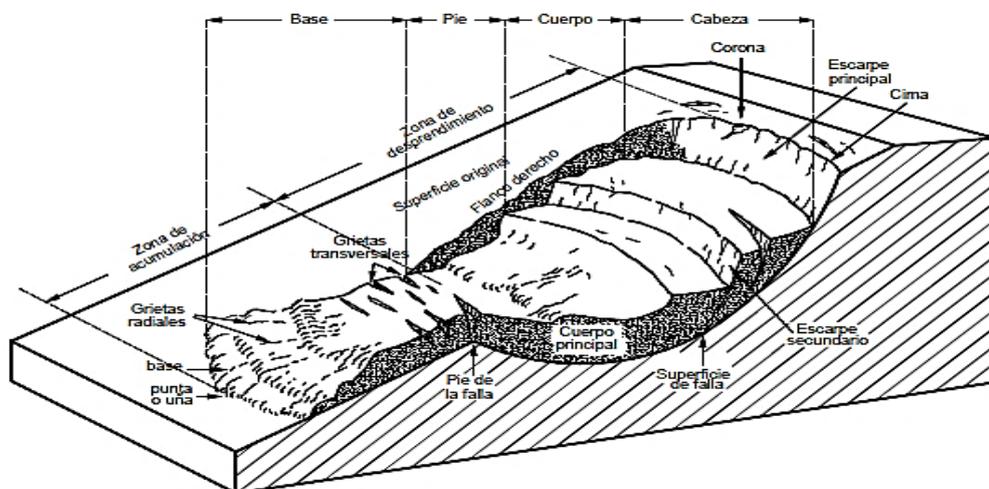


Figura 2: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

Según lo mencionado por el (Instituto Geológico y Minero de España, 1986) existe el deslizamiento rotacional el cual su superficie de falla es formado por una curva con centro de giro ubicado por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento, además existe el deslizamiento de traslación el cual la masa de suelo se desliza hacia afuera y abajo a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada y poseen poco movimiento de rotación o volteo.

2.2.1.2. Análisis de estabilidad de taludes

El (Instituto Geológico y Minero de España, 1986) comenta que el análisis de estabilidad de taludes implica comparar el esfuerzo cortante que actúa a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo.

- **Factor de Seguridad (F.S.)**

“El factor de seguridad viene a ser la relación entre las fuerzas que actúan sobre el talud y las fuerzas resistentes del suelo que la conforman.” (Suárez Díaz, 2000)

Según la Norma Peruana de Estabilización de suelos y taludes (CE.020, 2019), nos indica que el profesional responsable deberá evaluar la condición de estabilidad del talud para solicitaciones estáticas y sísmicas, en donde el factor de seguridad mínima del talud debe ser 1.5 (solicitaciones estáticas) y 1.25 (solicitaciones sísmicas).

Además la (CE.020, 2019) menciona que si los factores de seguridad no cumplen, se deberá seleccionar métodos o la combinación de estos para la estabilización, con el fin de alcanzar la aprobación de ambos factores de seguridad. Así mismo la solución de forma complementaria, pero necesaria, deberá prever protección adecuada de la superficie del talud contra la erosión.

- **Peligro sísmico**

Los sismos son fenómenos naturales causados por movimientos de las fallas geológicas en la corteza terrestre. Al moverse las fallas, se producen ondas de diferentes tipos y de gran poder, las cuales viajan a través de las rocas. (Suárez Díaz, 2000)

El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica. Además, contiene el listado de las provincias y distritos que corresponden a cada zona.



Figura 3: Zonas sísmicas, diseño sismorresistente.

Fuente: (E.030, 2018).

A cada zona se asigna un factor Z. Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad. (E.030, 2018).

Tabla 3: Factores de zona “Z”.

FACTORES DE ZONA Z	
ZONA	“Z”
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: (E.030, 2018), Diseño sismorresistente.

Tabla 4: Zonificación sísmica.

REGIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	ZONA SÍSMICA	ÁMBITO
PASCO	OXAPAMPA	Oxapampa	2	Todos los distritos
		Chontabamba		
		Huancabamba		
		Palcazú		
		Pozuzo		
		Puerto Bermúdez		
Villa Rica				

Fuente: (E.030, 2018), Diseño sismorresistente.

2.2.1.3. Método de análisis de equilibrio límite

Según lo mencionado por (Suárez Díaz, 2006), una parte de la práctica de la ingeniería geotécnica viene a ser la modelación y análisis de los taludes, el cual tiene como objetivo analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales, así como la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales.

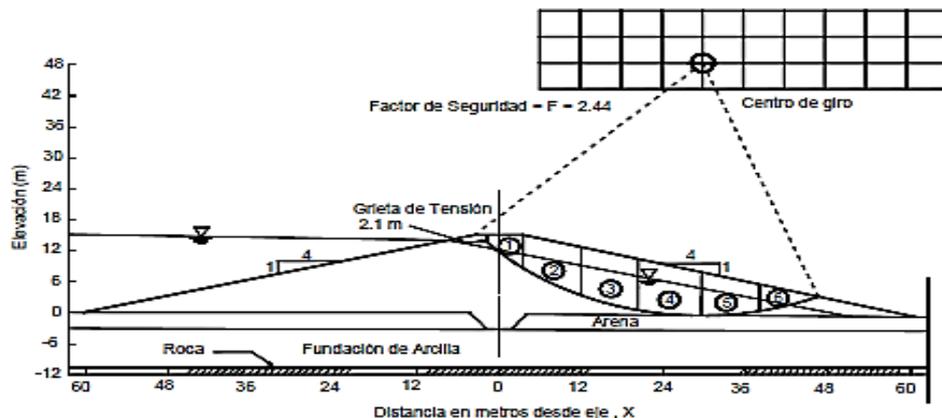


Figura 4: Ejemplo de un análisis de estabilidad del talud.

Fuente: (Suárez Díaz, 2006).

Como se mencionó anteriormente, los objetivos principales del análisis matemático de los taludes son:

- Evaluar y analizar las condiciones de estabilidad del talud (si es estable o inestable y el margen de estabilidad).
- Investigar los mecanismos potenciales de falla (analizar cómo ocurre la falla).
- Determinar la sensibilidad o susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos de activación (efecto de lluvias, sismos, etc.).
- Comparar la efectividad de las diversas opciones de remediación o estabilización y su efecto sobre la estabilidad del talud.
- Diseñar los taludes óptimos en términos de seguridad, confiabilidad y economía.

(Stead, y otros, 2000) explican que los métodos numéricos a diferencia de los métodos de equilibrio límite, son los que mejor aproximación al detalle

tienen de las condiciones de estabilidad. Sin embargo, los métodos de equilibrio límite son más sencillos de evaluar, además permiten analizar casos de falla traslacional y falla rotacional, así como fallas de inclinación (“Toppling”) y fallas en cuña.

“Para casos de sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos. Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones, existen herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos.” (Suárez Díaz, 2000)

En la tabla mostrada a continuación se presenta un resumen de las metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes.

Tabla 5: Resumen de metodologías utilizadas en análisis de estabilidad de taludes.

METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN DE TALUDES			
Método	Parámetros utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.
Esfuerzo-deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elasto-plásticas y de “creep”. Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de “creep”.	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada.
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas.

Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones.	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales.
Dinámica de flujos	Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

Como se explicó anteriormente, para (Suárez Díaz, 2006) el análisis de estabilidad consiste en evaluar si los esfuerzos de cortante que originan el deslizamiento del talud puede ser contrarrestado con la resistencia de los suelos. Entonces una de las características en común que tienen generalmente los métodos de equilibrio límite, es la comparación de las fuerzas o momentos resistentes con las actuantes sobre una determinada superficie de falla.

“Una de las principales diferencias de los diferentes métodos viene a ser la forma de cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla, así como también el tipo de este último.” (Suárez Díaz, 2006)

- Factor de Seguridad (F.S.)

Fellenius (1922) 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”*:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

La relación del F.S. en las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

- Superficie de Falla

La superficie de falla se refiere a la superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento del talud. El factor de seguridad en los

métodos de límite de equilibrio se asume que en la superficie de falla es igual para todos los puntos, por lo tanto, este valor es un promedio del valor total en toda la superficie. (Suárez Díaz, 2006)

Generalmente, se encuentra la superficie más probable en la que se producirá el deslizamiento que viene a ser la “superficie crítica de falla” el cual es la superficie de falla con el mínimo valor de factor de seguridad de diferentes superficies de falla. (Suárez Díaz, 2006)

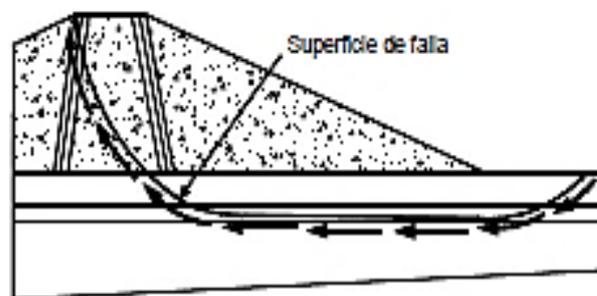


Figura 5: Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante.

Fuente: (Suárez Díaz, 2006).

- Formas de la superficie de falla

Según lo mencionado por (Suárez Díaz, 2006), las técnicas de límite de equilibrio serán utilizados cuando las fallas corresponden a los deslizamiento de traslación o de rotación sobre superficies de falla. Además, menciona que existen superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de estas, así como también modelos de superficies de falla con forma no geométrica.

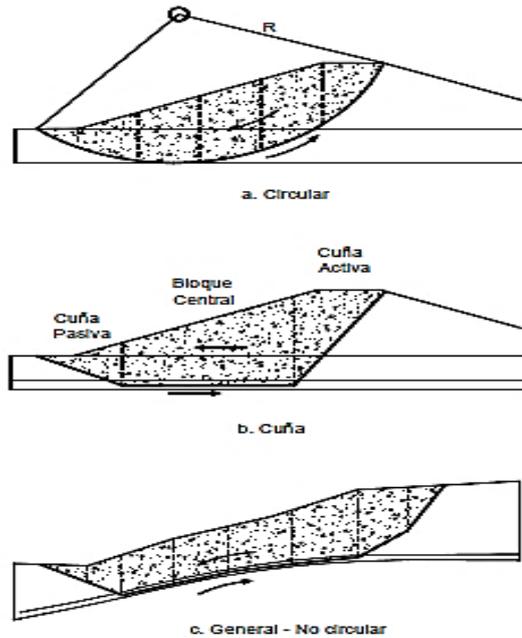


Figura 6: Formas de la superficie de falla.

Fuente: (Suárez Díaz, 2006)

“La presencia de grietas de tensión dificulta, en forma considerable, la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Estas son muy importantes en los cortes de taludes donde existe un alivio de presiones al ejecutarse la excavación.” (Suárez Díaz, 2006)

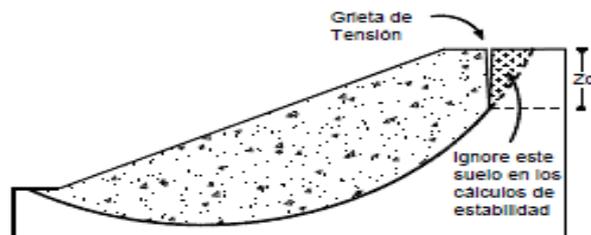


Figura 7: Esquema de grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio.

Fuente: (Suárez Díaz, 2006)

2.2.1.4. Parámetros utilizados en los análisis de límite de equilibrio

“Los factores primarios que afectan la estabilidad que se tienen que tener en cuenta en los modelos son la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo

de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, etc.”.
(Suárez Díaz, 2006)

Sin embargo, no todos estos factores mencionados se pueden cuantificar para ser incluidos en un modelo matemático. Por lo que existen situaciones en donde un enfoque de límite de equilibrio no produce resultados que uno espera. (Suárez Díaz, 2006)

- **Pesos unitarios**

Según (Suárez Díaz, 2006), el peso unitario del suelo es el parámetro que menos influye en el factor de seguridad de un análisis de estabilidad de taludes, sin mencionar que su obtención no es complicada. Así mismo, los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático y saturados por debajo de éste nivel.

(Cornforth, 2005), recuerda que no se debe tener en cuenta la presencia de nivel freático para casos que se utilicen pesos sumergidos.

- **Resistencia al cortante**

Los parámetros de resistencia al corte pueden ser obtenidas por métodos de laboratorio o de campo, teniendo en cuenta si se trata de condiciones drenadas o no drenadas o si el análisis se hará en estado no saturado. Estos parámetros corresponderán a los grados de esfuerzos sobre las superficies potenciales de falla. (Suárez Díaz, 2006)

“Se recomienda utilizar las resistencias residuales en los casos donde ya ha ocurrido la falla del talud.”. (Skempton, 1970, 1977,1985).

Según (Suárez Díaz, 2006) se debe tener en cuenta el tiempo, debido a la disminución de resistencia. Así mismo menciona que para suelos completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas tiene un valor de cero.

- **Condiciones drenadas o no drenadas**

La falla del talud puede suceder en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es originada por cambios de carga, así como extracción de material del pie del talud o aumento de carga en la cabeza del talud (en suelos de baja permeabilidad), estos no tendrán tiempo para drenar durante el lapso de tiempo donde ocurre el cambio de carga. En este caso, se dice que la condición es no drenada. (Suárez Díaz, 2006)

- **Esfuerzos totales y efectivos**

Los análisis de estabilidad de taludes pueden realizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos; ya que siempre es posible analizar la estabilidad de un talud empleando el método de presión efectiva, debido a que la resistencia del suelo es representada por las presiones efectivas tanto en condiciones drenadas como no drenadas. Sin embargo, en la práctica es virtualmente imposible obtener los excesos de presión de poros que se van a generar por los cambios de cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). (Cornforth, 2005).

- **Estabilidad a corto y a largo plazo**

“En la estabilidad a corto plazo se debe tener en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido, están sujetos a presiones de poros por acción de las cargas aplicadas, en cambio en la estabilidad a largo plazo, se supone que los suelos están drenados”. (Cornforth, 2005).

Para la estabilidad a corto plazo de las arcillas normalmente consolidadas y de limos, se recomienda modelar con análisis de esfuerzos totales, aunque se puede realizar el análisis utilizando esfuerzos efectivos, es difícil medir las presiones de poros para su utilización en el análisis. (Cornforth, 2005).

2.2.1.5. Limitaciones de los métodos de límite de equilibrio

Los análisis de límite de equilibrio tienen algunas limitaciones entre las cuales se encuentran las siguientes:

- **Se basan solamente en la estática.** “Como los métodos de límite de equilibrio se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.” (Cornforth, 2005).
- **Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos.** “Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura.” (Cornforth, 2005).
- **Utilizan modelos de falla muy sencillos.** “El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de límite de equilibrio es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud.” (Cornforth, 2005).
- **Generalmente se asume el material como isotrópico.** “La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas.” (Cornforth, 2005).
- **Presiones de poros.** “Las condiciones de presión de poros son generalmente obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos: Superficie freática, Datos piezométricos, Relación de presión de poros, Superficie piezométrica, Presión de poros constante.” (Cornforth, 2005).

A pesar de las debilidades de un modelo específico, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones. “Los métodos de límite de equilibrio son una herramienta muy útil en la práctica y se recomienda tener cuidado de no abusar en la aplicación del método para casos complejos donde la distribución de esfuerzos y las deformaciones juegan un papel importante en el comportamiento del talud”. (Krahn, 2004).

2.2.1.6. Métodos de análisis de límite de equilibrio

Los métodos de análisis de límite de equilibrio realizan el estudio en su totalidad de la superficie de falla. (Martínez, 2010)

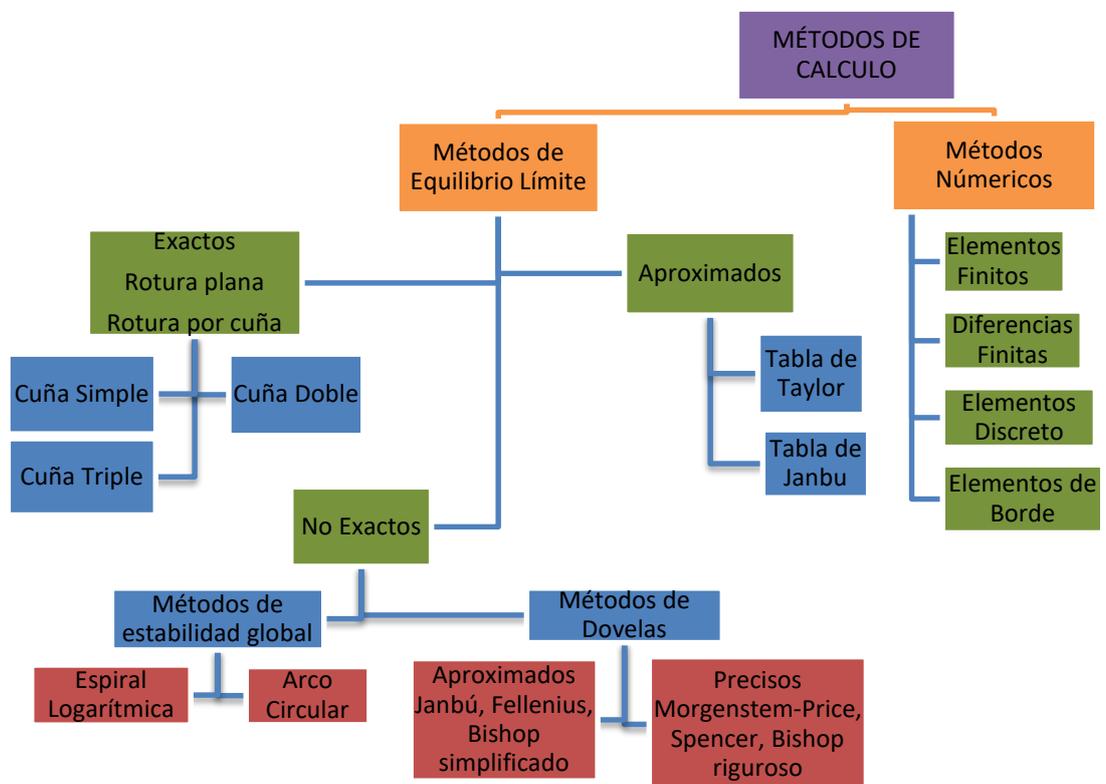


Figura 8: Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

En la siguiente tabla se muestran algunos de los métodos más utilizados.

Tabla 6: Resumen de Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES			
Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

a. Tablas para análisis rápidos

Para los taludes simples homogéneos, se han desarrollado tablas que permiten un cálculo rápido del factor de seguridad. Existe una gran cantidad de tablas desarrolladas por diferentes autores. (Suárez Díaz, 2006).

La primera de estas fue desarrollada por Taylor en 1966. Desde entonces, han sido presentadas varias tablas sucesivamente cuyo resumen se muestra a continuación.

Tabla 7: Lista de tablas para el cálculo de la estabilidad de taludes.

TABLAS PARA EL CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES				
Autor	Parámetros	Inclinación del Talud	Método Analítico Utilizado	Observaciones
Taylor (1966)	cu,	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado.
	c, ϕ	0-90°	Círculo de fricción	Taludes secos solamente.
Bishop y Morgenstern (1960)	c, ϕ , ru	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern	cu	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y cu aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	c, ϕ , ru	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	cu	0-90°	$\phi = 0$	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
	c, ϕ , ru		Janbú GPS	
Hunter y Schuster (1968)	cu	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y cu, aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	c, ϕ	20-90°	Análisis límite	
O'Connor y Mitchell (1977)	c, ϕ , ru	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	c, ϕ	0-90°	Círculo de fricción	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
	c, ϕ	0-90°	Cuña	
Cousins (1978)	c, ϕ	0-45°	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1966).
Charles y Soares (1984)	ϕ	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	c, ϕ , ru	11-63°	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

b. Análisis de bloques o cuñas

El análisis de estabilidad de los taludes puede realizarse suponiendo superficies de falla rectas predeterminadas. Pueden analizarse superficies compuestas por una sola línea o por varias líneas, formando cuñas simples, dobles o triples. Este tipo de análisis es apropiado cuando hay una superficie potencial de falla relativamente recta a lo largo de un material relativamente duro o relativamente blando; por ejemplo, los mantos aluviales débiles. Uno de estos métodos es conocido como "método del bloque deslizante". (Suárez Díaz, 2006).

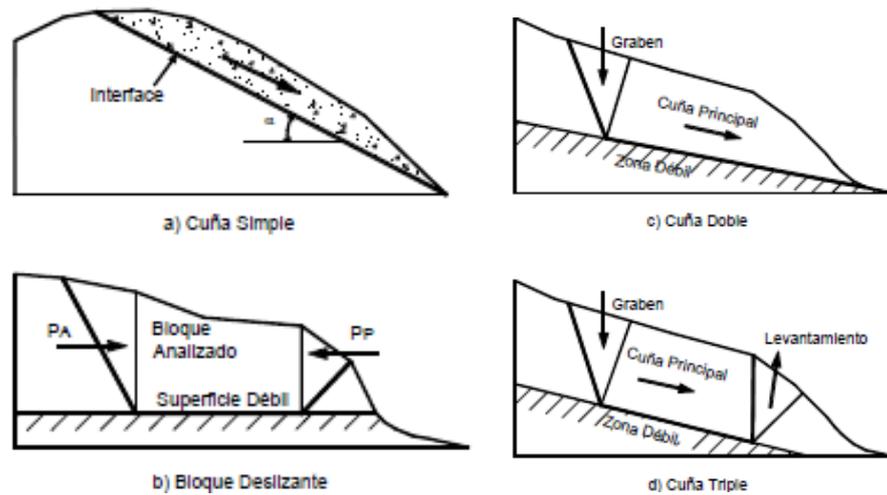


Figura 9: Tipos de bloques o cuñas para análisis de estabilidad de los taludes.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“En el análisis de cuñas dobles o triples, se requiere determinar la localización del bloque central crítico, las inclinaciones críticas de las cuñas activa y pasiva, y los factores de seguridad mínimos o críticos.” (Suárez Díaz, 2006).

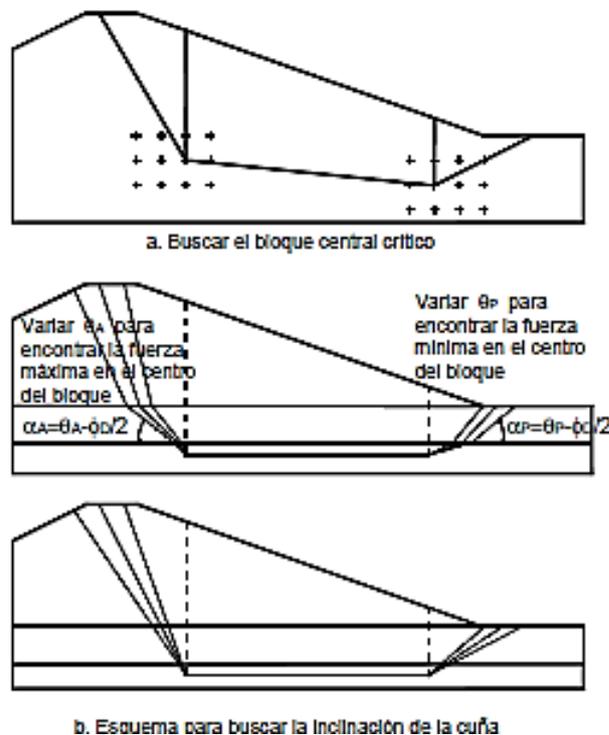


Figura 10: Suposiciones de localización de cuñas para calcular factores de seguridad.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

- Método del bloque deslizante

“El análisis del bloque deslizante se puede utilizar cuando a una determinada profundidad existe una superficie de debilidad relativamente recta y delgada (sub horizontal). La masa que se mueve puede dividirse en dos o más bloques y el equilibrio de cada bloque se considera independiente, al utilizar las fuerzas entre bloques.” (Suárez Díaz, 2006). No se considera la deformación de los bloques, que es útil, cuando existe un manto débil o cuando aparece un manto muy duro sobre el cual se puede presentar el deslizamiento. En el caso de tres bloques, a la cuña superior se le llama “cuña activa” y las otras dos, “cuña central” y “pasiva”, respectivamente. (Suárez Díaz, 2006).

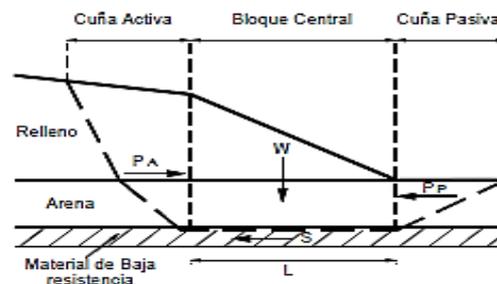


Figura 11: Esquema del método del bloque deslizante.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

c. Método de la espiral logarítmica

En el procedimiento de la espiral logarítmica, la superficie de falla se supone que tiene una forma de espiral. Inicialmente, suponemos un punto de centro y un radio r_0 para definir la espiral. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación θ , alrededor del centro de la espiral, de acuerdo con la expresión:

$$r = r_0 \cdot e^{\theta \cdot \tan(\phi_d)}$$

Donde:

ϕ_d = es el ángulo de fricción desarrollado el cual, depende del ángulo de fricción del suelo y del factor de seguridad.

Los esfuerzos al cortante se pueden expresar en esfuerzos totales de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \phi}{F}$$

o en términos de las resistencias desarrolladas.

$$\tau = Cd + \sigma \cdot \tan(\phi d)$$

Las ecuaciones de la espiral logarítmica son relativamente complejas para los cálculos manuales, debido a la forma de la superficie de falla.

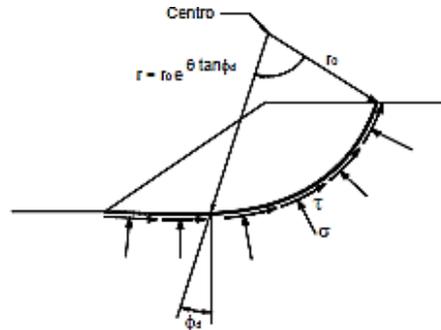


Figura 12: Talud y superficie de falla espiral logarítmica.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

d. Métodos de círculos de falla

“Las fallas observadas en los materiales relativamente homogéneos, ocurren a lo largo de las superficies curvas. Por facilidad de cálculo, las superficies curvas se asimilan a círculos y la mayoría de los análisis de estabilidad de taludes se realizan suponiendo fallas circulares.” (Suárez Díaz, 2006).

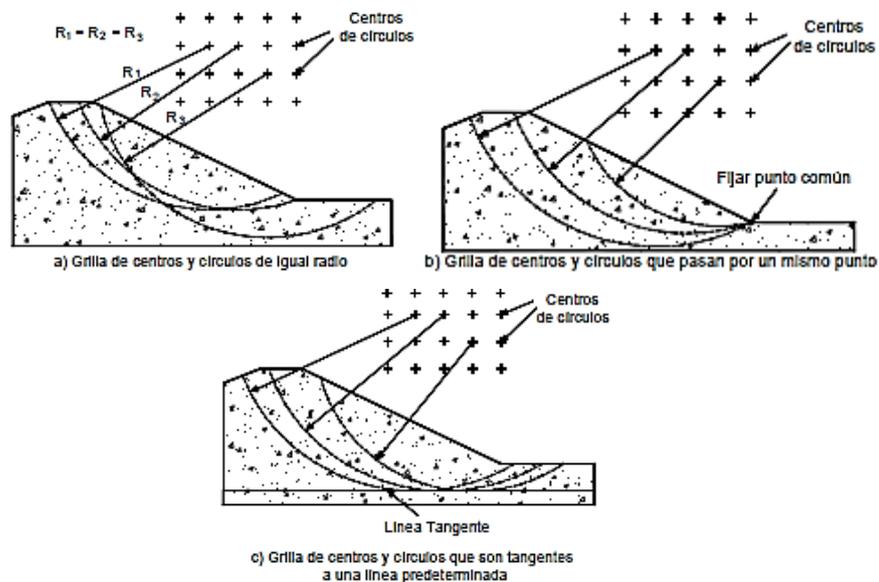


Figura 13: Alternativas de procedimiento de localización de los círculos de falla para el análisis de estabilidad de taludes.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“Los factores de seguridad para todos y cada uno de los círculos se calculan por medio de uno o varios de los métodos existentes y el factor de seguridad del talud es el mínimo $F. S.$ obtenido de todos los círculos analizados.” (Suárez Díaz, 2006).

- **Método del Arco Circular**

El método del arco circular se le utiliza sólo para los suelos cohesivos ($\phi=0$). El método fue propuesto por Petterson en 1916 (Petterson, 1955) pero solo fue formalizado por Fellenius en 1922.

En la práctica, el método es un caso de la espiral logarítmica en el cual la espiral se convierte en círculo. No obstante, los análisis son mucho más sencillos para el caso del arco circular y, por otra parte, el desarrollo de este método fue anterior al de la espiral logarítmica.

En el método del arco circular se supone un círculo de falla y se analizan los momentos con relación al centro del círculo. (Suárez Díaz, 2006).

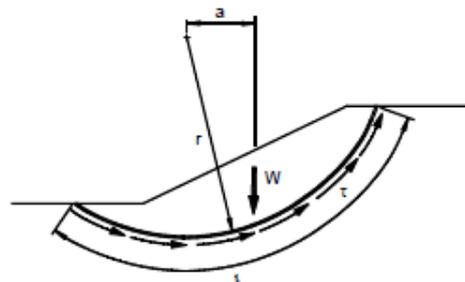


Figura 14: Fuerzas en un análisis de arco circular ($\phi=0$).

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

- **Métodos de Dovelas**

En la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de tajadas verticales. El número de tajadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de tajadas, se supone que los resultados serán más precisos. En los procedimientos de análisis con tajadas, generalmente se considera el equilibrio de momentos con relación al centro del círculo para todas y cada una de las tajadas. (Suárez Díaz, 2006).

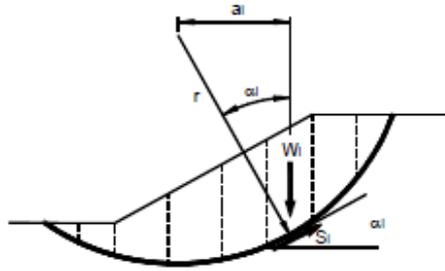


Figura 15: Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

Entre los diversos métodos que utilizan dovelas, hay diferencias, especialmente en lo referente a las fuerzas que actúan sobre las paredes laterales de las tajadas. El método ordinario o de Fellenius, no tiene en cuenta las fuerzas entre tajadas. (Suárez Díaz, 2006).

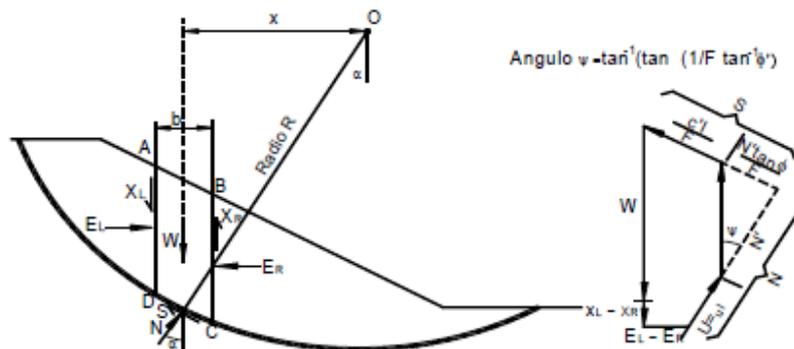


Figura 16: Fuerzas que actúan sobre una dovela en un análisis de estabilidad del arco circular con dovelas.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

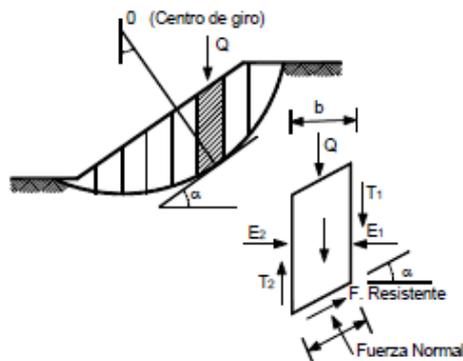


Figura 17: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

- Método Ordinario o de Fellenius

El método de Fellenius es conocido también como método Ordinario, método sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo (producidos por estas fuerzas) se obtiene el Factor de Seguridad. (Suárez Díaz, 2006).

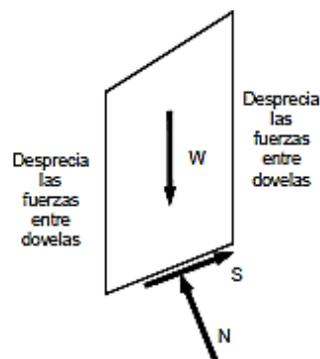


Figura 18: Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método ordinario o de Fellenius.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“El método ordinario o de Fellenius solamente satisface los equilibrios de momentos y no satisface el equilibrio de fuerzas. Para el caso de $\phi = 0$, el método ordinario da el mismo valor del factor de seguridad que el método del arco circular.” (Suárez Díaz, 2006).

“Los análisis del método de Fellenius son muy sencillos y se pueden realizar con métodos manuales o en el computador. Debe tenerse en cuenta que el método ordinario es menos preciso que otros procedimientos y la precisión disminuye a medida que la presión de poros se hace mayor.” (Suárez Díaz, 2006).

“Algunos autores recomiendan que el método ordinario no se utilice para diseño, sino solamente como una base de referencia. Generalmente, el método ordinario da factores de seguridad menores que otros métodos.” (Suárez Díaz, 2006).

- Método de Bishop Simplificado

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales; es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

Una idea de Abramson, et al. leída en la tesis doctoral de Krishna (2006): “El método simplificado de Bishop (BSM) es muy común en la práctica para la superficie de corte circular. Este método considera las fuerzas normales intersticiales, pero descuida las fuerzas de corte intersticial”.

Según Krishna (2006), además, satisface el equilibrio de las fuerzas verticales para determinar la fuerza normal de base efectiva (N'), que viene dada por:

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum (W - \frac{c'l \sin \alpha}{F} - ul \cos \alpha)$$

Donde:

$$m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F} \right)$$

Dado que el BSM también supone una superficie de falla circular, se utiliza la ecuación mostrada para determinar el F.S. Sin embargo, el cálculo requiere un procedimiento iterativo debido a la relación no lineal.

$$F_m = \frac{\sum (c'l + N' \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha}$$

En resumen, BMS

- Satisface el equilibrio de momentos para el F.S.
- Satisface el equilibrio de fuerzas verticales para N.
- Considera la fuerza normal intersticial.
- Es el más común en la práctica.
- Se aplica principalmente para superficies de corte circular.

Las fuerzas consideradas se muestran en la figura a continuación:

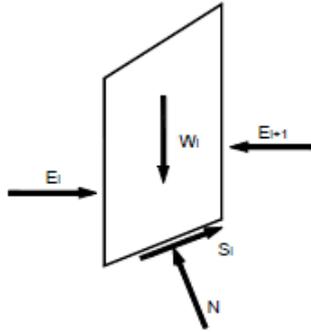


Figura 19: Esquema de fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop simplificado.

Fuente: Análisis Geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método.”

“El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.” (Suárez Díaz, 2006).

“Aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop Simplificado, las diferencias de los factores de seguridad calculados, no son grandes. La principal restricción del método de Bishop simplificado, es que solamente considera las superficies circulares.” (Suárez Díaz, 2006).

- Método de Janbú

“El método simplificado de Janbú se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante.” (Suárez Díaz, 2006).

Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f_0 . El factor f_0 depende de la curvatura de la superficie de falla. Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos.

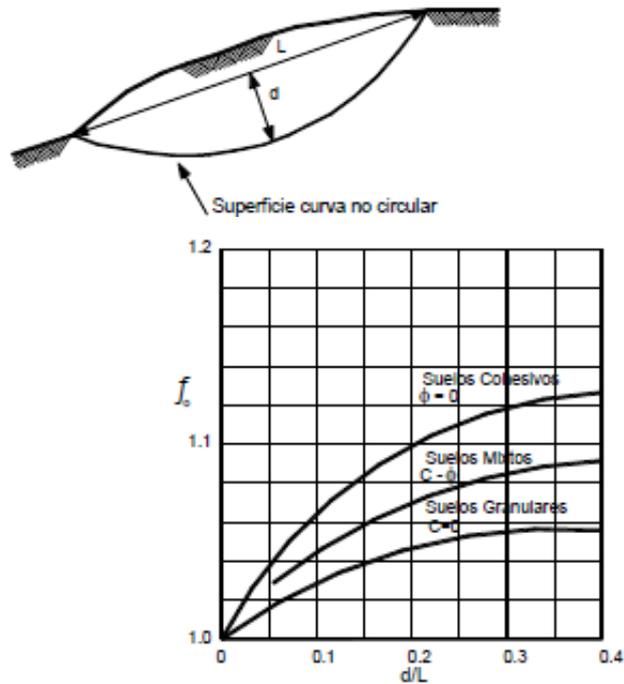


Figura 20: Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

En algunos casos, la suposición de f_0 puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Sin embargo, para algunos taludes la consideración de este factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis.

“El método de Janbú solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos.” (Suárez Díaz, 2006).

- Método de Spencer

“El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.” (Suárez Díaz, 2006).

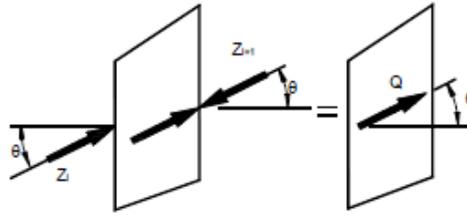


Figura 21: Paralelismo de las fuerzas entre dovelas en el método de Spencer.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares. (Suárez Díaz, 2006).

Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ .

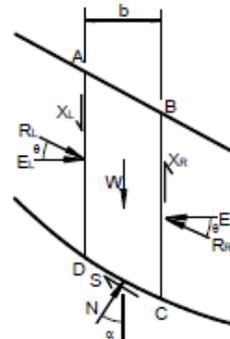


Figura 22: Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“Para resolver las ecuaciones F y θ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error.” (Duncan y Wright, 2005).

Una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Duncan y Wright, 2005).

- Método de Morgenstern y Price

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. El método al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo. (Duncan y Wright, 2005).

2.2.1.7. Comparación de los diversos métodos

La cantidad de métodos que se utilizan, dan resultados diferentes y en ocasiones, contradictorios los cuales son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos de todo el mundo, son el Simplificado de Bishop y los métodos precisos de Morgenstern y Price y Spencer. Cada método da valores diferentes en el factor de seguridad.

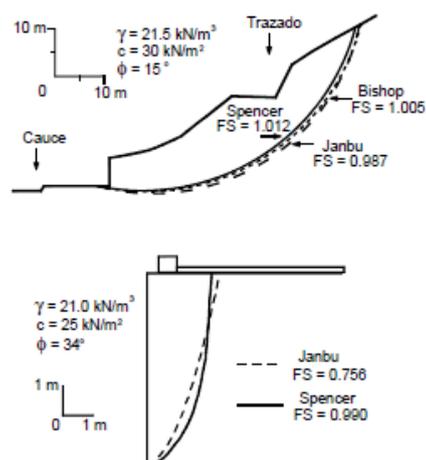


Figura 23: Diferencias entre los resultados de varios métodos. En cuál de los casos es fundamental saber cuál de los métodos es el que da el verdadero valor del Factor de Seguridad.

Fuente: Análisis geotécnico, (Suárez Díaz, 2006).

“Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, los factores de seguridad determinados por el método de Bishop difieren aproximadamente un 5% con respecto a soluciones más precisas. Mientras el método simplificado de Janbú generalmente subestima el factor de seguridad hasta valores del 30 y en algunos casos los sobreestima hasta valores del 5%.” Esta aseveración fue documentada por (Fredlund y Krahn, 1977).

Tabla 8: Comparación de los resultados del cálculo de factor de seguridad para varios métodos.

Talud	Factor de Seguridad Calculado				
	Bishop	Spencer	Janbú	Morgenstern-Price	Ordinario
Talud 2H:1V	2.08	2.07	2.04	2.08	1.93
Talud sobre una capa de suelo débil	1.38	1.37	1.45	1.38	1.29
Talud con una línea piezométrica	1.83	1.83	1.83	1.83	1.69
Talud con dos líneas piezométricas	1.25	1.25	1.33	1.25	1.17

Fuente: Fredlund y Krahn (1977).

Por las razones anteriormente expuestas, se prefieren los métodos más sencillos y fáciles de manejar como es el método simplificado de Bishop. Todos los métodos que satisfacen el equilibrio completo, dan valores similares del factor de seguridad (Fredlund y Krahn, 1977, Duncan y Wright, 1980). No existe un método de equilibrio completo que sea significativamente más preciso que otro. El método de Spencer es más simple que el de Morgenstern y Price o el de Chen y Morgenster. Los métodos de Morgenstern son más flexibles para tener en cuenta diversas situaciones de fuerzas entre dovelas; no obstante, se debe tener en cuenta que la dirección de las fuerzas entre partículas en estos métodos, no afecta en forma importante el resultado del factor de seguridad. El método de Sarma, tiene ciertas ventajas en relación con los demás métodos, para el análisis sísmico.

Alva Hurtado (1994) presenta las siguientes conclusiones al comparar los diversos métodos.

- Cualquier método que satisface el Equilibrio de Momentos, da el mismo factor de seguridad en el análisis de $\phi = 0$ con superficies de falla circular.
- El Método Ordinario de Dovelas (Fellenius), da error en el lado conservador para el caso de $\phi > 0$. Con presiones de poros pequeñas, para los análisis en función de esfuerzos totales y de esfuerzos

efectivos, el error es menor del 10%. Para pendientes casi planas con presiones de poros altas, el error puede ser mayor del 50%.

- Para el análisis de $\varphi = 0$ ó $\varphi > 0$ con presiones de poros bajas o altas, el método Simplificado de Bishop es adecuado y estable para el análisis de falla circular.
- Numéricamente, sólo hay problemas de convergencia cuando los extremos de la superficie de falla son muy parados, casi verticales.
- En los métodos que satisfacen solamente el equilibrio de fuerzas, el factor de seguridad es muy sensible a la inclinación asumida por las fuerzas laterales. El método de Lowe y Karafiath es razonable para el análisis de $\varphi > 0$ pero no conservador (10-15%) para $\varphi = 0$.
- Si todas las condiciones de equilibrio son satisfechas, la magnitud del error en el factor de seguridad es muy pequeña, usualmente $\pm 5\%$ de la respuesta correcta.

Tabla 9: Diferencias básicas entre diversos métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Procedimiento	Condición de Equilibrio Satisfecha				Ecuaciones e Incógnitas	Forma de la superficie de falla	Aplicable A	
	Mom. total	Mom. Dovela	Vert	Horiz			Cálculos Manuales	Cálculos en Computador
Método ordinario de dovelas	si	no	no	no	1	circular	si	si
Método de Bishop Modificado	si	no	no	no	n+1	circular	si	si
Método de Janbú Procedimiento generalizado de dovelas.	si	si	si	si	3n	cualquiera	si	si
Métodos de Spencer y Morgenstern y Price.	si	si	si	si	3n	cualquiera	no	si
Método de Lowe y Karafiath	no	no	si	si	2n	cualquiera	si	si
Método de Espiral Logarítmica	si	-	si	si	3	espiral logarítmica	si	si

Fuente: Alva Hurtado (1994).

2.2.2. Técnicas de bioingeniería para estabilización de taludes

(Suárez Díaz, 2006), menciona que la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión y fallas sub superficiales. Ya que los árboles y arbustos de raíz profunda aportan una resistencia cohesiva significativa a los mantos de suelo más superficiales y además facilitan el drenaje subterráneo, reduciendo así la probabilidad de deslizamientos poco profundos; pero su efecto no es el mismo en deslizamientos profundos.

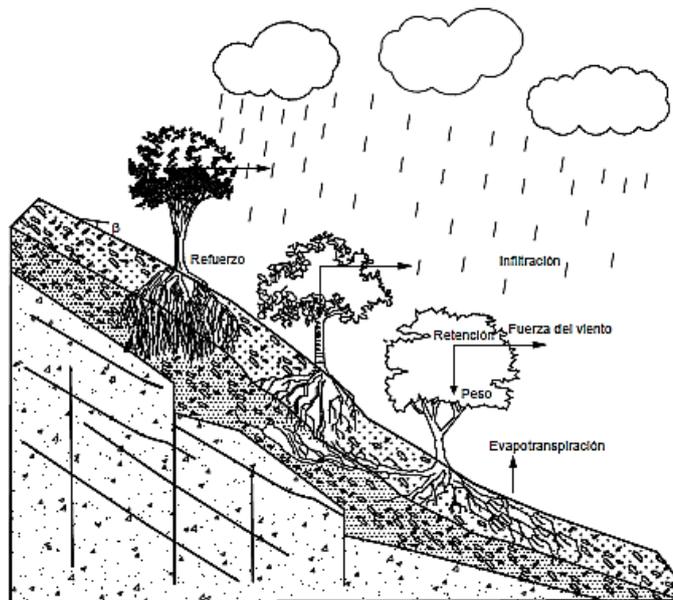


Figura 24: Estabilización de taludes utilizando vegetación.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

La vegetación es multifuncional, relativamente económica, se auto repara, es visualmente atractiva y no requiere generalmente, de equipos pesados o complejos para su instalación. Sin embargo, hay ciertas limitaciones como la susceptibilidad a las quemaduras y sequías, la dificultad de establecimiento en taludes de alta pendiente y la imposibilidad de resistir fuerzas de socavación o acción del oleaje, así como su lentitud de germinación y crecimiento (Abramson, 1996).

Aunque la utilización de obras de bioingeniería es muy popular, no siempre son efectivas para resolver los problemas de erosión. Las fallas de estructuras de bioingeniería generalmente no han tenido la publicidad que han tenido los éxitos y existe la tendencia a sobre estimar la capacidad de la vegetación.

- **Bioingeniería**

“La bioingeniería comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y control de la erosión, así como es única en el sentido de que las partes de la planta por sí mismas o sea las raíces y el follaje funcionan como los elementos estructurales mecánicos para la protección del talud”. (Gray y Sotir, 1996).

En el talud se colocan elementos vivos de tal forma que actúan como refuerzo, drenaje o barreras para los sedimentos. Además, en el análisis de la bioingeniería se tendrá en cuenta no solamente el estudio de la planta sino las condiciones de los taludes, así como la mecánica de la erosión. (Gray y Sotir, 1996).

Con respecto a la ingeniería biotécnica o biotecnología (Gray y Sotir, 1996) se refieren a las técnicas donde la vegetación y estructuras inertes (gaviones, muros, etc.) son combinadas, con lo cual los elementos biológicos y mecánicas trabajan de forma integrada y complementaria.

2.2.2.1. Efectos de la vegetación sobre el talud

Según (Suárez Díaz, 2000) los factores importantes para ser analizados son “volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces”.

El tipo de vegetación en el talud es un parámetro importante para su estabilidad, ya que cumple funciones importantes como determinar el agua en la superficie, además da consistencia debido al entramado mecánico de sus raíces. (Suárez Díaz, 2000)

Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

(Suárez Díaz, 2000), menciona a los factores más importantes de la vegetación sobre el talud las cuales son *“Intercepta la lluvia, aumenta la capacidad de infiltración, extrae la humedad del suelo, grietas por desecación, raíces refuerzan el suelo aumentando resistencia al cortante, anclan el suelo*

superficial a mantos más profundos, aumentan el peso sobre el talud, transmiten al suelo fuerza del viento, retienen las partículas del suelo disminuyendo susceptibilidad a la erosión.”

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces
- Se facilita la infiltración masiva de agua

2.2.2.2. Efectos hidrológicos de la vegetación

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de un talud de varias formas:

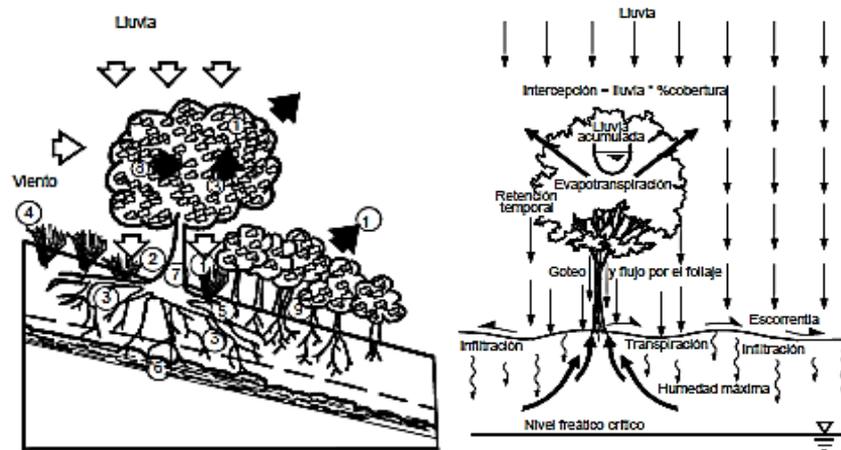


Figura 25: Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico sub-superficial.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

- Interceptación de la Lluvia

De acuerdo con Styczen y Morgan-1996, la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación.

$$\text{Lluvia interceptada} = \text{lluvia} \times \% \text{ área follaje.}$$

Según Gregory y Walling (1973), dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual.

“Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada, y parte alcanza finalmente la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.” (Suárez Díaz, 2000)

- **Retención de Agua**

“La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía disminuyendo su poder erosivo, pero puede aumentar la rata de infiltración. La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje demoran más el ciclo hidrológico, en razón a que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia.” (Suárez Díaz, 2000)

En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características de la vegetación.

Rice y Krames (1970) sugirieron que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos. En los climas para los cuales la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos.

- **Acumulación de Agua**

“Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Algunas especies vegetales como el maíz poseen espacios importantes para almacenamiento de agua. Existe experiencia con especies vegetales, la cual permite determinar el volumen total de agua acumulada, teniendo en cuenta la densidad de área total y el volumen del follaje.” (Suárez Díaz, 2000)

- **Goteo o Flujo por el Follaje**

“El agua retenida no acumulada retorna a la tierra por goteo o flujo por el follaje. La rapidez de flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas y tronco, y los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical.” (Suárez Díaz, 2000)

- Evapotranspiración

“La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente una humedad de equilibrio, dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.” (Suárez Díaz, 2000)

Greenway (1987) reporta que la capacidad de una planta para consumir humedad del suelo depende del tipo y tamaño de la especie, clima, factores ambientales y características del suelo.

Schiechl (1980) estima capacidades de evapotranspiración hasta de un metro cúbico por metro cuadrado por año, en bosques primarios en Europa. Greenway (1987) reporta evapotranspiraciones de más de 100 milímetros por mes en Hong Kong. En climas tropicales, los volúmenes de evapotranspiración son generalmente mayores que en zonas con estaciones. La evapotranspiración puede medirse utilizando la relación entre la evapotranspiración de la superficie cubierta por plantas y la de un cuerpo de agua expuesto (E_t/E_o). Los valores de E_t/E_o dependen de las condiciones ambientales y de la variedad de planta, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 10: Valores de E_t/E_o para diversas coberturas vegetales.

Especie Vegetal	Relación E_t/E_o
Eucalipto	1.5
Arroz	1.35
Palma de aceite	1.2
Cacao	1.0
Bosques	0.9
Ficus	0.9
Pastos	0.8
Papa	0.7
Caña de azúcar	0.73
Banano o plátano	0.70
Maíz	0.67
Algodón	0.63
Café	0.5

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

Estos valores corresponden al potencial de evapotranspiración en el momento en que la humedad del suelo es alta. A medida que disminuye la humedad del suelo, la evapotranspiración disminuye.

“La evapotranspiración profundiza los niveles de aguas freáticas y al mismo tiempo puede producir asentamientos de suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación. El área de influencia depende de la extensión y profundidad del sistema radicular.” (Suárez Díaz, 2000)

Durante un día soleado un eucalipto puede extraer del suelo hasta 500 litros de agua y el pasto hasta un litro por metro cuadrado (Williams y Pidgeon - 1983). Los árboles espaciados cercanamente y las hierbas extraen más agua que los pastos.

La clave, desde el punto de vista de ingeniería, es determinar la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud específico, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación. El balance de la infiltración y la evapotranspiración produce una determinada humedad, la cual debe compararse con la humedad requerida para saturación.

Debe tenerse en cuenta que, en un suelo, al saturarse, se disminuyen las fuerzas de succión o presiones negativas de agua de poros, las cuales ayudan a la estabilidad. En ocasiones, la vegetación produce un efecto de mantener la humedad por debajo del límite de saturación, mejorando la estabilidad de las laderas.

- **Funciones específicas de las plantas**

Las diferentes partes de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de vista de manejo geotécnico.

Tabla 11: Componentes de la planta y sus funciones.

Parte de la Planta	Función
Raíz	Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos.
Tallo	Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos.
Hojas	Fotosíntesis, transpiración.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

“Las raíces cumplen una función muy importante de absorción. Grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas junto con minerales y productos que la planta requiere para su alimentación”. (Suárez Díaz, 2000)

“Igualmente, las raíces interactúan con el suelo y lo refuerzan. El tronco soporta los órganos fotosintéticos y reproductivos, especialmente las hojas. La estructura de la hoja muestra dos partes: superior e inferior, que cumple un objetivo muy importante para la vida de la planta.” (Suárez Díaz, 2000)

2.2.2.3. Efectos hidráulicos

“La velocidad de la escorrentía depende en buena parte de la rugosidad del terreno y la vegetación aumenta considerablemente esta rugosidad como se indicó. El coeficiente de Manning puede variar de 0.005 para vegetación baja hasta 0.1 para vegetación alta. Al aumentar la rugosidad disminuyen las velocidades y en esa forma disminuye la erosión. La rugosidad depende además de la morfología de la planta y de la densidad del follaje junto a la superficie del terreno. Se pueden presentar grandes reducciones de velocidad de flujo utilizando una cobertura densa y espacialmente uniforme.” (Suárez Díaz, 2000)

Tabla 12: Valores del coeficiente de Manning n para diferentes tipos de vegetación (Temple, 1982).

Tipo de Vegetación (mm)	Índice de retardanza CI	n de Manning
Pasto muy alto (h > 600)	10.0	0.06 a 0.20
Pasto alto (h de 250 a 600)	7.6	0.04 a 0.15
Pasto medio (de 150 a 200)	5.6	0.03 a 0.08
Pasto corto (de 50 a 150)	4.4	0.03 a 0.06
Pasto muy corto (h < 50)	2.9	0.02 a 0.04

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

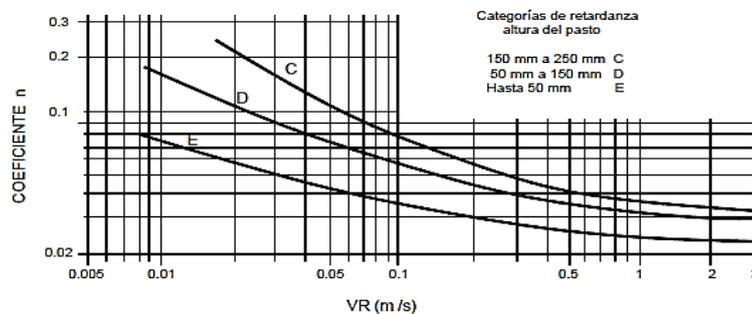


Figura 26: Efecto de la altura del pasto y de la velocidad sobre la rugosidad n (Hewlett y otros, 1987).

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

La vegetación a su vez puede ser afectada por el agua. Los pastos altos pueden inclinarse, y a grandes velocidades puede producirse el arrancamiento de las plantas por acción de las fuerzas hidráulicas.

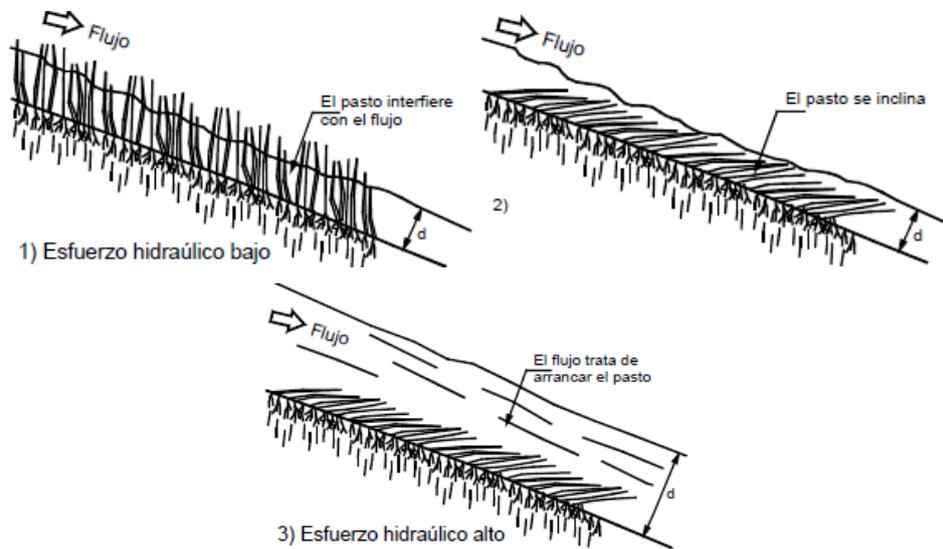


Figura 27: Efectos de los esfuerzos del flujo de agua sobre una cobertura de pastos.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

“La vegetación actúa como filtro del flujo de agua, facilitando la sedimentación de las partículas de suelo transportadas por el flujo. Entre mayor sea la densidad de la vegetación se pueden capturar mayor cantidad de sedimentos. Los efectos de sedimentación son muy eficientes para vegetación de altura mediana y gran densidad en las corrientes pequeñas de agua. El diseño del sistema de vegetación junto a un lago o río debe tener en cuenta este efecto.” (Suárez Díaz, 2000)

2.2.2.4. Efectos de refuerzo de las raíces

Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades.

1. Las raíces y el follaje aíslan el suelo de las fuerzas de tracción directa ocasionadas por el flujo del agua de escorrentía.
2. Las raíces refuerzan el suelo aumentando la resistencia al corte (Fricción y Cohesión) y la resistencia a las fuerzas de erosión.
3. Las raíces (de árboles) anclan el suelo o estratos más profundos, creando fuerzas resistentes al deslizamiento.

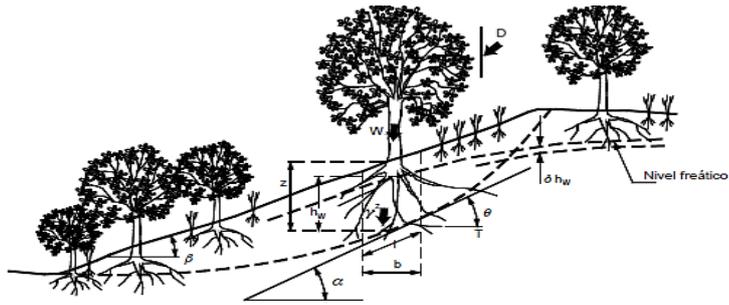


Figura 28: Efecto estabilizante de las raíces contra deslizamientos de tierra.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

4. Entre el sistema de raíces de cada árbol y los contiguos se forman efectos de arco que ayudan en la estabilidad de la masa de suelo.

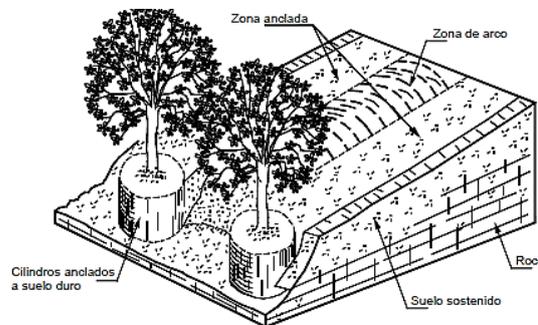


Figura 29: Efecto de arco de las raíces de los árboles.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

5. Las raíces forman una red densa entretrejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.

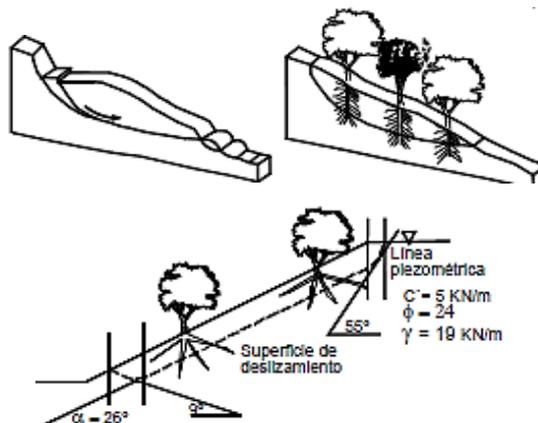


Figura 30: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entrelazada en los primeros 30 a 50 cms de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Unir los grupos de partículas impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos.

Ensayos realizados por Campos (1991), demuestran que las raíces aumentan la cohesión de muestras de suelo en gran proporción.

“Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.” Campos (1991)

El sistema radicular de un árbol, en forma conjunta con otros árboles puede formar efectos de arco, similares a los de las pilas o pilotes. Campos (1991)

“Debido a que las redes de raíces se extienden hacia afuera y adentro desde el árbol, es muy importante determinar la influencia del tipo de especie, tamaño, espaciamiento, etc. Para tener información de la distribución espacial de la resistencia aportada por las raíces.” Campos (1991)

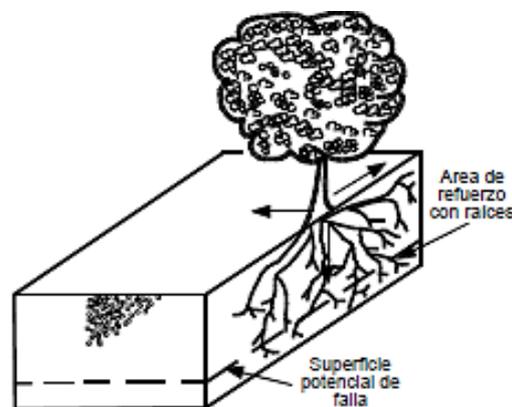


Figura 31: Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

- **Clasificación del sistema de refuerzo**

Una clasificación del refuerzo de taludes con las raíces de los árboles fue propuesta por Tsukamoto y Kusakabe (1984).

Tabla 13: Tipos de anclaje de las raíces (adaptado de Tsukamoto y Kusakabe, 1984).

Tipo	Descripción	Efecto estabilizante
A	Manto delgado de suelo sobre roca masiva no penetrable por las raíces	Muy pequeño
B	Manto delgado de suelo sobre roca discontinua o fracturada penetrable por las raíces	Grande
C	Manto delgado de suelo sobre zona de transición o saprolito	Grande
D	Manto muy grueso de suelo	Pequeño

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

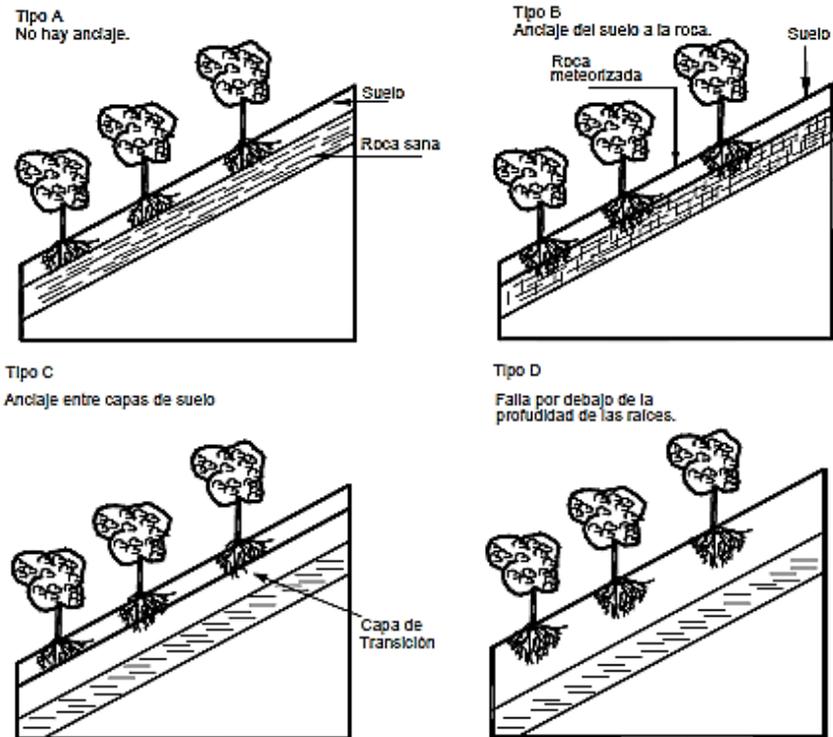


Figura 32: Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces (Tsukamoto y Kusakabe 1984).

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

- Efecto de Anclaje

“Un efecto positivo muy importante es el “anclaje” de masas de suelo por las raíces ((Bache y Mackaskill, 1984). Las características físicas de las raíces determinan el efecto de anclaje o refuerzo del suelo, y la densidad del sistema radicular mejora la retención de las partículas o masas de suelo, aumentando la resistencia a la erosión.” Campos (1991)

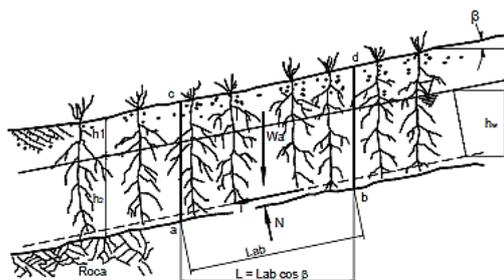


Figura 33: Fuerza de anclaje de arbustos y de hierbas de raíz profunda.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

El fenómeno del efecto de refuerzo de las raíces debe estudiarse en una forma global, analizando la superficie de falla al cortante de un talud, pudiéndose observar dos elementos principales:

- La movilización de la resistencia a la tensión de las raíces por efecto de anclaje de las raíces a materiales más resistentes. Este efecto es muy importante en perfiles de poco espesor de suelos residuales, en los cuales las raíces se anclan en la roca o en los materiales menos meteorizados.
- La profundización de la superficie crítica de falla en profundidades por debajo del volumen de presencia densa de raíces. Este efecto es importante en perfiles de suelo de gran espesor.

- Efecto de arco

Para reducir el riesgo de movimientos, el espaciamiento de los árboles debe ser lo más cercano posible. Un árbol junto a otro puede generar un efecto de arco.

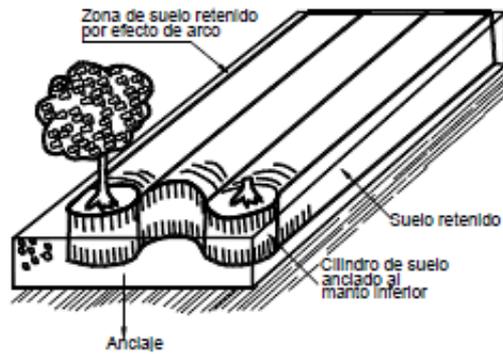


Figura 34: Efecto de arco de la vegetación.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

“Sin embargo, no se requiere que las raíces se entrelacen y el efecto de arco puede lograrse con separaciones de raíces entre 3 y 10 m dependiendo de las características del material del talud y del tipo de árbol.” (Gray, 1978). Una separación de 10 m entre árboles de grandes raíces produce soporte sustancial en la mayoría de los casos.

2.2.2.5. Efectos de la deforestación

Los efectos de la deforestación sobre la estabilidad de los taludes pueden no ser inmediatos. Inicialmente se produce un cambio hidrológico y un aumento de la erosión superficial y de la infiltración, pero los efectos desastrosos se observan cuando la infraestructura radicular original se descompone, generalmente entre 2 a 5 años después de la deforestación.

Bache (1984) reportó que en árboles de raíces profundas a los 30 meses después de la deforestación, la resistencia a la tensión de las raíces disminuyó entre 65 y 86% dependiendo de la especie.

“Las raíces más pequeñas, que son las que tienen mayor resistencia a la tensión o al arrancamiento son las primeras en descomponerse. La rapidez con que se descomponen depende de la especie de árbol y de las condiciones del sitio y del suelo.” (Suárez Díaz, 2000)

2.2.2.6. Efectos negativos de la vegetación

Algunos efectos de la vegetación pueden generar inestabilidad. Entre estos efectos se pueden mencionar los siguientes:

1. El secamiento del suelo por especies ávidas de agua puede producir agrietamiento especialmente en suelos expansivos.
2. El peso de los árboles aumenta las fuerzas actuantes para deslizamiento.
3. Las fuerzas del viento producen fuerzas sobre las masas de suelo que podrían activar deslizamientos.
4. Las raíces pueden levantar las estructuras livianas cimentadas superficialmente, como canales, revestimientos, etc.

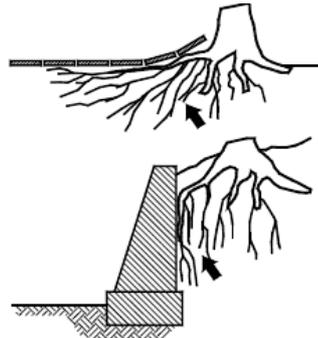


Figura 35: Efectos negativos de las raíces de los árboles sobre revestimientos y muros.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

5. La turbulencia producto de la vegetación puede producir erosión.

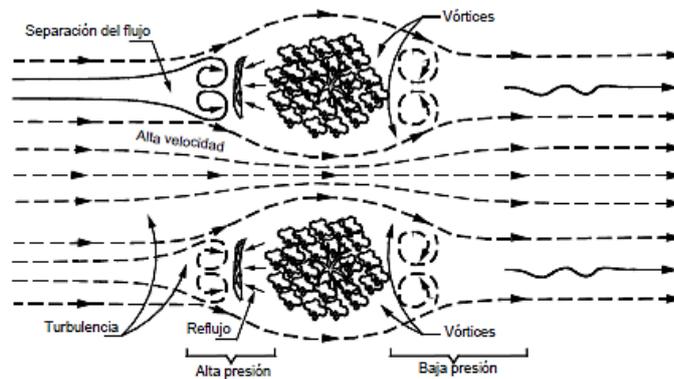


Figura 36: Erosión por turbulencia causada por una cobertura vegetal superficial incompleta.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

2.2.2.7. La vegetación y la erosión

El efecto más importante de la vegetación, universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación.

Barker y otros (1994) reportan ratas de erosión de 12 toneladas de suelo por hectárea en Malasia en el primer año, después de cortado un bosque tropical. Las ratas de erosión aumentan con el tiempo a medida que las raíces se descomponen.

La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión.

En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía.

“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 encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos.” (Suárez Díaz, 2000)

“Resultados similares son reportados por Nordin (1994) en Malasia, concluyendo que 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.”

Un bosque denso suministra virtualmente una protección completa al suelo contra la erosión. El follaje impide la erosión por la lluvia y demora la escorrentía, disminuyendo las velocidades y caudales. La acumulación de residuos vegetales forma un colchón protector muy eficiente y la cobertura de las raíces evita la formación de cárcavas y profundización de los cauces de las cañadas. La tala de un bosque desestabiliza el equilibrio existente y se puede producir un proceso acelerado de erosión de características catastróficas especialmente en áreas de montaña. (Suárez Díaz, 2000)

Tabla 14: Erosión relativa de acuerdo a la vegetación.

Vegetación	Erosión Relativa
Bosques densos	1
Pastos altos	1
Pastos bajos	5 – 10
Arbustos (café)	10 – 20
Cultivos limpios (papa – maíz)	100

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

El pasto alto (tipo elefante o similar) evita completamente la erosión por las gotas de lluvia, retarda el flujo y evita la erosión laminar. Las raíces profundas eliminan las cárcavas y surcos. Por ésta razón por el control de erosión cada día se utilizan más las especies de altura considerable.

- **Efectos del tiempo del flujo**

Las velocidades admisibles dependen principalmente del estado de la cobertura vegetal y la duración del flujo. Para vegetación de pastos comúnmente se asumen las siguientes velocidades aceptables:

Tabla 15: Variación de la velocidad de erosión con la altura de la vegetación (pastos) (según Department of the Navy).

Suelo	Velocidades de erosión m/seg			
	Sin vegetación	Vegetación de 15 a 25 cm de altura	Vegetación de 25 a 50 cm.	Vegetación de 50 cm a 1.0 m.
Arenoso	0.5	0.7 a 1.2	1.0 a 1.5	1.2 a 1.8
Limoso	0.7	1.2 a 1.8	1.5 a 1.2	1.8 a 2.0
Arcilloso	0.9	1.2 a 2.0	1.2 a 2.2	1.2 a 2.5

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

Un metro por segundo para flujos de larga duración. Dos metros por segundo para flujos de hasta 10 horas de duración. Tres a cuatro metros por segundo, cuando la duración no es más de dos horas. Cinco metros por segundo, cuando la duración del flujo es menos de una hora.

La utilización de estas velocidades no garantiza si la cobertura vegetal es incompleta o desigual o cuando ocurren varios flujos seguidos en un corto tiempo de duración. Las plantas no deben permanecer sumergidas por más de doce días para los pastos y de 30 días para las hierbas.

Tabla 16: Fuerza tractiva máxima permisible de un revestimiento de vegetación según HEC 15 (Federal Highway Administration) (Lancaster y otros 1999).

Clase de retardo producido por la vegetación	Altura de la vegetación (cm)	Fuerza tractiva permisible Pa
A	>60	18.06
B	30-60	10.25
C	15-30	4.88
D	5-15	2.93
E	<5	1.71

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

2.2.2.8. Sobrecarga y fuerzas del viento

La sobrecarga debida al peso propio de la vegetación generalmente no representa una carga importante, pero las fuerzas del viento son significativas. (Suárez Díaz, 2000)

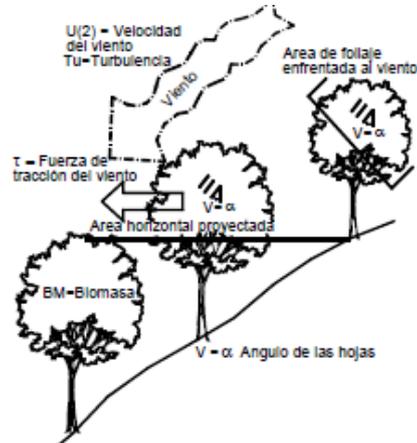


Figura 37: Esquema de la fuerza de tracción del viento.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

2.2.3. Propiedades de las plantas y características de las raíces

2.2.3.1. Características de las raíces

Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo, disponibilidad de oxígeno.
- Contenido de humedad, succión o presión osmótica.
- Temperatura del suelo, niveles de toxinas y elementos patogénicos.
- Sistema de poros.

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente.

- Profundidad de las Raíces

“La profundidad de las raíces generalmente no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos; aunque se han reportado casos de raíces de árboles de más de 30 metros de profundidad”. (Macgregor y Macmanus, 1992)

La extensión lateral del sistema radicular generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos supera los 50 metros de longitud.

La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud. Watson y O'Loughlin (1990) midieron el tamaño de las raíces de un pino Monterrey de 25 años y encontraron que mientras la raíz se extendía lateralmente 10.4 metros, alcanzaba una profundidad máxima de solamente 3.10 metros y un promedio de 2.4 metros.

Se ha encontrado que la longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo bien drenado granular, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Apparently, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene que buscar agua en el caso de que el drenaje sea bueno.

“Ante la dificultad de poder determinar con precisión la longitud de raíz debido a la poca información existente sobre las características radicales de las diversas especies, se puede tomar como regla general que la raíz se extiende lateralmente 1.5 veces el radio de la corona del follaje, aunque debe tenerse en cuenta que, en algunos casos, las raíces pueden extenderse hasta 22 veces el radio de la corona”. (Kozlowski, 1971)

La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

Se conoce de eucalipto con raíces de hasta 27 metros y raíces de bosque tropical hasta de 30 metros de profundidad, pero la mayoría de los árboles tienen raíces de profundidad hasta de tres metros (Greenway, 1987) y esta es la profundidad hasta la que puede confiarse un refuerzo con raíces.

Algunas plantas (Greenway, 1987) poseen un sistema de raíz “extensivo”, en el cual las raíces alcanzan profundidades o extensiones grandes, mientras otras forman un sistema “intensivo” con raíces más cortas y finas.

Leventhal y Mostyn (1987), indican que, las raíces de diámetro menor a 20 milímetros, son las más importantes para la estabilidad de un talud que las raíces de mayor diámetro. Otro factor que contribuye a la resistencia del sistema suelo-raíces es la densidad de raíces por volumen de suelo. El

número de raíces por unidad de área y su diámetro, puede evaluarse como una relación de áreas raíz-suelo en un plano determinado de falla.

Un sistema de recolección de información consiste en tomar muestras de suelo con raíces, por un sistema de tamizado separar las raíces de suelo, y con la comparación de los volúmenes determinar la relación raíz-suelo. Otro sistema podría consistir en dibujar en la pared de un apique utilizando papel de acetato, las áreas de raíz y evaluar la relación suelo-raíces.

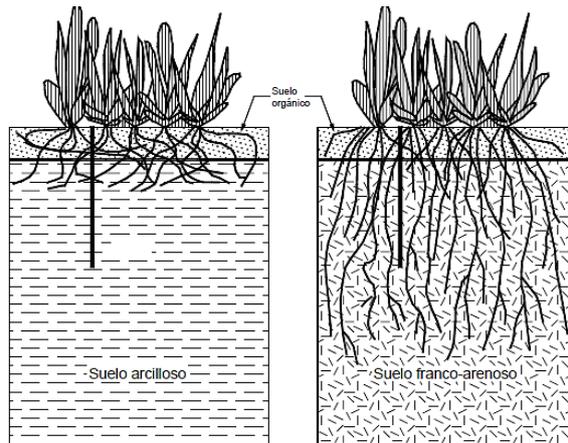


Figura 38: Efecto de la permeabilidad sobre la profundidad de las raíces.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

- Forma del sistema de raíces

La forma de las raíces puede presentar tres esquemas diferentes así:

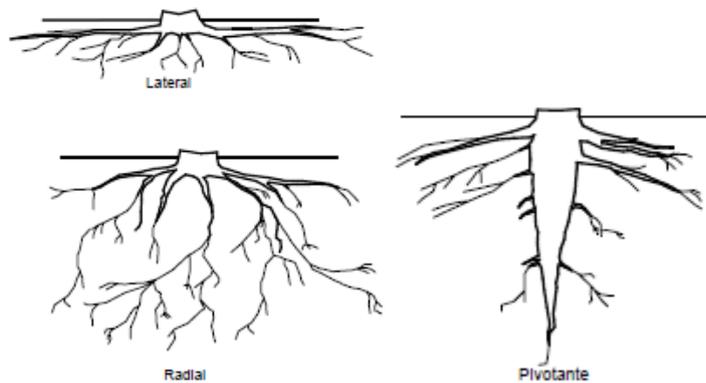


Figura 39: Tipos de raíz.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

- **Raíz de extensión lateral.** “La experiencia muestra que en la mayoría de los casos la extensión lateral de las raíces es

mucho mayor que la profundidad, con excepción de las raíces pivotantes, las cuales a su vez no son muy profundas. En este orden de ideas, el anclaje de las raíces es principalmente paralelo a la superficie del terreno; sin embargo, no debe desestimarse la penetración de las raíces en las fisuras de la roca, anclando el suelo superficial o el efecto de anclaje en los dos primeros metros de suelo.” (Suárez Díaz, 2000)

- **Raíz de extensión radial.** *“Las raíces de extensión radial tienen la ventaja de profundizarse y al mismo tiempo extenderse lateralmente, generando efecto de arco, el cual es muy importante en la estabilización de deslizamientos poco profundos.”* (Suárez Díaz, 2000)
- **Raíz pivotante.** *“Consiste en una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones de raíces pequeñas.”* (Suárez Díaz, 2000)

Generalmente, las raíces pivotantes alcanzan profundidades mayores que las raíces laterales o radiales. Estas raíces son muy efectivas para la estabilización de deslizamientos poco profundos.

- **Resistencia del sistema suelo - raíces**

En la literatura se encuentran informes contradictorios relacionados con el efecto de las raíces sobre la resistencia al cortante de los suelos.

Gray (1974), observa que, *“las raíces aumentan la resistencia al cortante por incremento de la cohesión aparente del suelo, reportando incrementos de resistencia hasta de 3 a 4 veces.”*

Yagi y otros (1994) encontraron en pruebas de laboratorio que no existe prácticamente ninguna variación en el ángulo de fricción y la cohesión por la presencia de raíces o el aumento del porcentaje volumétrico de raíces en el suelo.

Gray y Ohashi (1983) indicaron que, *“la orientación de las raíces en un ángulo de 60 grados con la superficie de cortante, aumenta a un máximo la*

resistencia al cortante equivalente a la dirección principal de tensión, lo cual se entiende como una resistencia generada por la tensión en las raíces.”

La resistencia a la tensión de las raíces puede ser hasta el 30% de la del acero según Schiechl (1980) y pueden extenderse varios metros por debajo de la superficie del talud.

La resistencia promedio a la tensión de las raíces depende de las características y estructura de la planta y puede variar desde 1300 psi hasta 7000 psi (Burroughs y Thomas, 1976; Gray, 1978 y Turmanina, 1965).

Las raíces de árboles y arbustos poseen un comportamiento a la tensión con un bajo módulo de elasticidad y según Gray y Ohashi (1983) no se rompen durante el proceso de corte del suelo; sin embargo, ensayos realizados con raíces en Colombia muestran deformaciones a rotura muy compatibles con el comportamiento al cortante de los suelos en la mayoría de las raíces ensayadas, especialmente en raíces con diámetro superior a 1 mm.

Tabla 17: Ensayos de resistencia a la tensión de algunas raíces de plantas tropicales.

Especie	Deformación Máxima (%)	Deformación Mínima (%)	Carga de Tensión Máxima (Kg/cm ²)	Carga de Tensión Mínima (Kg/cm ²)
Bambusa vulgaris	15.79	14.25	386.69	276.10
Espondias mombin	15.16	7.38	366.41	76.84
Licania tomentosa	10.70	3.83	576.86	360.65
Swinglea glutinosa	11.48	6.72	633.01	0.60

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

“Las raíces de mayor diámetro dan generalmente, menores valores de resistencia a la tensión en las mismas condiciones; sin embargo, al realizar pruebas con raíces de diferente árbol, pero del mismo tipo o variedad, los resultados de resistencia a la tensión pueden variar hasta en un 500%, lo cual dificulta la asignación de una resistencia específica para elaborar un modelo matemático.” (Suárez Díaz, 2000)

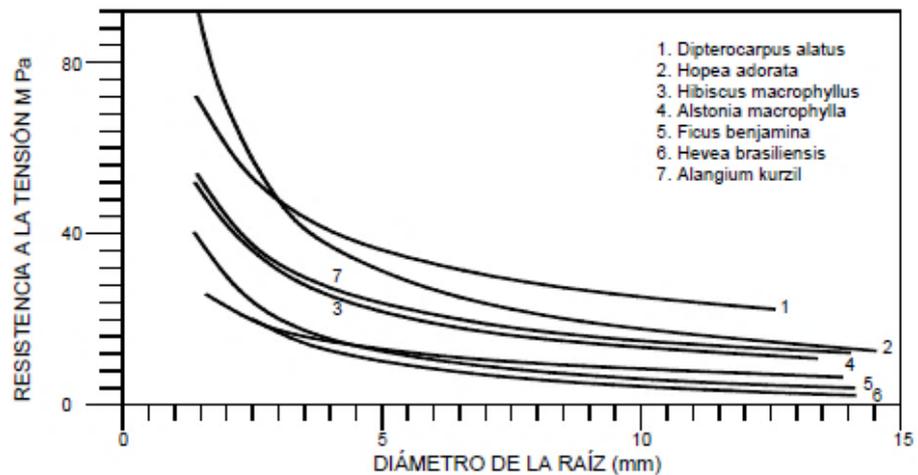


Figura 40: Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para raíces de siete especies vegetales tropicales.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

La relación entre la resistencia a la tensión de la raíz y su diámetro puede expresarse en la forma de una simple ecuación logarítmica:

$$Tr = n \cdot D^m$$

Donde:

Tr = Resistencia de la raíz a la tensión en MPa

D = Diámetro de la raíz en milímetros

n y m = Son constantes empíricas que dependen de la especie vegetal.

“La edad del árbol y sus condiciones ambientales (clima, humedad, suelo, etc.) producen un cambio importante en la resistencia a la tensión de las raíces. Suyama (1992), reporta que, las raíces individuales aumentan su resistencia a medida que ellas son más largas.” (Suárez Díaz, 2000)

“Los ensayos de resistencia a la tensión en raíces han sido difíciles debido a que se tienen problemas con las mordazas, en razón de que la piel de las raíces o las fibras exteriores tienden a deformarse, independientemente de las fibras interiores y las mordazas tienden a soltarse.” (Suárez Díaz, 2000)

- Metodología de análisis

“Para el análisis de factor de seguridad incluyendo el efecto de las raíces. El modelo propuesto para análisis incluye la metodología del sistema de Janbú (1973), adicionando fuerzas de tensión calculadas por unidad de área

de superficie de falla. La dirección de cada fuerza es tangente a la superficie de falla y su valor depende de la densidad de raíces y la resistencia calculada de la raíz para el diámetro promedio de raíces y su efecto solamente se tiene en cuenta hasta la profundidad hasta la cual la densidad de raíces es de más del 10% del área paralela a la superficie del talud. Esto equivale a asimilar el efecto de las raíces a una cohesión.” (Suárez Díaz, 2000)

Las raíces de diámetro superior a 1 mm representan un anclaje real que puede tenerse en cuenta en el análisis de estabilidad de un talud o ladera, utilizando los modelos matemáticos tradicionales de la mecánica de suelos.

Para facilidad en el empleo de modelos sistematizados de análisis se utiliza la siguiente metodología:

- Se determina el espesor de la capa de suelo con raíces.
- Se hace un análisis de número de raíces por unidad de área, diámetros y resistencia, y se obtiene la resistencia a la tensión de las raíces por unidad de área de suelo.
- Se realizan ensayos de tensión y de deformación de raíces para determinar qué diámetros de raíces no se deben tener en cuenta en el análisis (de acuerdo a su porcentaje de deformación a rotura).
- Se calcula la fuerza a la tensión de las raíces por unidad de área de suelo.

$$Fr = \Sigma ar \times fr$$

Donde:

ar = Área neta de raíces (tomada de la relación de áreas raíz-suelo).

fr = Resistencia a la tensión de la raíz (de acuerdo a la variedad vegetal).

- La fuerza de tensión puede analizarse como una fuerza de anclaje horizontal o puede convertirse en cohesión aparente (Cr), adicionándose a la cohesión del suelo.

- **Resistencia al arrancamiento**

“Otro elemento importante es la resistencia de la raíz al arrancamiento. En pruebas de arrancamiento en campo generalmente, la raíz se rompe y no se deja arrancar y al observar fallas de arrancamiento por fuerza del viento en la mayoría de los casos, el suelo es arrancado conjuntamente con la mayor parte del sistema radicular y la falla a rotura de las raíces ocurre sobre una superficie en la cual la densidad de raíces es menor, solo en algunas ocasiones las raíces profundas son arrancadas.” (Suárez Díaz, 2000)

2.2.3.2. Caracterización para control de la erosión

Es muy importante conocer las características de las especies vegetales disponibles para la construcción de una obra de bioingeniería.

Para el establecimiento de una cobertura vegetal en forma exitosa se requiere tener en cuenta una serie de criterios entre los cuales se encuentran los siguientes (Dickerson y otros, 1998):

1. Seleccionar correctamente la especie vegetal

Para la selección de la especie vegetal se requiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de planta, sistema tipo de raíces y habilidad radicular, rata de crecimiento, preferencia de suelo (textura y drenaje), preferencia de pH de suelo, rapidez de establecimiento, potencial de invasión, tolerancia a las sequías, tolerancia al sol y a la sombra, tolerancia a la inundación, tolerancia a la sedimentación, tolerancia al viento, tolerancia a las quemas, Tolerancia al pisoteo, Mínima profundidad del nivel de agua tolerado, Máxima profundidad del nivel de agua tolerado, Sistema de establecimiento (estacas, semillas, rizomas, estolones, etc.), Disponibilidad comercial. (Suárez Díaz, 2000)

“En el medio tropical Latinoamericano no existe mucha información sobre las especies vegetales a utilizarse en el control de erosión y a sus propiedades. Como referencia se presenta la tabla a continuación, utilizada en Hong- Kong sobre las características de los árboles más comúnmente sembrados en el sector urbano de esta populosa ciudad, localizada dentro de la zona tropical

del Asia. Esta tabla nos puede servir de guía para elaborar tablas similares con nuestras especies.” (Suárez Díaz, 2000)

2. Seleccionar la técnica de bioingeniería a emplear

Se debe determinar el sistema de siembra conjuntamente con los sistemas de fertilización, riego, mantenimiento y protección.

“Como se indicó anteriormente, las condiciones del sitio son determinantes para el buen establecimiento de la vegetación, pero también es muy importante la calidad de los materiales vegetales; por ejemplo, la calidad de la semilla o la calidad de las estacas que se utilicen para el establecimiento de la cobertura vegetal. Existen otros factores como la época de siembra, la cual determina la disponibilidad de agua y de temperatura para el establecimiento y el crecimiento de las plantas y como factor adicional Dickerson y otros mencionan que se deben contar con un poco de buena suerte para que las condiciones ambientales favorezcan en forma efectiva el establecimiento de la vegetación.” (Suárez Díaz, 2000)

Tabla 18: Características de los árboles utilizados en Hong-Kong (Greenway, 1998).

Especie de árbol	Altura		Rapidez de crecimiento			Tolerancia de condiciones extremas						
	Más de 7 m	Menos de 7 m	Rápida	Media	Lenta	Sitios rocosos	Suelo húmedo	Sol	Sombra	Sal	Tifones	Fuego
Acacia confusa		-	-			-		-			-	-
Albizia lebbek	-		-			-	-	-		-	-	
Alnus formosana	-		-									
Bauhinia species		-		-								
Casuarina equisetifolia	-		-			-	-	-		-	-	-
Casuarina stricta	-			-		-		-		-	-	
Celtis sinensis	-				-				-		-	
Eucalyptus torrelliana	-		-			-		-		-	-	
Leucaena Leucocephala		-	-			-		-		-	-	-
Pinus ellittottii	-			-		-	-	-				
Tristania conferta	-		-			-	-	-			-	-

Fuente: Modificada de Gray Sotir, 1992

2.2.3.3. Estabilidad de taludes con vegetación

De acuerdo con las investigaciones de Yagi y otros (1994), para fallas a poca profundidad para dos casos específicos en el Japón, el factor de seguridad de acuerdo al modelo de análisis propuesto por Enoki aumentó de 10% a 13.5%, para niveles altos de densidad de vegetación.

Un caso específico es Hong Kong, Greenway (1987) reporta un aumento del 33% en el factor de seguridad para un talud con árboles de aproximadamente 10 m de altura y 3 m de profundidad de las raíces, utilizando el método de análisis de Janbú. El efecto analizado en este caso fue el de profundización de la superficie crítica de falla de 1.0 a 2.5 m.

Dependiendo del modelo que se utilice, los factores de seguridad varían. Generalmente se obtienen valores de aumento inferiores al 30% para casos normales de vegetación densa y superficies de falla hasta de dos metros de profundidad.

En los casos de superficies de falla profundas, el efecto es menor y para fallas de más de cinco metros de profundidad, el efecto es muy pequeño, en razón de que, en taludes de pendiente alta, las raíces de los árboles generalmente alcanzan profundidades menores a cinco metros.

- **Cálculo de la Resistencia Suelo - Raíces**

Se han desarrollado diferentes métodos para cuantificar la contribución de los sistemas de raíces a la resistencia al suelo:

- Ensayos de corte directo (Waldron y otros, 1983)
- Análisis de taludes fallados (Sidle y Swanston, 1982)
- Modelos de resistencia de las raíces (Gray y Megahan, 1981)
- Información de densidad de raíces (Burrough y Thomas, 1977)

La cohesión debida a las raíces puede incorporarse como cohesión efectiva en la ecuación Mohr-Coulomb para el análisis de estabilidad de taludes, utilizando las teorías de equilibrio límite.

La resistencia total S del sistema suelo-raíces puede expresarse por medio de la ecuación modificada de Coulomb:

$$S = (S_s + \Delta S_r) + \sigma' \cdot \tan \phi'$$

Donde:

S = Resistencia del sistema sin raíces

σ' = Esfuerzo normal

ϕ' = Angulo de fricción del suelo

El modelo propuesto para análisis incluye la metodología del sistema de Janbú (1973), adicionando fuerzas de tensión calculadas por unidad de área de superficie de falla.

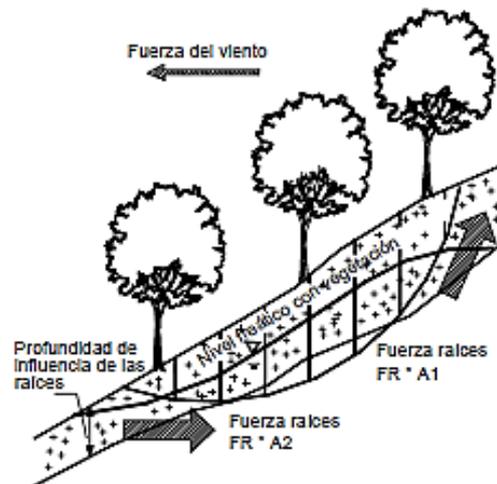


Figura 41: Esquema del análisis propuesto para calcular el factor de seguridad teniendo en cuenta el efecto de la vegetación.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

- Aumento de la Cohesión del Sistema Suelo - Raíces

“Las raíces producen una cohesión del sistema del suelo-raíces utilizando el refuerzo de la fibra de la raíz, la cual aumenta la resistencia del suelo.

El efecto del refuerzo debido a las raíces, es soportado por una gran cantidad de inventario de deslizamientos que comprueban que la resistencia del suelo disminuye después de remover la vegetación.” (Suárez Díaz, 2000)

Los valores de la cohesión debida a las raíces son difíciles de obtener y generalmente se calculan utilizando análisis de fallas ocurridas o ensayos de corte directo. La variación de la cohesión con el tiempo es lenta y compleja de determinar.

La morfología y distribución del sistema de raíces afecta en forma determinante la resistencia del sistema suelo-raíces.

Para el análisis de la cohesión generalmente se realizan las siguientes suposiciones (Schmidt y otros, 2001):

- La resistencia a la tensión de las fibras individuales de las raíces se moviliza totalmente. Esta suposición sobreestima el efecto de las raíces.
- El ángulo de fricción del suelo no se afecta por las raíces. No es claro la contribución friccionante de las raíces.
- Todas las raíces fallan simultáneamente en un deslizamiento. En la práctica la falla de las raíces es progresiva.
- Las raíces son flexibles e inicialmente se encuentran orientadas perpendicularmente a la superficie de falla.

Sin embargo, los ensayos de laboratorio muestran que el efecto en las raíces es similar así se encuentren perpendiculares u orientadas a la superficie de falla.

- La cohesión aportada por las raíces es directamente proporcional a la relación A_r/A_s , donde A_r es el área cubierta por raíces y A_s el área de suelo. Algunos autores (Shewbridge y Sitar, 1989), argumentan que el aumento del refuerzo es no lineal. Esta suposición puede sobreestimar la cohesión en sitios con altos valores de densidad de raíces.
- El efecto potencial de las raíces sobre la presión de poros se desprecia.
- La cohesión de las raíces desprecia los momentos flectores de las raíces individuales.

Generalmente, se utilizan valores típicos regionales de cohesión de acuerdo a las características del bosque. Los valores de cohesión del sistema suelo-raíces varían de 6 a 23 kPa en bosques industriales y de 25 a 94 kPa en bosques naturales (Schmidt y otros, 2001).

2.2.3.4. Diseño de revegetalización

La revegetalización de un talud ayuda a controlar la erosión y a aumentar el factor de seguridad. Por esta razón, cada día, se utiliza más la vegetación en la estabilización de taludes.

El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación.

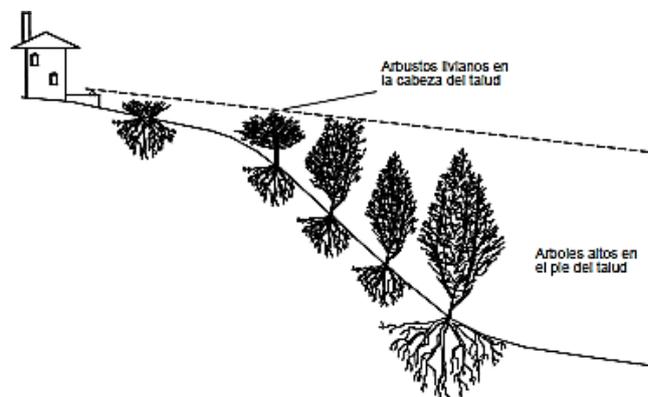


Figura 42: Elementos de arquitectura y paisajismo en el diseño de revegetalización.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000).

“Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión”. (Berman, 1991)

- Bioingeniería

“La estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales trabajando de una manera conjunta e integrada, se le conoce como estabilización biotecnológica de taludes. Este concepto de estabilización comprende parámetros ambientales muy importantes y su efectividad ha sido extraordinaria”. (Gray y Leiser, 1982)

Tabla 19: Sistemas de protección utilizando biotecnología.

Categoría	Descripción
Vegetación convencional	Siembra por semillas estolones o macetas.
Plantas maderables utilizadas como refuerzo	Estacas vivas y colchones de maleza.
Estructuras con vegetación	Gaviones, estructuras de llantas usadas, muros criba, geomallas, revestimientos sintéticos.

Fuente: (modificada de Gray Sotir, 1992).

- **Selección de Especies Vegetales**

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies. (Suárez Díaz, 2000)

El tipo de vegetación que cubre la superficie del talud tiene efecto sobre la estabilidad, por ejemplo, Campbell (1975), reportó que los deslizamientos de suelo eran 3 a 5 veces más frecuentes en taludes cubiertos por pastos que en aquellos cubiertos por maleza y arbustos.

La especie vegetal debe seleccionarse que sea compatible con las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales, etc. (Suárez Díaz, 2000)

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otras para objetivos de estabilización específicos.

Tabla 20: Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Fuente: (Gray Sotir, 1996).

La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

2.2.4. Vetiveria Zizanioides

“El pasto vetiver es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas, la cual su nombre botánico es Vetiveria Zizanioides, la cual Vetiveria significa “raíz que se desenterró” y Zizanioides significa “rio”, que refleja el hecho de que en el pasado la planta se encontraba comúnmente en las riberas del río a lo largo de las vías de la India. Es tal vez una de las variedades de mayor utilización en el mundo para el objeto específico de la protección contra la erosión. Esta especie crece desde el nivel del mar hasta 2000 msnm, en zonas con precipitación media anual desde 600 mm hasta 6000 mm, suelos con pH desde 4.5 hasta 10.5 y temperaturas desde 5°C hasta 45°C (Anon, 1960). Este pasto es originario del sureste asiático especialmente de Malasia y se está utilizando en los países tropicales de todo el mundo como la especie controladora de erosión por excelencia. Su ambiente nativo son los suelos tropicales lateríticos, gravosos, húmedos.” (Suárez Díaz, 2000)

“El vetiver se establece muy fácilmente en suelos húmedos y con perfil profundo, pero presenta dificultades en suelos secos o perfiles rocosos (Pawar, 1999). Aunque los tallos muestran detalles anatómicos similares al de otros pastos, morfológicamente es diferente debido a que tiene nudos hinchados. Las raíces son fibrosas y de longitudes mucho mayores que otros pastos”. (Grimshaw, 1995)

- **El vetiver como planta para estabilizar deslizamientos**

“El vetiver (*Vetiveria Zizanioides L.*) es una especie de pasto originario de Asia, que se está utilizando con mucha frecuencia en los países tropicales para el control de erosión y para disminuir el potencial de deslizamiento de los taludes.” (Suárez Díaz, 2000)

Esta planta es una gramínea perenne con apariencia de maleza, que alcanza una altura hasta de 1.6 metros en condiciones óptimas y posee un sistema de raíces con una gran cantidad de cilindros fibrosos capaces de alcanzar profundidades de 4 a 5 metros.

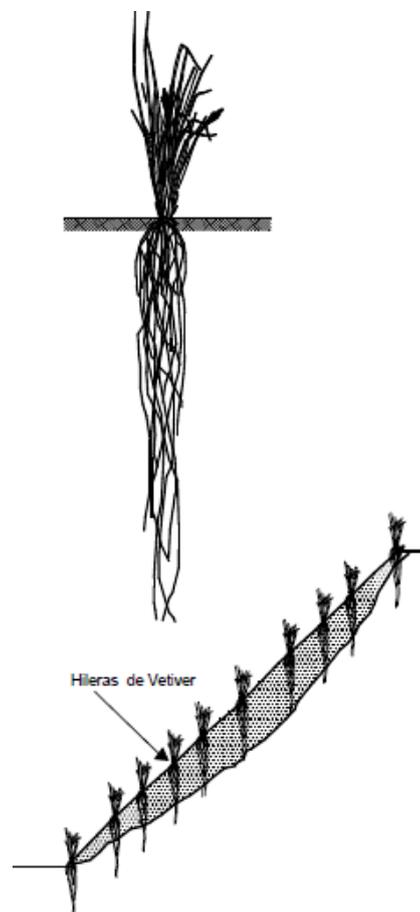


Figura 43: Esquema de una planta de vetiver y su efecto sobre la estabilidad de un talud.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

El Vetiver resiste fácilmente las sequías y la inmersión en agua, debido a la profundidad de sus raíces. Le gusta la exposición al sol y es capaz de adaptarse a gran cantidad de suelo, desde arena a arcilla y a altitudes climáticas desde el nivel del mar hasta 2500 metros.

El Vetiver crece tanto en ambientes ácidos como en ambientes alcalinos ($4 < \text{pH} < 11$). Resiste concentraciones grandes de contaminantes y no requiere de fertilidad alta del suelo. Idealmente requiere una temperatura de 15°C . La resistencia a la tensión de las raíces del Vetiver varía de 25 a 60 Mpa (Cazzuffi y otros, 2006).

- Estacas vivas

“Las estacas vivas son longitudes de tallo de árboles y arbustos que se entierran en el suelo con el objeto de que broten árboles. El procedimiento es simple, rápido y económico. Las estacas vivas pueden utilizarse como un tratamiento primario en el cual las estacas cumplen un objetivo de anclar otros elementos como trinchos o mantos vegetales, las cuales posteriormente se convertirían en árboles o arbustos. Las estacas deben ser generalmente de uno a tres centímetros de diámetro y de 60 centímetros a un metro de longitud.” (Suárez Díaz, 2000)

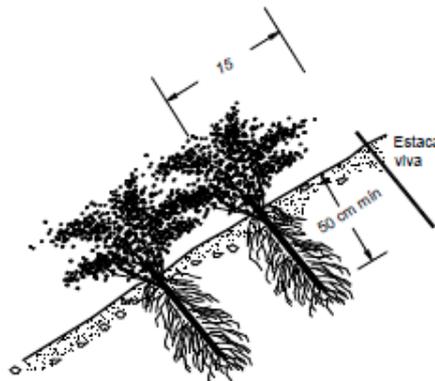


Figura 44: Estacas vivas.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

- Fajinas vivas

“Las fajinas son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas para que germinen en forma similar a como lo hacen las estacas vivas. Las zanjas generalmente, son excavadas a mano y forman un contorno a lo largo de las líneas de nivel del talud.” (Suárez Díaz, 2000)

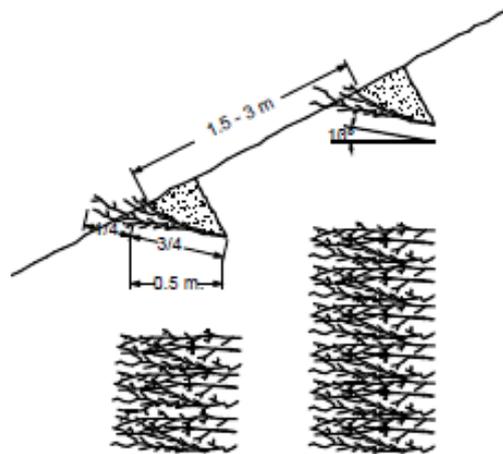


Figura 45: Fajinas vivas

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

En taludes muy húmedos también se pueden colocar fajinas siguiendo la pendiente para facilitar el drenaje. Después de colocar las fajinas las zanjas se rellenan con suelo, en tal forma que una parte de las fajinas queda enterrada y otra parte expuesta. La longitud de los ramos de fajina varía de 0.50 a 1.0 metro. (Suárez Díaz, 2000)

El principal uso de las fajinas es el control de erosión especialmente en zonas de cárcavas. Las fajinas a su vez forman unas líneas decorativas muy agradables al paisaje. Las fajinas generalmente, se hacen con hierbas y juncos adaptados a las condiciones climáticas del sitio. (Suárez Díaz, 2000)

Tabla 21: Espaciamiento recomendado para fajinas vivas.

Angulo del Talud H:V	Espaciamiento en Líneas de Igual Nivel (mts)	Espaciamiento en Angulo (mts)
1:1 a 1.5:1	1 a 1.2	0.6 a 1.0
1.5 :1 a 2:1	1.2 a 1.5	1.0 a 1.2
2:1 a 2.5:1	1.5 a 1.8	1.0 a 1.2
2.5:1 a 3:1	1.8 a 2.4	1.2 a 1.5
3:5 a 4:1	2.4 a 2.7	1.5 a 2.1
4.5 :1 a 5:1	2.7 a 3.0	1.8 a 2.4

Fuente: (Gray y Sotir, 1996).

Una forma similar a las fajinas son las capas de maleza que consisten en ramos colocados en zanjas en la forma como se indica en la figura. Las ramas se colocan formando una red en cruz.

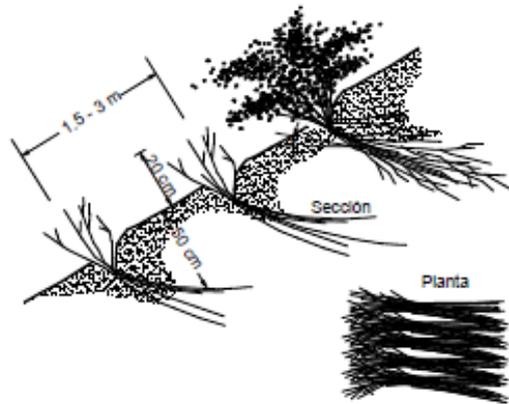


Figura 46: Fajinas vivas en cruz o capas de maleza.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

Los espaciamientos de las hileras de maleza son similares a los de las fajinas vivas, aunque en términos generales los espaciamientos deben ser ligeramente menores. Otro sistema es el de relleno de malezas y suelo de cárcavas, utilizando hierbas y estacas vivas de arbustos, como se indica en la figura.

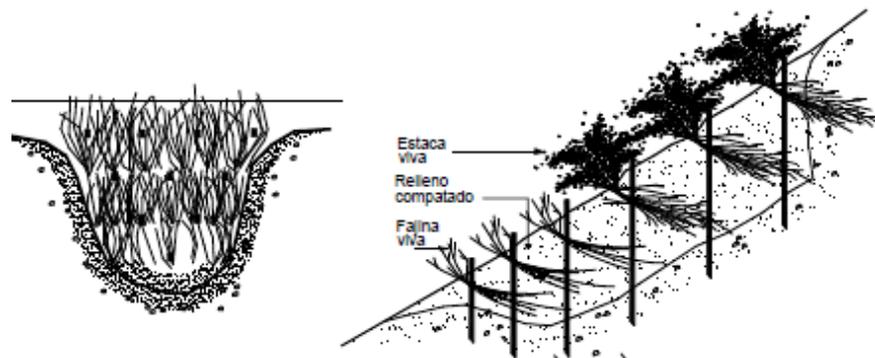


Figura 47: Relleno de una cárcava utilizando estacas vivas y fajinas.

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

- **Comparación de características y propiedades de plantas usadas para controlar la erosión e inestabilidad en taludes**

Tabla 22: Características de plantas usadas en estabilización de taludes.

TIPO DE PLANTAS	ALTURA DE TALLOS	USO EN TALUDES	VENTAJA	DESVENTAJA	PROFUNDIDAD DE RAICES	ANCHO TRIBUTARIO DE RAICES	TEMPERATURA DE CULTIVO	TIPO DE SUELO
Bambusa Vulgaris (bambú común)	Max. 18 m	Pie de talud	Mejora el drenaje del suelo	No es apta para controlar la erosión	Max. 5 m	Max. 15 m	0° - 45° (max. 3000 msnm)	Cualquier tipo
Gliricidia Sepium (Madero negro)	Max. 15 m	Pie de talud	Las raíces capturan mejor el suelo.	No drena muy bien	Poco profundo	Poca extensión	5° - 4° (max. 1500 msnm)	Suelos con pH entre 5 - 11
Panicum Maximun (pasto guinea)	Entre 0.75 - 2.0 m	Pie y corona de talud	Protección adecuada contra la erosión.	Factor de reforzamiento leve.	Profundidad media 0.20 m	Poca extensión	8° - 45° (max. 2000 msnm)	Cualquier tipo
Pennisetum Purpureum (pasto elefante)	Max. 2.5 m	Pie y corona de talud (poca pendiente)	Mejora el drenaje del suelo en menor medida.	Las raíces no capturan muy bien el suelo. El factor de refuerzo del suelo es despreciable. En comparación con el pasto Vetiver, el pasto elefante no es tan efectivo cuando se usa en una sola hilera, esto se debe a que la separación entre tallos es bastante ancha como para controlar el flujo de agua y evitar el paso de partículas de suelo.	Profundidad media 0.30 m	Extensión media	10° - 45° (max. 2000 msnm)	Cualquier tipo
Psidium Guajava (árbol de guayaba)	Max. 8 m	Pie de talud	Mejora el drenaje del suelo	Medianamente apta para controlar la erosión	Profundidad media	Extensión media	0° - 45° (max. 1400 msnm)	Suelos con pH entre 4.5 - 8.2
Chrysopogon Zizanioides (pasto vetiver)	Max. 3 m (común entre 1 - 1.5 m)	Pie y corona de talud	Raíz fibrosa. Las raíces capturan mejor el suelo. Buena resistencia a la tensión de raíces.	Mejora el drenaje del suelo en menor medida.	Profundidad alta (3 m)	Gran extensión	0° - 46° (max. 1500 msnm)	Suelos con pH entre 4 - 11
Cynodon dactylon (pasto bermuda)	Max. 30 cm	Pie y corona de talud	Apta para controlar la erosión.	Las raíces no capturan bien el suelo. El factor de refuerzo del suelo es despreciable. No provee un buen drenaje ni mejora el suelo.	Despreciable	Despreciable	8° - 45° (max. 2000 msnm)	Cualquier tipo

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

Tabla 23: Plantas utilizadas comúnmente en estabilización de taludes.

Nombre Científico	Nombre común	Altitud manm	Temperatura	Lluvias MM/Año	Reproducción	Invasor	Resist. Quemaz	Resist. Placero	Resist. Sequías	Terreno
Vetiveria Zizanioides	Vetiver	0 a 2000	5 a 45	600 a 6000	Tallos enraizados	No	Si	Si	Si	Preferentem e húmedo
Brachieria Decumbens Stapf	Braquiaria	0 a 2200	20 a 30	800 a 4000	Cepas, estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado, ácido
Melinis Minutiflora	Gordura	300 a 3300	18 a 27	800 a 3000	Semillas	No	No	No	No	Bien drenado a húmedo
Pennisetum Glandestinum	Kikuyo	0 a 3300	10 a 30	800 a 2000	Estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado a húmedo
Hiparrhenia Rufa Stapf	Puntero	0 a 2000	20 a 30	600 a 1000	Cepas y semillas	No	No	Si	Si	Bien drenado
Dicanthium Axiolatum	Angleton	600 a 1800	23 a 30	1000 a 4000	Estolones y semillas	Si	No	Si	No	Bien drenado neutro
Festuca Arundinacea	Festuca	2000 a 3200	15 a 20	900 a 1700	Semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Panicum Maximum	Guinea	0 a 2200	20 a 30	1000 a 4000	Cepas y semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Brachieria Mutica	Para-Admirable	0 a 1700	22 a 30	1000 a 4000	Estolones	Si	Si	Si	No	Húmedo
Digitaria Decumbens	Pangola	0 a 2200	18 a 30	1000 a 2000	Estolones	Si	Si	Si	Si	Húmedo a bien drenado
Lolium Perenne	Raigras Perenne	2200 a 3000	10 a 20	1500 a 4000	Semilla	No	No	Si	No	Húmedo
Centrosema Plumieri	Centro	0 a 1600	25 a 30	600 a 1000	Cepas (Rastrero)	Si	No	Si	Si	Seco
Pueraria Phaseoloides	Kudzu Tropical	0 a 2000	22 a 30	1000 a 2000	Cepas (Rastrero)	Si	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Desmodium spp.	Pega - Pega	0 a 3000	18 a 30	1000 a 2000	Cepas (Rastrero)	Si	No	No	Si	Bien drenado
Stenotratum Secundatum	San Agustín	300 a 2000	18 a 25	1000 a 2000	Cepas	Si	No	No	Si	Bien drenado
Pennisetum purpureum	Elefante	300 a 2300	18 a 27	1000 a 3000	Cepas, estolones y semillas.	Si	No	Si	No	Húmedo neutro
Cymbopogon Citratus	Limonaria	300 a 2000	18 a 25	1000 a 3000	Estolones	No	No	Si	Si	Bien drenado

Fuente: (Suárez Díaz, 2000)

2.2.4.1. Ventajas y desventajas del sistema vetiver

Ventajas:

- La mayor ventaja sobre medidas convencionales de ingeniería es su bajo costo y larga duración.
- Para la estabilización de taludes en China, por ejemplo, el ahorro está por el orden de 85-90% (Xie, 1997 y Xia et al, 1999, citado por TRUONG et al., 2009). En Australia, la ventaja en costos del sistema vetiver sobre los métodos de ingeniería convencionales está en el rango de 64% a 72%, dependiendo del método usado (Bracken y Truong 2001, citado por TRUONG et al., 2009).
- En resumen, sus costos MÁXIMOS son solo 30%, (O SON 70% MENOS) en comparación de los costos de las medidas tradicionales. Adicionalmente, podemos precisar que, los costos anuales de mantenimiento son reducidos significativamente una vez que las barreras de vetiver se hayan establecido.
- Como en otras tecnologías de la bioingeniería, el vetiver, se constituye como medio natural, ambientalmente amigable de controlar erosión y estabilizar los terrenos.
- Los costos de mantenimiento a largo plazo son bajos, en contraste con las obras de ingeniería convencionales. La tecnología verde mejora en la medida que madura la cobertura vegetal. El sistema vetiver requiere un sistema de mantenimiento en los primeros dos años; sin embargo, una vez establecido, será virtualmente libre de mantenimiento. Por lo tanto, el uso del vetiver es particularmente apropiado para áreas remotas donde los costos de mantenimiento son altos y las condiciones difíciles.
- El vetiver es bastante efectivo en suelos pobres, muy erosionables y separables.
- El sistema vetiver es apropiado en áreas donde la mano de obra es de bajo costo.
- Las barreras de vetiver son naturales, una técnica de bioingeniería suave y ecoamigable, en comparación con estructuras rígidas y duras.

Desventajas:

- La principal desventaja de las aplicaciones del sistema vetiver es su intolerancia a condiciones de sombra, específicamente en la etapa de establecimiento. La sombra parcial afecta su crecimiento y la sombra severa puede eliminarla. Es muy baja su capacidad de sobrevivencia en comparación con otras especies que sí

tiene mayor tolerancia a la sombra. Sin embargo, esta debilidad puede ser aprovechada en situaciones donde la estabilización inicial requiera de plantas pioneras que creen un micro ambiente y hospeden la introducción espontánea o planeada de especies nativas endémicas.

- El sistema vetiver es efectivo solo cuando las plantas están bien establecidas. Una planificación efectiva debe considerar un período de establecimiento de 2 a 3 meses en clima cálido y 4 a 6 meses en tiempos de clima frío. Para evitar retrasos, la siembra puede hacerse plantando con antelación, en la época seca si se dispone de riego.
- Las barreras de vetiver son efectivas plenamente solo cuando forman una barrera densa. Los huecos entre plantas deben ser replantados a tiempo.
- Es difícil plantar y regar vegetación en pendientes muy inclinadas y altas.
- El vetiver requiere protección del ganado durante sus fases de establecimiento.

Basado en estas consideraciones, las ventajas de usar el sistema vetiver como una herramienta en bioingeniería, superan las desventajas, en especial cuando el vetiver se usa como planta pionera.

Hay evidencias a nivel mundial que sustentan el uso del sistema vetiver para estabilizar taludes en Nepal y Sur África y, también, para estabilizar bordes de carreteras, entre otros trabajos de ingeniería, en lugares como: Australia, Brasil, América Central, China, Etiopía, Fiji, India, Italia, Madagascar, Malasia, Filipinas, Sur África, Sri Lanka, Venezuela, Vietnam, y las Indias Orientales. Asimismo, se debe precisar que, el sistema vetiver, también es utilizado en conjunto con otras aplicaciones geotécnicas.

2.2.4.2. Consideraciones para el plantado y mantenimiento de pastos vetiver

El uso generalizado del vetiver para estabilizar cortes de carretera funciona, por ejemplo:

- Como una medida de protección contra la erosión superficial, reduciendo la escorrentía que genera erosión las aguas abajo.
- Previniendo fallas superficiales porque estabilizan los taludes de corte; lo que reduce, a gran escala, el número de fallas profundas.

- Reduce, en algunos casos, en que ocurren fallas profundas. El vetiver al frenarlas, reduciendo, así, la masa fallada.
- Permite mantener el aspecto rural y ecoamigable de la carretera.

Los éxitos y fracasos usando el vetiver para proteger los taludes de corte a lo largo de la autopista Ho Chi Minh son didácticos:

- La pendiente debe ser internamente estable, debido a que, el vetiver es de mayor ayuda cuando es adulto ya que las pendientes pueden fallar en el ínterin.
- El vetiver comienza a estabilizar una pendiente a los tres o cuatro meses, como mínimo. Por lo tanto, el momento de sembrar es también muy importante si se quiere evitar la falla de la pendiente durante el período de lluvias.
- Un ángulo de pendiente apropiado no debe exceder de 45 a 50°.
- La poda regular asegura un crecimiento continuo y la producción de hijos del pasto para lograr una barrera más densa y efectiva.

Tiene hojas largas, rígidas y sencillas de 0,30 m a un 1 m de largo y de 4 a 10 mm de ancho, glabras, sin aristas, muy resistentes y de bordes ásperos. La planta puede alcanzar los 2 m de altura. Las inflorescencias, prácticamente estériles, son de 0,15 a 0,4 m de largo.

El sistema radicular tiene un fuerte desarrollo vertical, pero se extiende solo unos 0,5 m alrededor de la planta. Son raíces muy fuertes, rígidas, muy largas, verticales y de grosor uniforme, similares a alambres que forman una masa esponjosa y muy ramificada. Las raíces pueden alcanzar los 4 m de profundidad, siendo 2 m a 3 m común. Los rizomas son muy cortos y no invasivos. No desarrolla estolones.

El vetiver prefiere suelos profundos y arenosos, pero puede adaptarse a todo tipo de suelos, incluso poco profundos, pedregosos o rocosos. Sus raíces se desarrollan verticalmente, pudiendo llegar hasta los 4 m de profundidad, o hasta el nivel freático. Por la profundidad de las raíces es que aguanta bien las épocas de sequía (WILDSCHUT, 2013).



Figura 48: Hileras de vetiver.

Fuente: TRUONG et al. (2009)

En una prueba de resistencia al corte en un bloque de suelo, Hengchaovanich y Nilaweera (1996), citado por TRUONG et al. (2009) también encontraron que la penetración de raíces de una barrera de vetiver de dos años de establecida, con una separación entre plantas de 15 cm (6 pulgadas) se puede aumentar la resistencia al corte del suelo en los 50 cm (20") de la anchura de la franja adyacente en un 90% a 0,25 m (10 pulgadas) de profundidad.

El incremento fue del 39% a 0,50 m (1,5 pies) de profundidad y gradualmente se redujo a 12,5% a un metro (3 pies) de profundidad. Además, el sistema de raíces denso y masivo del vetiver ofrece un mayor incremento de la resistencia al corte por unidad de concentración de fibra (6 a 10 kPa/kg de raíz por metro cúbico de suelo) en comparación con 3,2 a 3,7 kPa/kg de raíz de árboles. Los autores explican que cuando las raíces de las plantas atraviesan el plano de una superficie potencial de corte en un perfil de suelo, distorsión de la zona de corte desarrollándose una tensión en las raíces. TRUONG *et al.* (2009)

2.2.4.2.1. Vivero de vetiver

El éxito de cualquier proyecto depende de la buena calidad y suficiente número de hijos de vetiver. Los viveros proveen material para la propagación vegetativa o el cultivo de tejidos de plantas de vetiver.

Los siguientes criterios deben facilitar el establecimiento de viveros productivos y fáciles de manejar:

- Tipo de suelo: Camas de propagación franco arenosas aseguran cosechas más fáciles y menores daños a las raíces y corona de las plantas. Franco arcillosas serían aceptables, pero arcillosas no.
- Topografía: Los terrenos ligeramente inclinados evitan el encharcamiento en caso de excesos de agua. Los sitios planos son aceptables, pero debe controlarse el drenaje ya que el encharcamiento puede afectar a las plantas muy jóvenes, aunque las adultas toleran las condiciones de saturación.
- Sombra: Se recomiendan espacios abiertos, ya que la sombra afecta el desarrollo del vetiver. La sombra parcial es aceptable. El vetiver requiere mucho sol.
- Trazado de la plantación: El vetiver debe ser plantado en hileras largas y ordenadas en contorno para facilitar la cosecha.
- Método de cosecha: La cosecha de plantas maduras puede ser realizada manual o mecánicamente. Un implemento debe cortar las raíces de plantas maduras a 20 a 25 cm (8-10") por debajo de la superficie. Para evitar daños a la corona usar arados de vertedera o de disco con ajustes especiales.
- Método de riego: El riego por aspersión distribuye el agua uniformemente en los primeros meses de la plantación. Las plantas más maduras pueden regarse por inundación.
- Entrenamiento del personal de operaciones: Que personal entrenado es esencial para el éxito.
- Plantación mecánica: Una sembradora modificada o una trasplantadora mecánica puede sembrar grandes cantidades de hijos en el vivero.
- Disponibilidad de maquinaria en el vivero: Se requiere de maquinaria agrícola básica para la preparación del terreno, las camas de siembra, control de malezas, corte y cosecha de las plantas.

2.2.4.2.2. Métodos de propagación

Las cuatro maneras de propagar vetiver son:

- Separando brotes maduros de la macolla de vetiver o plantas madre, obteniendo hijos (“esquejes”) a raíz desnuda para ser plantados de forma inmediata en el campo o en contenedores.
- Usando varias partes de las plantas madre de vetiver.
- Multiplicación de yemas o micropropagación in vitro para propagación a gran escala.
- Cultivo de tejido, usando una pequeña parte de la planta para propagación a gran escala.

2.2.4.2.3. Momento de realizar la instalación

La instalación de las plantas de vetiver es crítica para el éxito y el costo del proyecto. Plantar en la época seca requiere de riego abundante y costoso. La experiencia en Vietnam Central demuestra que se requiere un riego diario o dos veces al día para establecer vetiver en las condiciones extremadamente difíciles de las dunas de arena. El crecimiento se retrasa en la ausencia de agua. Debido a que es difícil seleccionar el mejor momento para plantar grandes cantidades de plantas en taludes de corte a lo largo de la autopista Ho Chi Minh, por ejemplo, el riego mecánico es necesario diariamente durante los primeros meses. El vetiver generalmente necesita de 3 a 4 meses para llegar a establecerse; mientras que, en condiciones adversas hasta 5 a 6 meses. El vetiver es efectivo plenamente a la edad de 9 a 10 meses, las plantaciones masivas deben ocurrir al principio de la estación lluviosa por tanto el desarrollo y producción de plantas en el vivero debe planificarse para satisfacer el cronograma de plantación.

2.2.4.2.4. Especificaciones del trazado

- a) Pendientes naturales, pendientes de corte, taludes de carreteras, etc.

Para estabilizar pendientes naturales, pendientes de corte y taludes de carretera, aplican las siguientes especificaciones:

Los taludes de la pendiente no deben exceder 1(H) [horizontal]:1(V) [vertical] o 45°, se recomienda un gradiente de 1,5:1.

Gradientes menores son deseables siempre que sean posibles, especialmente en suelos erosionables y/o en zonas de alta precipitación.

El vetiver debe ser plantado en sentido contrario a la pendiente en líneas de contorno aproximadas con un intervalo vertical (IV) entre 1,0 a 2,0m (3 a 6 pies), medido pendiente abajo. El espaciamiento de 1.0m (3') debe ser utilizado en suelos muy erosionables, que puede incrementarse hasta 1,5 a 2,0m (4,5 a 6 pies) en suelos más estables.

La primera hilera debe sembrarse en el borde superior del talud. Esta barrera debe colocarse en todos los taludes con alturas mayores a 1,5m (4,5 pies).

La hilera de abajo debe sembrarse en el fondo, al pie del talud. En taludes de corte a lo largo de la cuneta de drenaje.

Entre estas hileras, el vetiver debe sembrarse como se especificó arriba.

Se recomienda el banqueo o terraceo de 1 a 3 m (3 a 9 pies) de ancho por cada 5 a 8 m (15 a 24 pies) IV para pendientes mayores de los 10 m (30 pies).

b) Bancos de río, erosión costera, y estructuras de retención de agua inestables.

Para la mitigación de desastres y la protección de las costas, bancos de río y diques/terraplenes, se recomiendan las siguientes especificaciones de trazado:

La máxima pendiente del banco no debe exceder 1,5(H):1(V). La pendiente recomendada para el banco es de 2,5:1. Por ejemplo: los sistemas de diques marinos en Hai Hau (Nam Dinh) están contruidos con una pendiente del banco de 3:1 a 4:1.

El vetiver debe plantarse en dos direcciones:

Para la estabilización de bancos, el vetiver debe sembrarse en hileras paralelas a la dirección del flujo (horizontal), en líneas de contorno aproximadas 0,8-1,0 m (2,5 a 3 pies) de separación (medido en dirección de la pendiente). Un trazado reciente en el sistema de diques de Hai Hau (Nam Dinh) incluyó especificaciones que redujeron el espaciamiento a 0,25 m (0,8 pies).

Para reducir la velocidad del flujo, el vetiver debe sembrarse en hileras normales (ángulo recto) al flujo y espaciadas 2,0 m (6 pies) en suelos erosionables y 4,0 m (12 pies) en suelos estables.

Como protección suplementaria, las hileras normales se sembraron 1,0 m (3 pies) separadas del dique del río en Quang Ngai, por ejemplo: La primera línea horizontal debe sembrarse en la cresta del banco y la última hilera debe plantarse en la línea más baja del nivel del agua del banco, ya que el nivel del agua en algunas localidades cambia por temporadas, el vetiver puede sembrarse más abajo en el banco, cuando el momento sea propicio.

El vetiver debe plantarse en contorno a lo largo de la longitud del banco entre las hileras superior e inferior a la distancia especificada arriba.

Debido a los altos niveles del agua, las hileras de abajo pueden establecerse más lentamente que las de arriba. En esos casos, las hileras inferiores deben sembrarse cuando el suelo está más seco. En algunas aplicaciones del SV, se protegen con diques antisalinidad. En estos casos, el agua puede encontrarse más salada en ciertas épocas del año, lo que puede afectar el crecimiento del vetiver. Las experiencias en Quang Ngai muestran que el vetiver puede ser remplazado por algunas especies locales tolerantes a la salinidad, incluyendo el helecho mangle.

Para todas las aplicaciones, puede ser usado en combinación con otras medidas estructurales tradicionales tales como recubrimientos con roca o concreto, y muros de retención. Por ejemplo, la parte inferior del dique /terraplén puede ser cubierta por una combinación de roca y concreto y geotextiles mientras la mitad superior es protegida con barreras de vetiver.

2.2.4.2.5. Especificaciones de siembra

- Cavar zanjas que sean de 15 a 20 cm (6 a 8 pulgadas) de ancho y profundidad.
- Localizar plantas bien enraizadas (con 2 a 3 brotes) en el centro de cada hilera a intervalos de 100-120 mm (4 a 5 pulgadas) en suelos erosionables, y a 150 mm (6 pulgadas) para suelos normales.
- Debido a que los suelos en las pendientes, taludes de carreteras y rellenos en diques/terraplenes no son fértiles, se recomienda el uso

de plantas producidas en contenedores (bolsas, tubetes) para siembras de gran escala y lograr un establecimiento rápido. La adición de un poco de buena mezcla de suelo estiércol es recomendable. Para proteger los bancos de río donde el suelo es usualmente fértil y donde el agua de riego es de fácil acceso, las plantas a raíz desnuda son apropiadas.

- Cubra las raíces con 20 a 40mm (1 a 2 pulgadas) de suelo y compáctelo firmemente.
- Fertilice con Nitrógeno y fósforo como el FDA (Fosfato Di Amónico) o NPK (nótese que por experiencia el vetiver no responde significativamente a las aplicaciones de potasio) a 100 g (3.5 oz) por metro de hilera. La misma cantidad de cal puede ser necesaria cuando se planta en suelos sulfato ácido.
- Riegue el mismo día de la siembra.
- Para reducir el control de malezas durante la etapa de establecimiento, puede utilizarse un herbicida preemergente como la Atrazina.

2.2.4.2.6. Mantenimiento

a) Riego

En clima seco, riegue diariamente durante las dos primeras semanas después de la siembra y luego un día de por medio. Riegue dos veces por semana hasta que las plantas se establezcan completamente. Las plantas adultas no requieren más riego.

b) Resiembra

Durante el primer mes después de la siembra, reponga todas las plantas que fallen en su establecimiento o hayan sido arrastradas.

Continúe las inspecciones hasta que las plantas se hayan establecido apropiadamente.

Controle las malezas, especialmente las trepadoras, durante el primer año.

No use el herbicida Round Up (glifosato). El vetiver es muy sensible al glifosato, por lo que este no debe ser usado para controlar las malezas entre las hileras.

c) Fertilización

En suelos infértiles, FDA o fertilizante NPK debe aplicarse al principio de la segunda temporada de lluvias.

d) Poda

Después de cinco meses, las podas regulares son muy importantes. Las barreras deben ser cortadas a unos 15 a 20 cm (6 a 8") sobre el nivel del terreno.

Esta técnica simple promueve el desarrollo de nuevos brotes desde la base y reduce el volumen de hojas secas que de otra manera pueden sombrear los brotes jóvenes. La poda es también importante para mejorar la apariencia de las barreras secas y para disminuir el riesgo de incendios. Las hojas frescas cortadas pueden ser usadas como forraje para el ganado, para artesanías, e incluso para hacer techos. El vetiver también puede ser empleado para reducir desastres naturales, no debe ser sobreutilizado para otros fines secundarios. Se pueden realizar podas sucesivas dos a tres veces al año. Se debe tener cuidado de que la planta tenga largas hojas durante la temporada de tifones.

El vetiver puede ser podado inmediatamente después que termine la temporada de tifones. Otra época apropiada para la poda podría ser unos tres meses antes del inicio de la temporada de tifones.

e) Cercado y cuidados

Durante los meses del período de establecimiento puede ser necesario cercar y cuidar el vetiver para protegerlo del vandalismo y del ganado. Los viejos tallos del vetiver maduro son suficientemente duros para desalentar al ganado. Cuando sea necesario, se recomienda cercar el área para proteger el vetiver durante los meses iniciales después de la siembra.

2.2.4.2.7. Costo de instalación y mantenimiento de barreras vivas con pasto vetiver

Comparado con los costos de construcción y mantenimiento de obras de cemento, piedra, canales, desagües, etc. el vetiver generalmente cuesta entre 55% y 85% menos. Esta información se basa en los costos reportados de Madagascar, Malasia, China y las Filipinas, donde existen programas grandes y bien desarrollados en este momento.

El costo de establecimiento de vetiver depende mucho en su mayoría en el costo de mano de obra agrícola. Dependiendo de los suelos, una sola persona puede sembrar alrededor de 100 metros lineales por día. De fuentes establecidas, el costo de unidad de siembra (material vegetativo). Plantas de un vivero con plantas de contenedores puede ser 10 veces más caros. Un vivero bien manejado puede producir hasta 2 millones de tallos/ha/año, que es una cantidad suficiente para sembrar 65 km de barrera (Ponce y Cevallos, 2005).

2.2.4.3. Descripción de actividades para el cultivo de pastos Vetiver

Como antecedente se cuenta con el documento denominado: Aplicaciones del sistema vetiver y manual técnico de referencia (TRUONG et al., 2009), donde se estableció el diseño y técnicas para la implementación del sistema vetiver, considerando lo siguiente:

- Vivero
- Métodos de propagación mediante “esquejes”.
- Preparación del material de siembra usando bolsas de polietileno con sustrato preparado.
- Momento de realizar la instalación de vetiver
- Especificaciones del trazado
- Especificaciones de siembra
- Mantenimiento: riego, resiembra, fertilización, poda, cercado y cuidados.

a) Vivero

Es un espacio de terreno en el cual se siembran, trasplantan y nacen las plantas hasta que estos tengan una edad y tamaño adecuados para luego trasplantarlos a otro terreno en donde deberán cumplir su ciclo de vida.

b) Esquejes

Un esqueje es un fragmento de una planta, a partir del cual se obtiene un nuevo ejemplar genéticamente idéntico a la planta de la cual se obtuvo el fragmento. Para ello se somete a un proceso que consiste básicamente en que el fragmento escogido produzca raíces.

c) Momento de realizar la instalación de vetiver

La conformación del sitio juega un papel muy importante en el desarrollo exitoso de la revegetalización de un talud. Para la preparación del sitio se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Tienda el talud a una pendiente estable y con una forma que facilite el establecimiento de la vegetación.
- Escarifique la superficie del terreno para permitir la acumulación de agua (huellas, gradas o cambios de pendiente). Proteja el pie del talud contra socavación.
- Proteja la superficie del talud contra el golpeo de las gotas de lluvia. Intercepte y desvíe el agua de escorrentía, arriba de la corona del talud.
- Controle los afloramientos de agua subterránea sobre la superficie del talud.

d) Especificaciones del trazado

Las plántulas de vetiver se siembran a razón de dos (2) unidades por metro lineal, en líneas sobre las curvas de nivel, iniciando en la corona del talud y a una distancia de un metro (1) entre ellas (dependiendo condiciones del terreno). En caso de presentarse taludes más inestables, las líneas de vetiver podrán sembrarse a distancias menores, de acuerdo al criterio de la interventoría.

Estas líneas longitudinales de vetiver del talud y de la corona protegerán el cuerpo del talud de las aguas de escorrentía de las zonas aledañas, actuando sus resistentes tallos como filtros de sedimentación y disipadores de energía y sus profundas raíces de 2 a 5 m de profundidad, como muros de contención vivos al interior de la masa, sucesivos y perennes.

e) Especificaciones de la siembra

Una siembra adecuada es clave para el éxito de la plantación, por lo tanto, es importante capacitar a las personas que llevaran a cabo esta labor. Se debe

plantar al inicio de la época lluviosa para que las raíces de las plantas puedan desarrollarse. Si la excavación para la siembra es en surcos; para la adecuación del terreno se debe expandir tierra orgánica, preferiblemente que sea proveniente de la actividad de descapote, y deberá estar libre de palos, troncos, raíces y/o elementos extraños. Por cada tres partes de tierra negra debe mezclarse una parte de abono.

f) Mantenimiento

La revegetalización y estabilización de taludes como cualquier siembra, requiere mantenimiento, fertilizaciones y podas para mejorar su establecimiento y asegurar la continuidad de la capa vegetal que se reimplanta.

Se recomienda realizar al vetiver, inicialmente dos mantenimientos a los 2 y 4 meses, que incluyen desmalezada, poda y fertilización, para obtener un buen establecimiento; posteriormente cada 6 meses se recomienda realizar una poda a 40 cm de altura; con el fin de incrementar el crecimiento de la raíz y el engrosamiento o macollamiento de sus tallos.

g) Riego

Es mejor sembrar el vetiver en suelo húmedo. Cuando se siembra en suelo seco se debe regar el mismo día, por lo que es sumamente recomendable regar el campo el día anterior a la siembra. Si no llueve, se necesita regar diariamente durante la primera semana, cada 2 a 3 días las dos semanas subsiguientes, dependiendo del tipo de clima que se presente en el momento de la ejecución del proyecto, (los climas secos y calientes requieren más riego) y de 2 a 3 veces durante las 3 primeras semanas hasta que empiecen las lluvias y 1 vez cada 10 días por 4 veces o hasta que el pasto esté bien establecido.

h) Resiembra

Se debe hacer el recuento de plantas muertas y realizar la resiembra, máximo un mes después del establecimiento de la plantación, si la plantación recibe pago por servicios ambientales se aconseja efectuarla cuando la mortalidad está concentrada o es superior a un 10 %.

i) Fertilización

La fertilización es uno de los factores más importantes que inciden en la productividad del cultivo. En suelos pobres deben tomarse medidas para corregir la acidez y la fertilidad orgánica y mineral.

j) Poda

La poda de los árboles y arbustos, así como la de hierbas y pastos es un sistema de revitalización de las plantas y al mismo tiempo producción de tallos para siembra de estacas vivas. El procedimiento de poda mantiene intacto el sistema radicular mientras genera una gran cantidad de pequeños tallos cerca de los sitios de corte para regeneración de follaje.

Muchas especies de árboles tienen una habilidad para regenerarse rápidamente después de la poda. La poda en ocasiones se utiliza para disminuir el peso de los árboles sobre el talud y las fuerzas del viento. Las ramas y hojas subproducto de la poda deben reutilizarse como estacas o ramas vivas o como nutrientes para el suelo, a fin de mantener el equilibrio ambiental. La poda sin nuevos aportes de nutrientes debilita el suelo y disminuye el volumen de biomasa.

k) Cercado

El sistema radicular esponjoso de la planta, fija el suelo hasta una profundidad de tres metros. Al formar una densa cortina subterránea que sigue las curvas de nivel del terreno, las raíces impiden la formación de surcos, cárcavas y túneles. El aceite fuertemente aromático que contienen hace que la planta resulte desagradable para los roedores y otras plagas; muchos agricultores de la India afirman que impide asimismo que aniden ratas en la zona. Además, según los agricultores de los alrededores, las hojas afiladas y duras de la planta ahuyentan también a las serpientes.

l) Cuidado

Las hojas y los tallos del vetiver retardan el escurrimiento del agua cargada de limo, debido a lo cual el limo queda depositado detrás de la planta, en tanto que el agua sigue escurriéndose por la pendiente, a una velocidad mucho menor.

Durante los meses del período de establecimiento, es necesario cuidar el vetiver para protegerlo del vandalismo y del ganado. Los viejos tallos del vetiver maduro son suficientemente duros para desalentar al ganado.

2.2.4.4. Realización de un presupuesto para la estabilización de taludes con pasto vetiver

En primer lugar, consistió en la revisión y obtención de datos respecto a costos, análisis costos unitarios, rendimiento o metrado para la estabilización de taludes o datos de trabajos similares en otros lugares.

Luego, se procedió hacer cálculos en función de la longitud de hilera y datos técnicos obtenidos en la revisión de información, por tanto, se utilizó los siguientes datos:

- Ancho y profundidad de surcado (0.15 x 0.20 m).
- Intervalo entre planta en la hilera (1.0 m)
- Volumen de agua requerido por 1 m de hilera (0.001 m³).
- Cantidad de abono requerido por 1 m de hilera (0.1 kg).

2.2.5. Consideraciones de aporte al esfuerzo de corte mediante la resistencia a tensión del cultivo Vetiver

Para complementar con la técnica de bioingeniería y con los ensayos de corte directo, se muestran a continuación resistencias promedio a tensión de varios tipos de pastos. Es importante observar que si bien, el pasto vetiver es de los de menor diámetro promedio, pero su resistencia de tensión es mucho mayor a la de otras especies.

Tabla 24: Diámetro promedio y resistencia a la tensión promedio de raíces de varios pastos.

TIPOS DE PASTOS	DIÁMETRO PROMEDIO DE LAS RAÍCES (mm)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO (kg/cm ²)
Juncellus serotinus (late juncellus)	0.38±0.43	250±43
Paspalum dilatatum (zacate dallis)	0.92±0.28	200±31
Trifolium repens (trébol blanco)	0.91±0.11	270±34
Chrysopogon Zizanioides (pasto vetiver)	0.66±0.32	868±318
Eremochloa ophiuroides (zacate san agustin)	0.66±0.05	278±18
Paspalum notatum (pasto bahía)	0.73±0.07	196±37
Zoysia matrella (pasto manila)	0.77±0.67	179±29
Cynodon dactylon (pasto bermuda)	0.99±0.17	137±22

Fuente: Modificado de Hong et al, 2003.

Si bien es cierto que la resistencia a la tensión del pasto vetiver es muy elevado, en esta investigación tomaremos como referencia a nuestro antecedente internacional (Quiros Castegnaro, 2012) mostrada en el capítulo 2, el cual realiza experimentalmente ensayos de tensión de raíces, a partir de especímenes vivos de una planta de vetiver de tres años de edad.

Tabla 25: Resistencia a tensión de haces de raíces de Vetiver.

Nº Muestra	Diámetro (promedio cm)	Área (cm ²)	Carga (kgf)	Esfuerzo (kg/cm ²)
M15	0.81	0.51	24.61	47.9
M20	0.85	0.57	20.70	36.5
M7	1.24	1.20	29.62	24.6
M4	1.22	1.17	33.53	28.5
M5	1.20	1.13	39.84	35.4
M14	0.71	0.40	20.10	51.2
M9	0.83	0.54	23.24	42.8
PROMEDIO			27.3 kgf	38.1 kg/cm ²

Fuente: (Quiros Castegnaro, 2012)

En esta parte de la investigación se plantea el procedimiento para la inclusión del efecto de las raíces en el análisis de estabilidad de taludes empleando el método de equilibrio límite.

- Se utilizará el siguiente modelo matemático para estimar el aumento en la resistencia al corte del suelo en base a la resistencia promedio a tracción considerada:

$$\Delta SR = 1.15 \cdot TR \cdot \left(\frac{AR}{A}\right)$$

Donde:

SR= es el aporte total de las raíces a la cohesión del suelo.

TR= resistencia promedio a tensión.

AR/A= es la proporción del área de raíces con respecto al área de suelo de una muestra de suelo con raíces 0.50%.

- Se definen las columnas de suelo considerando el aporte de tensión a la cohesión del suelo:

$$C = (C_o + \Delta SR)$$

Donde:

c_0 = es la cohesión original del suelo sin raíces.

2.2.6. Propiedades del suelo

2.2.6.1. Propiedades físicas del suelo

Según la norma de Suelos y Cimentaciones (E.050, 2015), menciona que, para determinar las propiedades del suelo, se tienen que realizar ensayos in situ y de laboratorio, las cuales estas están basadas en las Normas Técnicas Peruanas (NTP).

“En la mecánica de suelos, es de suma importancia conocer las principales propiedades físicas del suelo, ya que interpretando correctamente los resultados podemos predecir a un futuro el comportamiento de un suelo determinado.” (Crespo Villalaz, 2004 pág. 41)

a. Humedad natural del suelo

La Norma Técnica Peruana (NTP 339.127, 2006), define a la humedad o contenido de humedad, *“como la cantidad de agua presente en el suelo, el cual se expresa como porcentaje de la relación del peso de agua en una masa dada del suelo entre el peso de las partículas sólidas.”*

b. Análisis granulométrico del suelo

El análisis granulométrico es la obtención de la distribución de partículas expresados en porcentajes del peso total, ya que el suelo posee partículas de diferentes tamaños. Los métodos generalmente usados para encontrar la distribución de tamaños de partículas son: el análisis granulométrico por tamizado para partículas con diámetro superior a 0.075 mm. y el análisis hidrométrico para partículas con diámetro menor a 0.075 mm. (Braja Das, 2013 pág. 33)

La Norma Técnica Peruana (NTP 339.128, 2006), indica la distribución de partículas de los suelos mediante tamices estandarizados. Cabe mencionar que esta distribución de partículas nos ayudará a poder clasificar los suelos mediante los sistemas SUCS o AASHTO. El análisis granulométrico del suelo

clasifica a estos en función del tamaño de sus partículas. La cual consiste en sacudir la muestra a través de los tamices estandarizados que tienen aberturas pequeñas gradualmente. (MTC, 2016)

Tabla 26: Tamaño de partículas.

MATERIAL DE SUELO		TAMAÑO DE PARTÍCULAS (mm.)
Grava		75 – 4.75
Arena		Arena gruesa: 4.75 – 2.00
		Arena media: 2.00 – 0.425
		Arena fina: 0.425 – 0.075
Material Fino	Limo	0.075 – 0.005
	Arcilla	Menor a 0.005

Fuente: Manual de ensayos de materiales, MTC 2016.

A continuación, se muestran los números estándares de tamices con sus respectivas aberturas en milímetros.

Tabla 27: Tamaños estándar de tamices.

N° Tamiz	Abertura (mm)
3"	75.000
1 ½"	38.100
¾"	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 8	2.360
N° 16	1.100
N° 30	0.590
N° 50	0.297
N° 100	0.149
N° 200	0.075

Fuente: Manual de ensayos de materiales MTC, 2016.

El análisis de los datos se representa de manera gráfica (papel semilogarítmico), el por ciento de pesos acumulados (escala aritmética) y el tamaño de abertura del tamiz en la abscisa (escala logarítmica), con lo cual se determina la curva de distribución de tamaños de las partículas. (Braja Das, 2013 pág. 35)

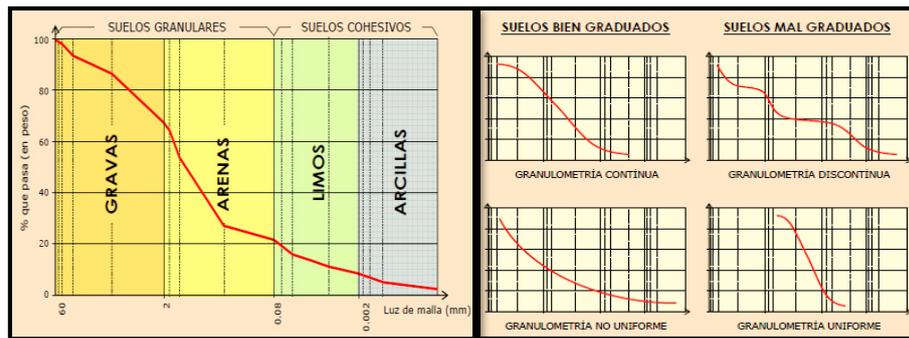


Figura 49 : Curva granulométrica de un suelo e interpretación de la curva.

Fuente: (Bañon, y otros, 2012)

c. Consistencia del suelo

La teoría de la consistencia del suelo, fue desarrollada por Albert Atterberg en 1900, quien menciona que la incorporación de diferentes contenidos de humedad al grano fino, el cual con un contenido de humedad muy bajo el comportamiento del suelo es como un sólido quebradizo, pero cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Debido a esto el comportamiento natural del suelo se divide en cuatro estados básico: sólido, semisólido, plástico y líquido. (Braja Das, 2013 pág. 64)

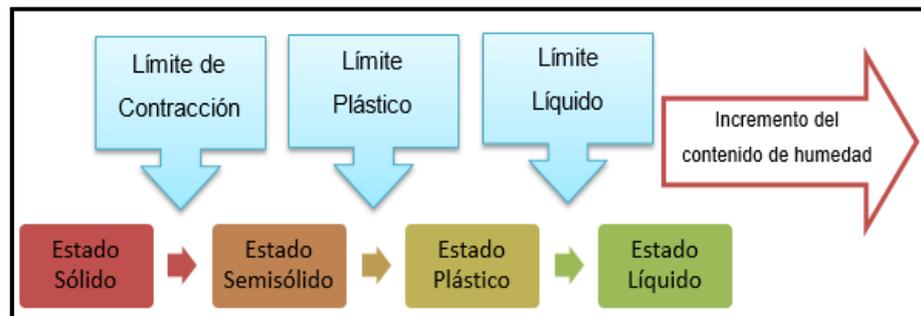


Figura 50: Límites de Atterberg.

Fuente: Elaboración Propia

- **Límite líquido**

La Norma Técnica Peruana (NTP 339.129, 2006), define al límite líquido como la humedad que presenta el suelo, la cual se halla entre el límite del estado líquido y plástico. Esta humedad se determina colocando una masa de suelo en la Copa de Casagrande, el cual es separada con un ranurador, para

luego dejar caer la copa desde una altura de 1 cm, y llegar a cerrar la ranura en 1 cm, con 25 golpes de la cuchara contra la base. El cálculo del límite líquido se realizan mediante las pruebas con diferentes contenidos de humedad, el cual mediante el método gráfico se determina la humedad a los 25 golpes en un gráfico semilogarítmico (humedad versus número de golpes).

- **Límite plástico**

Se define al límite plástico como el contenido de humedad del suelo, al cual un cilindro de suelo de 3 milímetros de diámetro se rompa o resquebraje al formarse esta, la muestra de suelo a usar es con el pasante de la malla N° 40, al igual que para el ensayo del límite líquido. Cabe mencionar que la diferencia del límite líquido y límite plástico se denomina índice de plasticidad del suelo. (NTP 339.129, 2006)

- **Índice de plasticidad**

Representa el comportamiento de un suelo en base a su contenido de humedad, por lo que el suelo podrá trabajar de forma que será capaz de resistir deformaciones sin llegar a una falla.

Tabla 28: Característica del suelo según el índice plasticidad

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO
IP >20	Muy arcillosos
20>IP >10	Arcillosos
10>IP >4	Poco arcillosos
IP=0	Exentos de arcillas

Fuente: (MTC, 2016).

- **Límite de contracción**

(NTP 339.140, 2006), define al límite de contracción como la humedad máxima de un suelo para la cual, una reducción de la humedad no causa una variación del volumen del suelo.

d. Clasificación de los suelos mediante el sistema SUCS

La mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de estos, esto debido a que la naturaleza presenta variedades de suelo, según el tamaño de partículas y la plasticidad que presenta.

- **Suelos gruesos**

Los suelos gruesos vienen a ser las gravas y las arenas, donde si más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N°4 esta pertenece al grupo de las gravas (G), caso contrario pertenecerá al de las arenas (S).

Estos dos grupos se dividen en cuatro grupos más que son GM, GP, GW, GC y SW, SP, SM, SC respectivamente para las gravas y las arenas, esto debido a que estos puedan presentar porcentajes de finos. Los símbolos de GW y GP indican a gravas bien graduadas y a gravas pobremente o mal graduadas respectivamente, de igual manera para aquellos que poseen finos los cuales son GM que indica a una grava limosa y GC a una grava arcillosa. De igual modo en las arenas SW, SP, SM y SC que refieren a arenas bien graduadas, arenas mal graduadas, arenas limosas y arenas arcillosas respectivamente. (Crespo Villalaz, 2004 pág. 92)

- **Suelos finos**

Los suelos finos que son los limos y las arcillas son agrupados en tres grupos con limite liquido menor a 50%, también agrupa en tres grupos aquellos con un límite liquido mayor a 50%, y un solo grupo para suelos finos altamente orgánicos. Si el suelo tiene un límite liquido menor a 50% o sea si el suelo es de compresibilidad baja o media, se añadirá el símbolo L a los prefijos M, C y O, obteniéndose los grupos ML, CL y OL que se les denominaran limos inorgánicos de baja compresibilidad, arcillas inorgánicas de baja compresibilidad y limos orgánicos de baja compresibilidad respectivamente.

Para las turbas que son suelos altamente orgánicos se le designan el símbolo Pt. (Crespo Villalaz, 2004 pág. 93)

Tabla 29: Clasificación SUCS para suelos gruesos.

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo		NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm).	Gravas limpias (sin o con Pocos finos).	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5% >GW, GP, SW, SP. >12% >GM, GC, SM, SC. 5 al 12% >casos límite que requieren usar doble símbolo.	Cu=D60/D10>4 Cc=(D30)2/D10xD60 entre 1 y 3	
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos).	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm).	Arenas limpias (pocos o sin finos).	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cu=D60/D10>6 Cc=(D30)2/D10xD60 entre 1 y 3	
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos).	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.	

Fuente: (Braja Das, 2013)

Tabla 30: Clasificación SUCS para suelos finos.

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo		NOMBRES TÍPICOS
SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	
		OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.	
	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.	
		CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.	
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.	
Suelos muy orgánicos	PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

Fuente: (Braja Das, 2013)

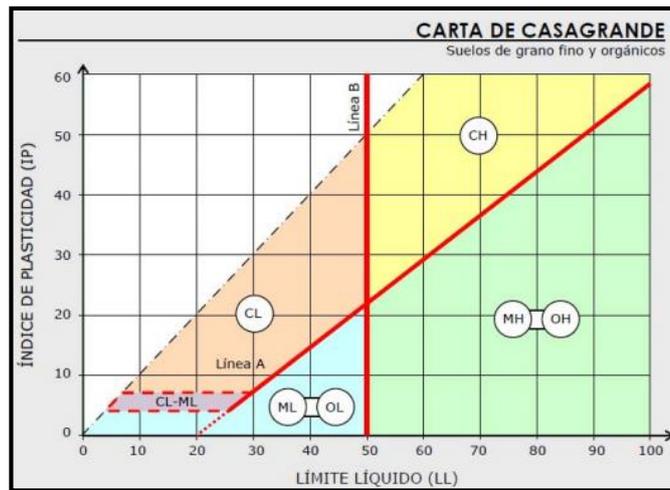


Figura 51: Carta de Casagrande (Suelos finos y orgánicos).

Fuente: (Braja Das, 2013)

e. Clasificación de los suelos mediante el sistema AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO fue desarrollado en 1929 por la Administración de Carreteras de Estados Unidos, el cual clasifica actualmente al suelo en siete grupos principales: los cuales los grupos A-1, A-2 y A-3 son suelos granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través de la malla N° 200 y para suelos donde más de 35% pasa a través de la malla N°200 se clasifica en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 que corresponden a suelos limosos y suelos arcillosos. (Braja Das, 2013 pág. 78)

Tabla 31: Clasificación AASHTO para suelos granulares y finos.

"DIVISIÓN GENERAL		Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM # 200)						Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM # 200)				
GRUPO	A-1		A-3	A-2			A-7					
Subgrupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5	A-7-6
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)												
Serie ASTM	# 10	≤ 50										
	# 40	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
	# 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
ESTADOS DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM # 40)												
Límite Líquido			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	> 41 (IP<LL-30)	> 41 (IP>LL-30)
Índice de plasticidad	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11
ÍNDICE DE GRUPO	0		0	0	≤ 4			≤ 8	≤ 12	≤ 20	≤ 20	
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA						ACEPTABLE A MALA					
IG= (F-35) (0.2+0.005(LL-40))+0.01 (F-15) (IP-10); F: % pasado por el tamiz N° 200, LL: límite líquido; IP: índice plástico."												

Fuente: (Braja Das, 2013)

2.2.6.2. Propiedades mecánicas del suelo

2.2.6.2.1. Resistencia al corte del suelo

El suelo, bajo ciertas sollicitaciones, se comportarán como materiales elásticos, pero en muchas veces tendrá deformaciones mayores del normal, por lo que será un factor predominante el considerar la plasticidad del suelo.

- Resistencia máxima o resistencia pico.

La resistencia pico, “es la resistencia al corte máximo que posee el material que no ha sido fallado previamente, la cual corresponde al punto más alto de la curva esfuerzo-deformación. La utilización de la resistencia pico en el análisis de estabilidad asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla. Sin embargo, algunos puntos en la superficie de falla han alcanzado deformaciones mayores que en otros, en un fenómeno de falla progresiva y asumir que la resistencia pico actúa simultáneamente en toda la superficie de falla puede producir errores en el análisis”. (Alva Hurtado, 2011)

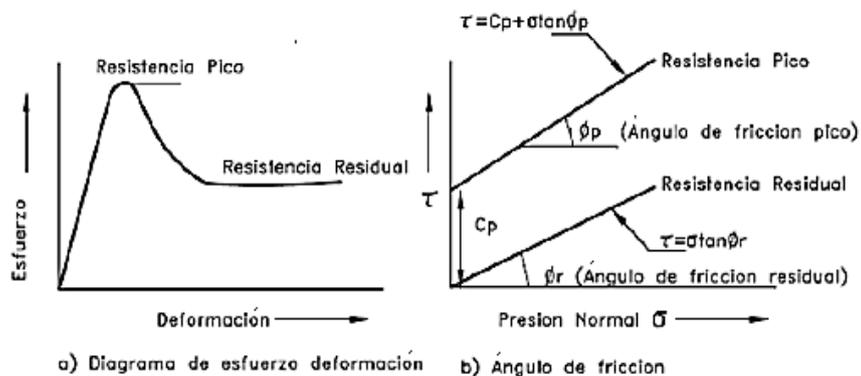


Figura 52: Diagrama de esfuerzo – deformación.

Fuente: (Braja Das, 2008)

- Resistencia residual

Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla.

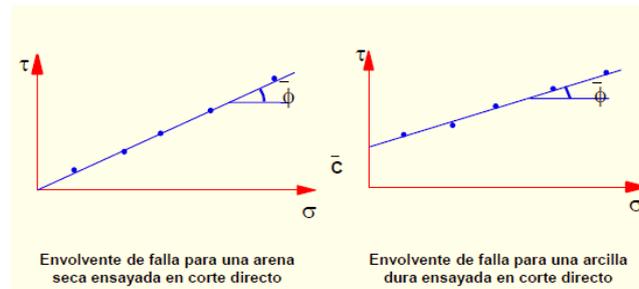


Figura 53: Envoltorio de falla para arena y arcilla ensayada en corte directo.

Fuente: (Alva Hurtado, 2011)

2.2.7. Ensayos de suelos

a. Ensayo para determinar el contenido de humedad

El propósito de este ensayo es determinar el contenido de humedad que presenta una cantidad de suelo, en términos de su peso seco.

Procedimiento:

1. Se tomaron muestras de material, transportados dentro de bolsas plásticas.
2. Pesado de la muestra húmeda representativa (W húmedo).
3. Secado en el horno a 105°C durante 24 horas.
4. Pesado de la muestra seca (W seco).
5. Cálculo de humedad con la siguiente formula.

$$w(\%) = \frac{W_{\text{humedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \times 100$$



Figura 54: Secado en el horno de la muestra representativa.

Fuente: Elaboración Propia.

Normas de referencias:

- NTP 339.151: Practicas estándar para la preservación y transporte de suelos.
- NTP 339.127: Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo.

b. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado

La finalidad de este ensayo es la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas del suelo, mediante el empleo de tamices estandarizadas desde 3" (76.200 mm) hasta la N°200 (0.074 mm). Para ello la masa de suelo a ensayar dependió del tamaño máximo de las partículas.

Tabla 32: Masa mínima de la porción de suelo según el tamaño máximo.

Tamaño de partículas más grandes pulg. (mm)	Porción Aproximada de Masa Mínima (gr)
3/8" (9.5)	500
3/4" (19.0)	1000
1" (25.4)	2000
1 1/2" (38.1)	3000
2" (50.8)	4000
3" (76.2)	5000

Fuente: NTP 339.128.

Procedimiento:

1. Se homogeniza mediante el cuarteo de la muestra natural.
2. Si la muestra encontrada es arcillosa y arenas con limos, estos se tratarán por la vía húmeda ya que presentan terrones, por lo que se cubre con agua para que se ablanden las partículas.
3. Se procede a lavar con el tamiz N° 200, teniendo el cuidado que las partículas finas no se pierdan. La muestra lavada, se coloca al horno para su secado.
4. Se tamiza la muestra seca por las mallas desde la 3" hasta la N° 200, obteniendo los pesos retenidos en cada una de estas.



Figura 55: Tamizado de la muestra representativa.

Fuente: Elaboración Propia.

Normas de referencias:

- NTP 339.128: Método de ensayo para el análisis granulométrico por tamizado.

c. Ensayo para determinar el límite líquido de suelos

El límite líquido se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de 12.7 mm, mediante 25 golpes.

Procedimiento del límite líquido: Determinación del límite líquido por el método de multipunto:

1. Lo primero es ajustar y verificar la Copa de Casagrande.
2. La muestra a usar es la pasante del tamiz N° 40, la que se mezclará con 15 a 20 ml de agua, amasándola con la espátula. Los incrementos de agua serán de 1 a 3 ml.
3. Se coloca una parte de la mezcla en la Copa de Casagrande, verificando que este nivelado y emparejado a una altura de 1 cm en el punto de profundidad máxima.
4. Se divide la mezcla a través del centro de la cuchara de la Copa de Casagrande.

5. Se procede a girar la manija a una velocidad de 2 golpes por segundo, el ensayo terminará cuando las dos mitades de la mezcla se junten en el fondo de la ranura a lo largo de 1.3 cm aproximadamente, y se anotará el número de golpes realizados.
6. Cuando el suelo tiende a deslizarse en el momento de los golpes de la copa de Casagrande, deberá de agregarse más agua y volver a mezclar, si a pesar de esto sigue deslizándose con un número de golpes menor a 25, entonces el suelo no presenta límite líquido.
7. Se procede a tomar una parte de suelo del ancho de la espátula, para colocarlas en un recipiente para determinar el contenido de humedad.
8. Se repite el procedimiento para cada mezcla de suelo ensayada.
9. Los golpes para cerrar la ranura del suelo deben encontrarse entre los intervalos de 25 a 35, 20 a 30, 15 a 25, con el propósito de tener muestras con consistencia cercanas a las requeridas.

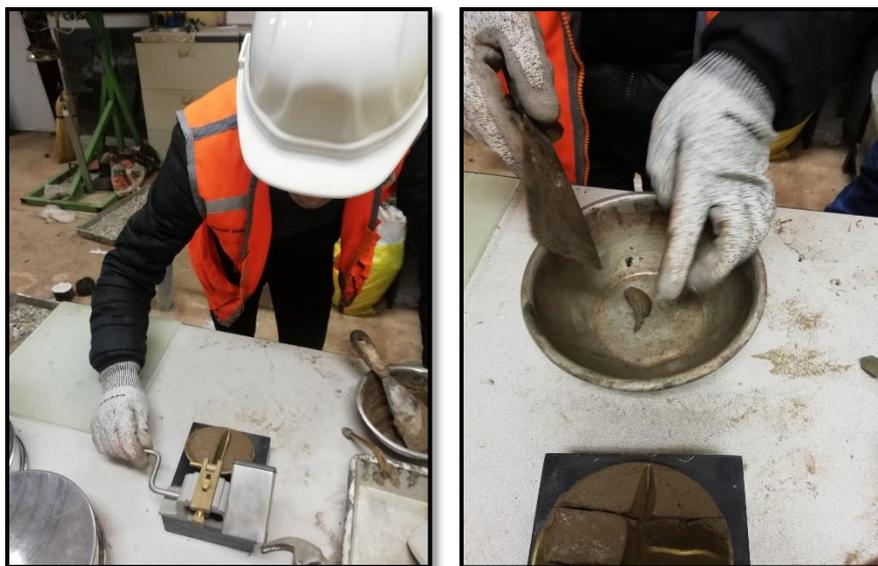


Figura 56: Determinación del límite líquido de la muestra representativa.

Fuente: Elaboración Propia.

Normas de referencias:

- NTP 339.129: Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

d. Ensayo para determinar el límite plástico e índice de plasticidad de suelos

El límite plástico consiste en determinar la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de unos 3 mm de diámetro, sin que estos se desmoronen, es decir, el punto límite entre el estado plástico y semisólido.

Procedimiento del límite plástico:

1. Con la mezcla de suelo del ensayo de límite líquido, se moldea en forma de elipsoides con los dedos sobre la superficie lisa del vidrio, hasta conseguir formar cilindros.
2. Si antes de llegar a 3.2 mm de diámetro de los cilindros, no se ha desmoronado o se formó grietas a su alrededor, se vuelve a realizar el proceso cuantas veces sea necesario, hasta que se logre el agrietamiento o desmoronamiento con dicho diámetro aproximadamente.
3. El cilindro debe tener aproximadamente 3 mm de diámetro cuando empiece a desmoronarse o agrietarse.
4. Se debe tener aproximadamente entre 6 a 8 gramos de porciones agrietadas, para proceder a determinar el contenido de humedad.
5. Para determinar el índice de plasticidad del suelo se realiza mediante la diferencia del límite líquido y límite plástico.



Figura 57: Determinación del límite plástico de la muestra representativa.

Fuente: Elaboración Propia.

Normas de referencias:

- NTP 339.129: Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

e. Ensayo para determinar el Peso volumétrico de suelo cohesivo

El termino de peso específico del suelo, se aplica comúnmente a la relación de peso de la masa de suelos entre su volumen de masa, se le conoce como densidad del suelo, o como peso unitario o peso específico volumétrico. El valor del peso volumétrico del suelo, además de servir para fines de clasificación, también es un parámetro muy importante en las pruebas estandarizadas y cálculos de la mecánica de suelos.

Procedimiento del peso específico de suelos:

1. Previamente se debe tallar una muestra sin agujeros ni grietas, el tamaño a elegir debe ser tal que pueda introducirse en la probeta de medición de volumen.
2. Se debe pesar la muestra tallada y anotarlo.
3. Derretir previamente la parafina en el horno o estufa.
4. Dejar enfriar ligeramente la parafina, para luego cubrir la muestra impermeabilizándola. Como sugerencia la parafina debe cubrir la muestra en una capa fina, y no debe penetrar en los poros del suelo.
5. Cuando la muestra esté completamente recubierta con la parafina, registrar el peso.
6. Luego llenar la probeta de medición de volumen con agua hasta un volumen inicial conocido, registrar este volumen inicial.
7. Introducir la muestra parafinada en la probeta, con lo cual se anotará el volumen desplazado por esta.
8. Por ultimo realizar los cálculos con los datos anotados.



Figura 58: Determinación del peso específico de la muestra representativa.

Fuente: Elaboración Propia.

Normas de referencias:

- NTP 339.139: Método de ensayo para determinar el peso volumétrico de suelo cohesivo.

f. Ensayo de Corte Directo

El propósito de este ensayo, fue determinar la resistencia al corte, y además determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna de una muestra de suelo, sometida a fatigas, esfuerzos y deformaciones que simulen en el terreno. Este ensayo permitió deslizar una fracción de suelo, respecto a otra o a lo largo de un plano de falla predeterminado mediante la acción de una fuerza de corte horizontal incrementada, mientras se aplica una carga normal al plano del movimiento. Este ensayo se realizará de acuerdo a lo especificado en la norma MTC E 123, el cual es el ensayo de Corte Directo (Consolidado Drenado).

Procedimiento:

1. Antes de realizar el ensayo se pesa la muestra de suelo para los 3 especímenes a ensayar, en este caso utilizaremos 1 kg, luego se procederá a tamizar a través del tamiz N°4, el ensayo se realiza con muestras a la misma densidad y humedad.

2. Previamente se tiene que ensamblar la caja de corte, colocamos la muestra de suelo y la piedra porosa.
3. El espesor mínimo de la muestra de ensayos, debe ser alrededor de 12 mm (1/2"), pero no menor de un sexto del tamaño máximo de las partículas del suelo.
4. Colocamos la carga vertical, nivelamos, colocamos el pistón de carga y colocamos el dial para determinar el desplazamiento vertical.
5. Se debe permitir una consolidación de 30 minutos para cada ensayo utilizando tres ensayos para cada uno, aplicando diferentes cargas de 2, 4 y 8 kg como cargas normales.
6. Se conecta el dispositivo de carga y se ajusta el dial para medir tanto la deformación durante el corte, como el cambio del espesor inicial.
7. Durante el proceso de la consolidación debemos registrar la deformación de normal en tiempos apropiados, antes de aplicar un nuevo incremento de la fuerza.
8. Cada incremento de la fuerza normal debe durar hasta que se complete la consolidación primaria.



Figura 59: Determinación de los parámetros de resistencia del suelo.

Fuente: Elaboración Propia.

Expresión de resultados:

- Obtener el esfuerzo normal para cada prueba, el cual corresponde a la fuerza normal aprovechada sobre la caja dividido en su área.

- Obtener el esfuerzo de corte de cada punto donde se tomó lectura, para lo cual será necesario dividir la fuerza cortante en el área corregida.
- Hacer un gráfico de tensión cortante versus deformación de todos los puntos para cada prueba y determinar el esfuerzo cortante máximo para cada ensayo.
- Una vez que se tiene el esfuerzo cortante máximo y el esfuerzo normal de cada ensayo, se proceden a graficar estos tres puntos en un gráfico de esfuerzo de corte (τ) versus esfuerzo normal (σ_n), para luego trazar una recta que se aproxime lo más posible a estos 3 puntos, lo cual dará origen a una recta que debe satisfacer la ecuación de Coulomb. Según la ecuación obtenida, la resistencia al corte dependerá de la cohesión (c) y la fricción interna del suelo (ϕ).

Normas de referencias:

- NTP 339.171: Método de ensayo de corte directo.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

- **Talud natural:** Son terrenos inclinados que no han sido intervenidos por el hombre. Su conformación se da como parte de un proceso natural, comúnmente, se les llaman laderas.
- **Propiedades físicas del suelo:** Las propiedades físicas del suelo son las que se definen como las propiedades obtenidas con los ensayos físicos, mas no ensayos de resistencia, como contenido de humedad, límites de consistencia, granulometría, etc.
- **Propiedades mecánicas del suelo:** Las propiedades mecánicas del suelo son las que se definen como las propiedades obtenidas con los ensayos que se relacionan con la resistencia, deformabilidad y estabilidad, como ensayos de compactación, ensayos de corte, etc.
- **Coluvión:** Es una masa de materiales sueltos y heterogéneos, estos pueden ser de suelo o de fragmentos de roca depositados por lavado de la lluvia, reptación o deslizamiento que comúnmente se depositan en las bases de las laderas.

- **Talud artificial:** Se da cuando el hombre modifica el estado natural del terreno creando así cortes o terraplenes (rellenos).
- **Erosión:** Comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento.
- **Análisis de estabilidad de talud:** Implica comparar el esfuerzo cortante que actúa a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo.
- **Pasto vetiver:** Es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas, la cual su nombre botánico es *Vetiveria Zizanioides*.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS

3.1.1. Tipo de investigación

La presente tesis corresponde al TIPO APLICADA porque estudió la asociación y/o relación de las variables; para el presente estudio se planteó identificar la variabilidad de estabilidad del talud mediante la aplicación de la técnica de la bioingeniería en zonas tropicales empleando cultivo de pastos vetiver, así como se determinó las características físicas y mecánicas del suelo del talud. Asimismo, según el planteamiento del problema y con el propósito de probar la hipótesis planteada se eligió el enfoque cuantitativo teniendo como fundamento a (Ccanto Mallma, 2010) que refiere: “representa un conjunto de procesos organizado de manera secuencial para comprobar ciertas suposiciones y es apropiada cuando queremos estimar las magnitudes u ocurrencia de los fenómenos y probar hipótesis”.

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel para la presente investigación es EXPLICATIVO, debido a que se especifica mediante el uso de cultivos de pastos vetiver, así como también el desarrollo de ensayos de suelos en laboratorio para determinar las propiedades mecánicas del suelo con inclusión de elementos biológicos como es el pasto Vetiver, y su posterior análisis de estabilidad de dicho talud. En su fundamento se tiene a (Hernandez Sampieri, y otros, 2010), que mencionan que este nivel “es más que describir conceptos o fenómenos o establecimiento de relaciones entre conceptos. Se centra en explicar por qué ocurre un

fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relaciona dos o más variables”.

3.1.3. Diseño de investigación

Esta investigación es CUASI-EXPERIMENTAL porque no se modifica en su totalidad las variables, ya que la recolección de datos se obtiene del muestreo del talud tal como se da en su contexto natural; es decir, se recolecta los datos en un solo momento y la toma de datos que se realiza es en un tiempo único, correspondiente a un diseño de corte TRANSVERSAL, en su fundamento teórico se refiere a (Hernandez Sampieri, y otros, 2010) que describen: “es la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables; es decir, se trata de estudios en los que no hacen variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables”.

3.1.4. Método de investigación

Para la recolección de datos de la presente investigación se accede a la toma de datos en campo del talud en estudio; por lo tanto, el método es CIENTÍFICO del tipo cuantitativo porque nos permite cuantificar, medir, proyectar y evaluar los datos obtenidos en el análisis de estabilidad de talud empleando la técnica de bioingeniería para la estabilización y control de erosión de taludes utilizando cultivos de pastos vetiver, para ser usados como alternativas ecológicas en el control de inestabilidad del talud; y fundamentado por (Hernandez Sampieri, y otros, 2010) que describen: “se utilizan procesos sistemáticos, reflexivos y empíricos en su esfuerzo de generar conocimiento, valiéndose de las siguientes estrategias: observación y evaluación de fenómenos, establecimiento de suposiciones como consecuencia de la observación y evaluación”.

3.1.5. Población y muestra

3.1.5.1. Población

Según el planteamiento de la investigación, la población tomada para este estudio fueron los TALUDES CON TENDENCIA A DESLIZAMIENTO EN LA CARRETERA POZUZO – SANTA ROSA. Se fundamenta esta teoría en (Borja S., 2012) que refiere a población como “el conjunto de elementos o sujetos que serán motivo de estudio”.

3.1.5.2. Muestra

Según el planteamiento del problema, la muestra seleccionada obedeció al criterio de determinar la mejora de estabilidad del TALUD DE LA PROGRESIVA 33+450 KM DE LA CARRETERA POZUZO – SANTA ROSA, a la cual se realizaron los ensayos de contenido de humedad, granulometría, límites de consistencia, peso específico y ensayos de corte directo, para su posterior análisis de estabilidad de talud aplicando la bioingeniería de pastos vetiver. Fundamentada según (Borja S., 2012) el cual refiere a la muestra como: “la unidad del objeto de estudio procedente de una población”.

El muestreo fue no probabilístico e intencional, ya que la elección de los elementos de muestra no depende de la probabilidad. Estas técnicas siguen otros criterios de selección (conocimientos del investigador, economía, comodidad, alcance, etc.), procurando que la muestra obtenida sea lo más representativa posible.

3.1.6. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizó la técnica de la observación, ya que todos los resultados y recopilación de información se obtuvieron y registraron mientras se realizaron el levantamiento topográfico: los ensayos del suelo en laboratorio, análisis de estabilidad de talud, así como la recolecta directa de información. Lo fundamentado según Ccanto Mallma, 2010 refiere que, las técnicas de recolección de datos son: “los medios por los cuales el investigador recoge la información requerida de una realidad en función a los objetos de estudio”.

- Se tomaron la información de los diferentes estudios a los pastos vetiver, como, por ejemplo: características de las raíces, propiedades de resistencia de las raíces, técnicas de cultivación, técnicas de plantación, climas apropiados, etc.
- Se tomaron los datos del levantamiento topográfico y de los diferentes ensayos del suelo realizados, de acuerdo a los tipos de suelo encontrados.
- Se tomaron los datos del análisis de estabilidad del talud.

3.1.7. Instrumentos de recolección de datos

Se utilizó como instrumento de recolección, las fichas de campo (formatos excel de levantamiento topográfico - Dron) y fichas de ensayos de laboratorio de suelos (formatos

excel de pruebas estandarizadas en base a las normas técnicas), como fuente base se toma a Ccanto Mallma, 2010, quien señala que, la recolección de datos a través de ciertas técnicas e instrumentos implica tres procesos, los cuales no siempre aparecen juntos en el mismo instrumento: la captación, el registro y la medición.

Los instrumentos de medición empleados en esta investigación fueron:

- Equipo de Dron (fotogrametría del talud).
- Horno eléctrico (contenido de humedad).
- Tamices estandarizados (granulometría).
- Copa de Casagrande (límites de consistencia).
- Equipo de corte directo (parámetros de resistencia).
- Software Slide V6.0 (análisis de estabilidad de talud).

3.1.8. Técnicas de análisis de datos

Las técnicas de análisis de datos ayudaron a organizar, e interpretar los datos recogidos con los instrumentos de investigación. La primera técnica para el análisis de los datos e interpretación de los resultados fue el método gráfico (análisis de estabilidad del talud). La organización de los datos se organizó en una matriz de tabulación (excel), estos datos fueron recopilados y se fueron almacenando a medida que los demás datos se obtenían (ensayo de suelos). La descripción y análisis de los datos se hicieron mediante las técnicas de análisis cuantitativo y cualitativo, que nos sirvió para mostrar las variaciones de los análisis de estabilidad del talud con cultivos de pastos vetiver.

3.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología que se siguió para el desarrollo de la investigación fue la siguiente:

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS DE INVESTIGACION

II. REVISIÓN DE INFORMACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

- Estudio topográfico del talud en estudio
- Estudio geotécnico del talud en estudio
- Caracterización física y mecánica del suelo
- Evaluación de resistencia de raíces del pasto vetiver

III. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

- Análisis de estabilidad Estático y Pseudoestático sin aplicación de bioingeniería
- Análisis de estabilidad Estático y Pseudoestático con aplicación de bioingeniería

IV. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 60: Procedimiento metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Localización de la zona de estudio y búsqueda de información

3.2.1.1. Ubicación de la zona de estudio

Para un mejor alcance de la investigación, se identificó el lugar de estudio, en la cual se realizó el levantamiento topográfico y muestreo de suelos que serían representativos para la tesis. El talud de estudio está ubicado dentro de la carretera Pozuzo – Santa Rosa en la progresiva 33+450 km, localizada en la provincia de Oxapampa, región Pasco.



Figura 61: Localización y ubicación política de la zona de estudio.

Fuente: Municipalidad Provincial de Oxapampa - Pasco.

3.2.1.2. Condición actual del talud en estudio

A la fecha del desarrollo del proyecto de investigación, el talud en estudio presenta deslizamientos y erosiones, y como se muestra. Este tipo de problema es frecuente a lo largo de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, entonces se debe realizar estas estabilizaciones para solucionar esta problemática.

Estratigráficamente, presenta una superficie compuesta por suelos de media cohesividad (arenas con arcillas), intercalado con estratos de baja cohesividad (arenas con limos). Debajo de los estratos mencionados, subyace un suelo de alta cohesividad (suelo duro – roca arenisca).

Una vez realizada la descripción del talud, se procede a la descripción de un diagnóstico acerca de la problemática y situación actual del talud en estudio. En las mismas, se evidencian problemas de zonas susceptibles a deslizamientos, causadas por la erosión continua del talud, que provoca condiciones de inestabilidad. Los agentes erosivos naturales se relacionan a factores climáticos y meteorológicos.

El ambiente presente en la zona de estudio, debido a las variaciones de temperatura durante el día, propicia un agente erosivo, que, aunque con efectos menos perceptibles a corto plazo, estas contribuyen en los procesos erosivos y posterior deslizamiento del talud.



Figura 62: Situación actual del talud en estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2. Trabajos de campo

3.2.2.1. Estudio topográfico

A continuación, se presenta el levantamiento topográfico del talud en estudio, el cual fue realizado mediante el método de la fotogrametría haciendo uso de un dron.



Figura 63: Levantamiento topográfico del talud en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la configuración y superficie del talud en estudio, se realizó la toma de datos con uso del dron, para luego realizar los trabajos de gabinete los cuales consistieron en el procesamiento de datos obtenidos en campo y el desarrollo de la superficie topográfica y perfil longitudinal del talud.

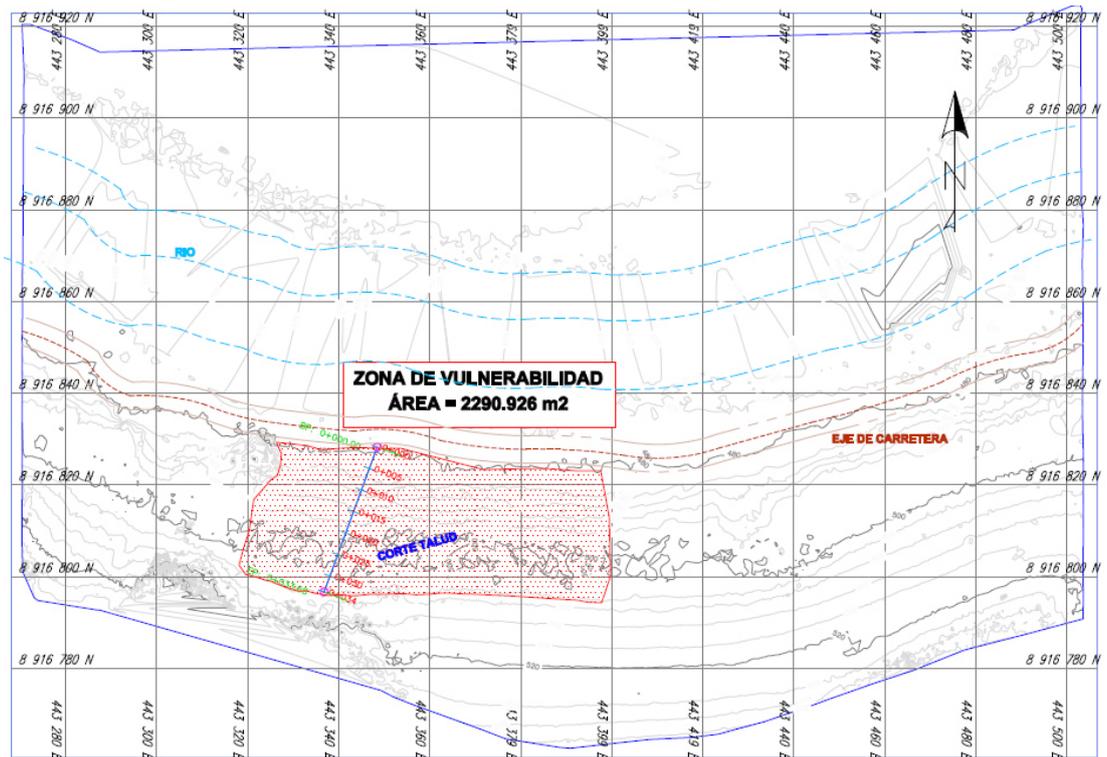


Figura 64: Superficie topográfica del talud en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

De manera preliminar se puede establecer que el talud tiene una longitud vertical de pie a cabeza aproximada de 19.85 m, con una distancia horizontal de 33.50 m en su parte central. Así mismo posee una pendiente promedio de 36.40° con respecto a la horizontal.

3.2.2.2. Estudio geotécnico

En esta etapa se extrajeron las muestras de suelos del talud de estudio, las cuales nos sirvieron para:

- Realizar la investigación geotécnica del talud, con el objetivo de asignar las propiedades mecánicas a los diferentes tipos de suelos que lo conforman.
- Verificar la estabilidad del talud, determinando así las causas de los deslizamientos.
- Implementar la alternativa de la bioingeniería usando pastos vetiver, dando así solución frente al talud inestable.

Cabe mencionar que aquí se tomaron las muestras de suelos de los diferentes estratos identificados visualmente. Además, se tomaron muestras inalteradas y alteradas de los suelos tanto con y sin presencia de raíces.



Figura 65: Toma de muestras de los puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

Se ubicaron los puntos de muestreo, 2 puntos en la parte inferior y 2 puntos en la parte superior del talud para la extracción de la muestra, con la finalidad de establecer las propiedades del suelo en el laboratorio, además se extrajo una cantidad considerable de material para realizar los ensayos.

3.2.3. Trabajos de laboratorio

En esta etapa se realizaron los ensayos del suelo para determinar los contenidos de humedad, granulometría por tamizado, límites de consistencia y peso específico. Una vez caracterizados los suelos, se tomaron muestras inalteradas de los suelos tanto con y sin presencia de las raíces del vetiver para realizar los ensayos de corte directo. Se llegó a determinar los parámetros de resistencia de estas con las dos condiciones planteadas. Para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, se realizaron mediante los procedimientos establecidos en las Normas Técnicas mostradas a continuación:

Tabla 33: Normas técnicas de ensayos del suelo.

ENSAYOS	Norma NTP	Norma MTC	Norma ASTM
PROPIEDADES FÍSICAS			
Contenido de Humedad del suelo	NTP 339.127	MTC E 108	ASTM D 2216
Análisis Granulométrico por Tamizado	NTP 339.128	MTC E 107	ASTM D 422
Límite líquido de los suelos	NTP 339.129	MTC E 110	ASTM D 4318
Límite plástico de los suelos e índice de plasticidad	NTP 339.129	MTC E 111	ASTM D 4318
Clasificación de los suelos métodos SUCS	NTP 339.134		
Clasificación de los suelos método AASHTO	NTP 339.135		
Peso Volumétrico de suelo cohesivo	NTP 339.139		
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Ensayo de Corte Directo	NTP 339.171	MTC E 123	ASTM D 3080

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34: Cantidad de ensayos de laboratorio realizados.

CANTIDAD DE ENSAYOS DEL SUELO				
ENSAYOS	CALICATAS			
	C-01	C-02	C-03	C-04
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO				
Contenido de Humedad	1	1	1	1
Análisis Granulométrico por Tamizado	1	1	1	1
Límite líquido	1	1	1	1
Límite plástico	1	1	1	1
Peso Volumétrico	1	1	1	1
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO				
Corte Directo sin presencia de raíces de Vetiver	1		1	
Corte Directo con presencia de raíces de Vetiver	1		1	

Fuente: Elaboración propia.

Se realizarán 24 ensayos en laboratorios. Cabe mencionar que la cantidad que se necesitó para realizar los ensayos mencionados, se determinó de acuerdo a lo requerido por tipo de ensayo en las normas técnicas.

3.2.4. Procesamiento y análisis de datos obtenidos

Una vez terminada la recolección de información, se procedió a procesar los datos obtenidos del ensayo de corte directo para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo, de las muestras sin presencia de raíces de pastos vetiver, así como de las muestras con presencia de raíces de pastos vetiver.

3.2.5. Casos de aplicación

En esta parte de la investigación se realizó los análisis de estabilidad del talud en estudio. Se puso en práctica un software de modelación geotécnica disponible y de libre

acceso para determinar y analizar la estabilidad del talud con y sin la presencia de cultivos de pastos vetiver.

3.2.5.1. Análisis estático y pseudoestático de estabilidad de talud sin presencia de pastos vetiver

Se realizó el análisis de estabilidad del talud utilizando métodos de equilibrio límite. Se utilizaron los parámetros de resistencia como son: el grado de cohesión, ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo con la finalidad de asignar y definir las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de suelos que conforman el talud. Luego se verificó la estabilidad del talud mediante los factores de seguridad de estabilidad.

3.2.5.2. Análisis estático y pseudoestático de estabilidad de talud con presencia de pastos vetiver

Además de los parámetros de resistencia, se utilizaron datos como el diámetro total y la profundidad del sistema radicular del pasto vetiver, con la finalidad de definir los límites de las columnas en el modelo del programa de análisis, teniendo en cuenta los espaciamientos verticales y horizontales de siembra del pasto. El propósito del análisis de taludes introduciendo el aporte del pasto vetiver, fue validar si el efecto de las raíces del vetiver tiene la capacidad de incrementar el factor de seguridad de estabilidad del talud, con lo cual también podemos analizar las configuraciones de sembrado de los pastos vetiver.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Caracterización de la zona de estudio

4.1.1.1. Ubicación de la zona de estudio

Para un mejor alcance de la investigación, se identificó el lugar de estudio, en la cual se realizó el levantamiento topográfico y muestreo de suelos que serían representativos para la tesis. El talud de estudio está ubicado dentro de la carretera Pozuzo – Santa Rosa en la progresiva 33+450 km, localizada en la provincia de Oxapampa, región Pasco.



Figura 66: Localización y ubicación política de la zona de estudio.

Fuente: Municipalidad Provincial de Oxapampa - Pasco.

4.1.1.2. Topografía de la zona de estudio

Para un mejor alcance de la investigación, se identificó el lugar de estudio, en la cual se realizó el levantamiento topográfico mediante la fotogrametría usando dron. Cabe mencionar que, el área de estudio está ubicada dentro de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, localizada en la provincia de Oxapampa, región Pasco.

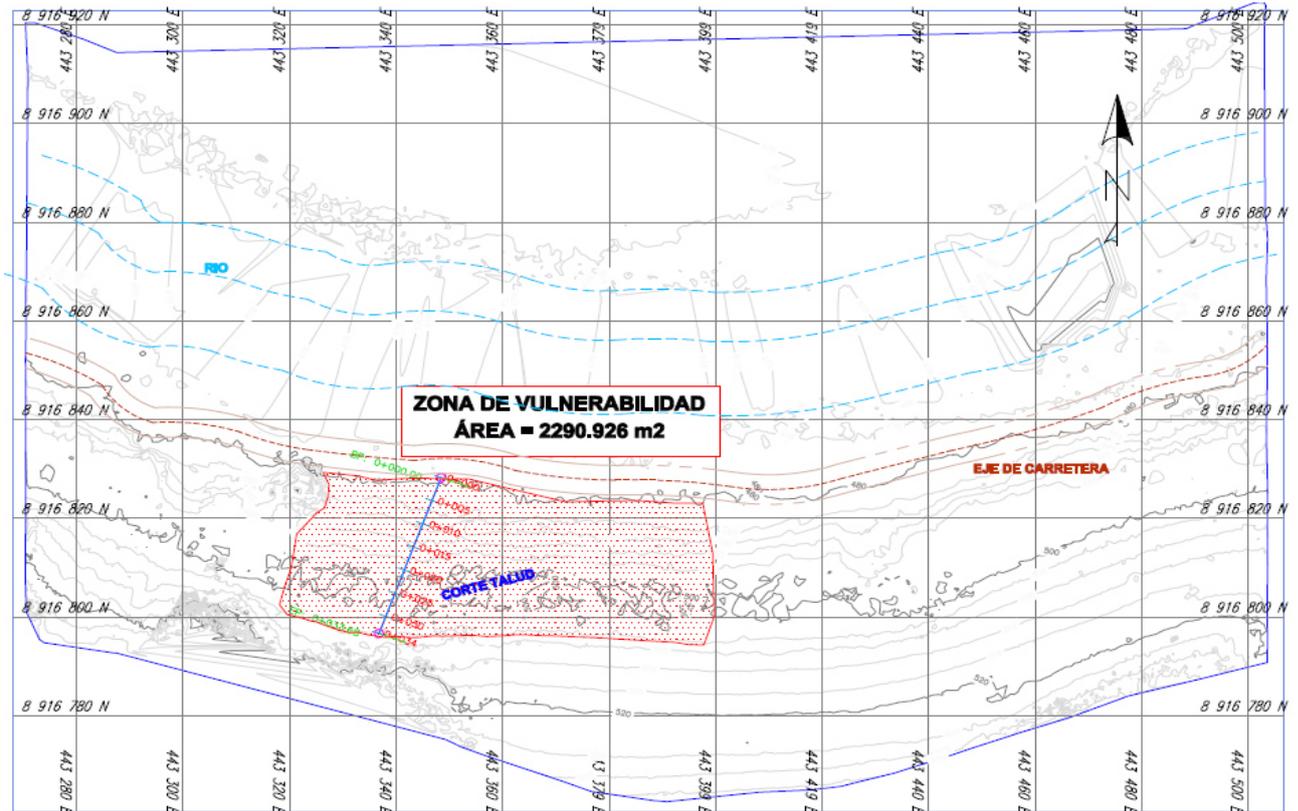


Figura 67: Plano topográfico de la zona de estudio. (Anexo 3)

Fuente: Elaboración propia.

La topografía de la zona de estudio representa el aspecto más importante con respecto a los fenómenos de deslizamientos. A continuación, se muestran las características geométricas del talud en estudio.

Tabla 35: Características geométricas del talud.

PARÁMETRO	UNIDAD	TALUD EN ESTUDIO
Pendiente media	% (°)	73.73 (36.40) (1.4 H : 1 V)
Distancia vertical (pie a cabeza)	M	19.85
Distancia horizontal	M	33.50
Ancho de escarpe	M	80.20

Fuente: Elaboración propia.

La pendiente representa un rol significativo en la erosión e inestabilidad de taludes. Entre los parámetros más importantes que describe la topografía del talud se encuentra la pendiente media natural, distancia vertical de pie a cabeza del talud, distancia horizontal y ancho de escarpe, entre otros.

4.1.1.3. Condición actual del talud en estudio

A la fecha del desarrollo del proyecto de investigación, el talud en estudio tenía una longitud de ancho de escarpe aproximada de 80.20 m y alcanzaba una altura de 19.85 m de pie a cabeza en su parte central. Su distancia horizontal era de 33.50 m, su inclinación de pendiente de 36.40° . En este talud ocurren deslizamientos y erosiones y, que como se evidencia en la longitud, es un problema que se debe solucionar.

Cabe mencionar que la norma (CE.020, 2019) ítem “7.1.1. *Evaluación de la condición de estabilidad de un talud*”, menciona que, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales geotécnicos se determinan mediante ensayos de campo y laboratorio, de acuerdo al tipo de material e importancia de la obra, cuya decisión le compete al profesional responsable. Y para el análisis de estabilidad del talud en roca y suelos es necesario realizar los estudios geotécnicos, que permitan caracterizar los materiales y evaluar los parámetros de diseño que el profesional responsable considere necesario, a fin de obtener la estabilidad del talud.

En tal sentido, en el tema de taludes, es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones. El número de perforaciones se pueden incrementar dependiendo del tamaño del talud. Se puede hacer una perforación en la cresta con una profundidad aproximada de 1,5 veces la altura del talud, otra hacia la mitad del talud con una profundidad comparable con la altura de ese talud y, una última, al pie del mismo con una profundidad aproximada de $1/3$ de la altura mencionada o mediante el muestreo mediante excavación a cielo abierto.

En base a lo mencionado anteriormente, y como se mencionó en el capítulo 3, el muestreo de la investigación fue de tipo no probabilístico. Se obtuvieron 4 muestras no probabilísticas de suelo ubicadas en la cresta y pie del talud,

estas fueron de calicatas a cielo abierto. Además, para el tema de exploración del talud (sondeo) y determinar la estratigrafía del área de estudio, se registró cortes de talud como un muestreo de observación, ya que, por temas de limitantes en la investigación, no se realizaron ensayos de perforación como son las pruebas de penetración estándar (SPT), penetración de cono (CPT), corte directo in situ, etc.



Figura 68: Muestreo del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 69: Caracterización del suelo del talud en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

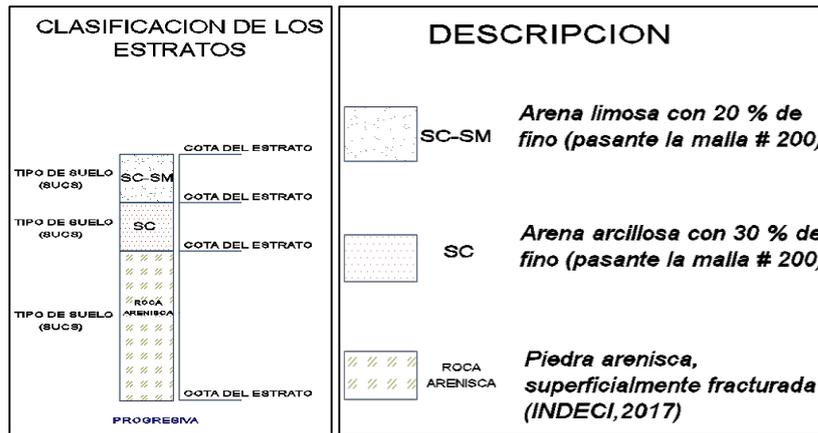


Figura 70: Clasificación de los estratos del talud en estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez caracterizado el suelo y, con el registro de campo que se realizó, se pudo determinar la estratigrafía del talud.

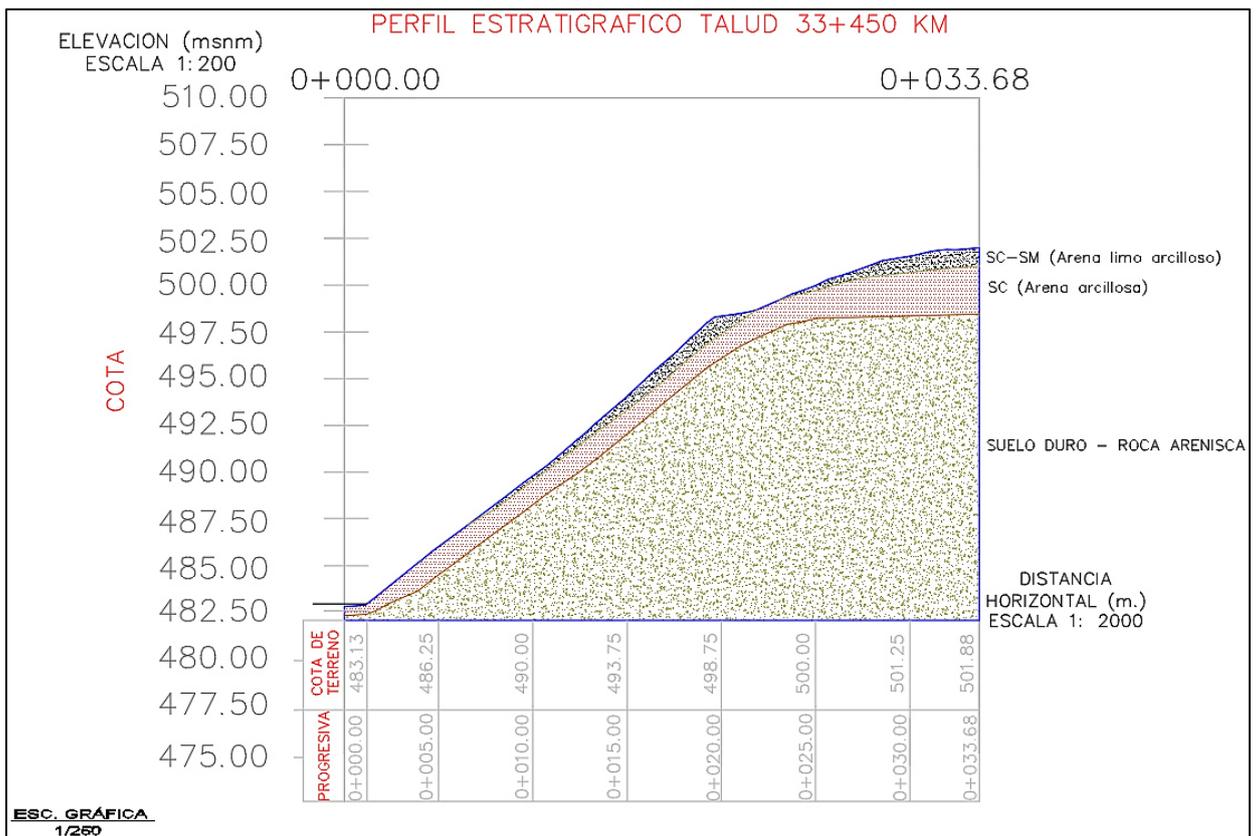


Figura 71: Perfil estratigráfico del talud en estudio. (Anexo 5)

Fuente: Elaboración propia.

Estratigráficamente presenta una superficie compuesta por suelos de media cohesividad (arenas con arcillas), intercalado con estratos de baja cohesividad

(arenas con limos). Debajo de los estratos mencionados, subyace un suelo de alta cohesividad (suelo duro – roca arenisca). Se evidencian problemas de zonas susceptibles a deslizamientos, causadas por la erosión continua del talud, los cuales son condiciones de inestabilidad que presenta el talud.

4.1.2. Estudio Hidrológico de la zona de estudio

En la zona de estudio, existen 4 estaciones meteorológicas: estación Oxapampa, Pozuzo, Puerto Inca y Puerto Bermúdez cercanas al talud de investigación, que permitió obtener una información directa de las precipitaciones, las mismas que se procesaron para determinar la precipitación media. En los anexos se muestran la información de precipitaciones diarias (SENAMHI).

Tabla 36: Resumen del cálculo de la precipitación registrada mensual.

RESUMEN DEL CACULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA					
Departamento :	PASCO	Provincia :	OXAPAMPA	Distrito :	POZUZO
Latitud :	10°03'01" S	Longitud :	75°33'01" W	Altitud :	1000 msnm.
Día/Mes/Año	Precipitación registrada mensual (mm)				
	Estación Oxapampa	Estación Pozuzo	Estación Puerto Inca	Estación Puerto Bermúdez	PROMEDIO (mm)
01/01/2017	302.30	446.30	422.30	17.90	297.20
01/02/2017	234.40	288.60	379.30	568.30	367.65
01/03/2017	277.40	336.50	252.30	321.40	296.90
01/04/2017	110.00	368.50	201.00	0.00	169.88
01/05/2017	115.90	210.20	104.40	446.30	219.20
01/06/2017	6.60	9.40	19.60	297.20	83.20
01/07/2017	15.30	61.70	15.70	45.80	34.63
01/08/2017	30.10	88.50	53.70	216.60	97.23
01/09/2017	133.90	141.60	54.40	109.40	109.83
01/10/2017	112.10	326.00	174.80	260.70	218.40
01/11/2017	128.3	258.7	430.8	92.7	227.63
01/12/2017	265.1	365	330.1	320.1	320.07
01/01/2018	347.7	324.1	131	267.6	267.60
01/02/2018	227.6	340.5	385.4	317.8	317.83
01/03/2018	188.2	329.5	219.6	245.8	245.77
01/04/2018	175.8	167.6	165.1	169.5	169.50
01/05/2018	32.8	119.6	27	59.8	59.80
01/06/2018	78.4	111.3	125.6	105.1	105.10
01/07/2018	58.6	69.4	69.9	66.0	65.97
01/08/2018	75.1	162.3	55.9	97.8	97.77
01/09/2018	27.7	52.1	55.4	45.1	45.07
01/10/2018	188.9	408.5	314	401.7	328.28
01/11/2018	146.9	342.1	296.3	59.1	211.10
01/12/2018	302.4	444.8	86.4	273.9	276.88
01/01/2019	306.7	408.4	578.1	110.9	351.03
01/02/2019	313.6	259.5	302.7	291.9	291.93
01/03/2019	192.6	502.2	280.6	325.1	325.13
01/04/2019	82.8	142.4	131.3	118.8	118.83
01/05/2019	83.1	167.3	77.5	190.6	129.63

01/06/2019	41.1	79.8	68.5	147.3	84.18
01/07/2019	38.4	60.5	52.5	297.6	112.25
01/08/2019	16.1	56.9	3.8	4.8	20.40
01/09/2019	86	193.5	103.9	65.3	112.18
01/10/2019	148.2	169.4	136.2	203.2	164.25
01/11/2019	152.9	259.9	191.3	390.6	248.68

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 11)

Según nos muestra la tabla, el cálculo de la precipitación media mensual se tomaron de las 4 estaciones meteorológicas cercanas (Estación Oxapampa, Pozuzo, Puerto Inca y Puerto Bermúdez), que permitieron obtener información directa de precipitaciones.

Tabla 37: Precipitación media – Promedio aritmético.

DATOS METEOROLÓGICOS POZUZO					
Departamento :	PASCO	Provincia :	OXAPAMPA	Distrito :	POZUZO
Latitud :	10°03'01" S	Longitud :	75°33'01" W	Altitud :	1000 msnm.
PRECIPITACIÓN MEDIA- PROMEDIO ARITMÉTICO					

Día/mes/año	Precipitación media - P. Aritmético (mm)		Precipitación media (m/día)
	/mes	/día	
01/01/2017	297.20	9.59	0.00959
01/02/2017	367.65	13.13	0.01313
01/03/2017	296.90	9.58	0.00958
01/04/2017	169.88	5.66	0.00566
01/05/2017	219.20	7.07	0.00707
01/06/2017	83.20	2.77	0.00277
01/07/2017	34.63	1.12	0.00112
01/08/2017	97.23	3.14	0.00314
01/09/2017	109.83	3.66	0.00366
01/10/2017	218.40	7.05	0.00705
01/11/2017	227.63	7.59	0.00759
01/12/2017	320.07	10.32	0.01032
01/01/2018	267.60	8.63	0.00863
01/02/2018	317.83	11.35	0.01135
01/03/2018	245.77	7.93	0.00793
01/04/2018	169.50	5.65	0.00565
01/05/2018	59.80	1.93	0.00193
01/06/2018	105.10	3.50	0.00350
01/07/2018	65.97	2.13	0.00213
01/08/2018	97.77	3.15	0.00315
01/09/2018	45.07	1.50	0.00150
01/10/2018	328.28	10.59	0.01059
01/11/2018	211.10	7.04	0.00704
01/12/2018	276.88	8.93	0.00893
01/01/2019	351.03	11.32	0.01132

01/02/2019	291.93	10.43	0.01043
01/03/2019	325.13	10.49	0.01049
01/04/2019	118.83	3.96	0.00396
01/05/2019	129.63	4.18	0.00418
01/06/2019	84.18	2.81	0.00281
01/07/2019	112.25	3.62	0.00362
01/08/2019	20.40	0.66	0.00066
01/09/2019	112.18	3.74	0.00374
01/10/2019	164.25	5.30	0.00530
01/11/2019	248.68	8.29	0.00829

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 11)

Según nos muestra la tabla, el mes con mayor precipitación en la zona de estudio es febrero.

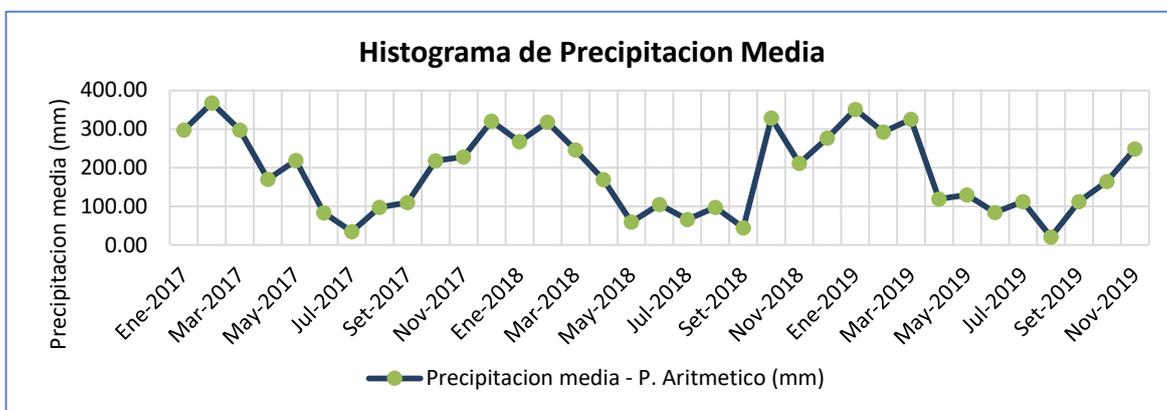


Gráfico 1: Histograma de precipitación media.

Fuente: Elaboración propia.

Según el histograma mostrado, los meses con mayores precipitaciones en la zona de estudio son los meses de enero, febrero y marzo; son estos meses del año donde ocurren estos fenómenos de deslizamiento a nivel de toda la selva central.

Tabla 38: Coeficiente de escorrentía en la zona de estudio.

HOJA DE CALCULO (TASA DE INFILTRACIÓN MEDIA DEL TALUD)					
Departamento :	PASCO	Provincia :	OXAPAMPA	Distrito :	POZUZO
Latitud :	10°03'01" S	Longitud :	75°33'01" W	Altitud :	1000 msnm.
DATOS GENERALES					
PARÁMETRO			DESCRIPCIÓN		
Orografía			Ondulada		
Cobertura característica del suelo			Pastos y vegetación ligera		
Pendiente media del talud			73.73%		
PERMEABILIDAD SATURADA (Ks)			2.037E-05		m/s

COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada > 50%	Alta >20%	Media >5%	Suave >1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.3	0.3	0.25	0.2
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Ce= 0.55

Fuente: (MTC, 2016). (Anexo 11)

Según nos muestra la tabla, el coeficiente de escorrentía es de 0.55, lo cual nos indica que solo el 45% de la precipitación se infiltra en el suelo. Esto quiere decir que, la infiltración del suelo en estudio es óptima para el cultivo de vetiver, ya que, en el marco teórico, mencionamos que este tipo de pastos son efectivos en suelos pobres y muy erosionables como suelos profundos y arenosos adaptándose a todo tipo de suelo en clima cálido, teniendo como desventaja la intolerancia a condiciones de sombra ya que afecta su crecimiento.

Tabla 39: Precipitación efectiva media en la zona de estudio.

PRECIPITACIÓN EFECTIVA:				
Día/mes/año	Precipitación media (mm)		Precipitación efectiva media (mm)	
	/mes	/día	/mes	/día
01/01/2017	297.200	9.587	163.46000	5.27290
01/02/2017	367.650	13.130	202.20750	7.22170
01/03/2017	296.900	9.577	163.29500	5.26758
01/04/2017	169.875	5.663	93.43125	3.11438
01/05/2017	219.200	7.071	120.56000	3.88903
01/06/2017	83.200	2.773	45.76000	1.52533
01/07/2017	34.625	1.117	19.04375	0.61431
01/08/2017	97.225	3.136	53.47375	1.72496
01/09/2017	109.825	3.661	60.40375	2.01346
01/10/2017	218.400	7.045	120.12000	3.87484
01/11/2017	227.625	7.588	125.19375	4.17313
01/12/2017	320.067	10.325	176.03667	5.67860
01/01/2018	267.600	8.632	147.18000	4.74774
01/02/2018	317.833	11.351	174.80833	6.24315
01/03/2018	245.767	7.928	135.17167	4.36038
01/04/2018	169.500	5.650	93.22500	3.10750
01/05/2018	59.800	1.929	32.89000	1.06097
01/06/2018	105.100	3.503	57.80500	1.92683
01/07/2018	65.967	2.128	36.28167	1.17038
01/08/2018	97.767	3.154	53.77167	1.73457
01/09/2018	45.067	1.502	24.78667	0.82622
01/10/2018	328.275	10.590	180.55125	5.82423

01/11/2018	211.100	7.037	116.10500	3.87017
01/12/2018	276.875	8.931	152.28125	4.91230
01/01/2019	351.025	11.323	193.06375	6.22786
01/02/2019	291.933	10.426	160.56333	5.73440
01/03/2019	325.133	10.488	178.82333	5.76849
01/04/2019	118.833	3.961	65.35833	2.17861
01/05/2019	129.625	4.181	71.29375	2.29980
01/06/2019	84.175	2.806	46.29625	1.54321
01/07/2019	112.250	3.621	61.73750	1.99153
01/08/2019	20.400	0.658	11.22000	0.36194
01/09/2019	112.175	3.739	61.69625	2.05654
01/10/2019	164.250	5.298	90.33750	2.91411
01/11/2019	248.675	8.289	136.77125	4.55904

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 11)

Según nos muestra la tabla, los meses con mayores precipitaciones efectivas media en la zona de estudio son los meses de enero, febrero y marzo. Con esta información de la precipitación media efectiva, nos ayuda a determinar la planificación que debe considerarse el sembrado, ya que el establecimiento del pasto vetiver es de 2 a 3 meses en clima cálido y 4 a 6 meses en tiempos de clima frío. Ya que el vetiver comienza a estabilizar una pendiente a los 9 o 10 meses de edad como mínimo, por lo tanto, el momento de sembrar es también muy importante si se quiere evitar la falla del talud durante el periodo de lluvias.

Cabe mencionar que la precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m²), es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana es medida en mm o l/m². Quiere decir que 1 milímetro de agua de lluvia equivale a 1 L de agua por m².

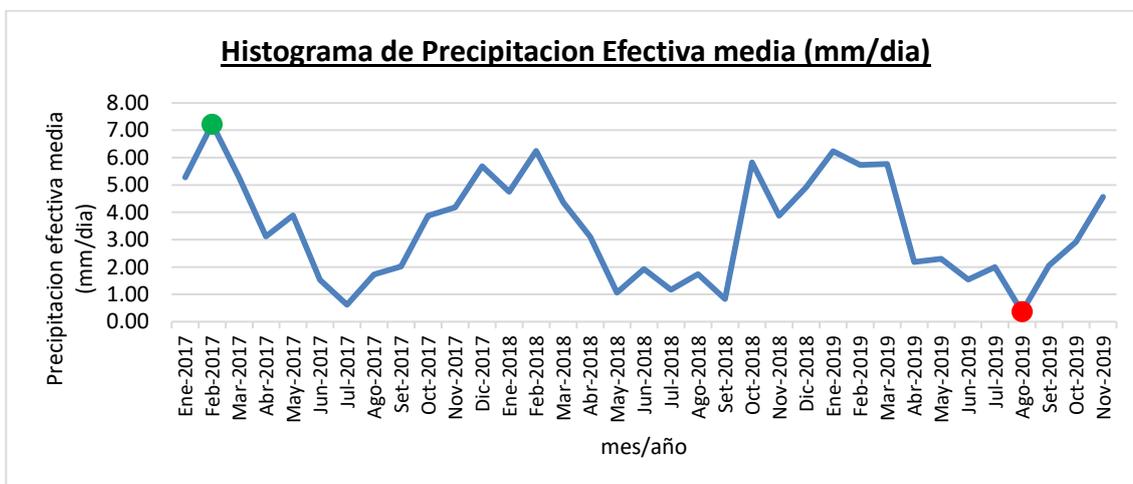


Gráfico 2: Histograma de precipitación media efectiva.

Fuente: Elaboración propia.

Según el histograma de precipitación efectiva media (sin considerar la escorrentía), vemos que el máximo es de 7.22170 mm/día (enero), esto quiere decir que, es equivalente a 7.22170 litros de agua por m². Además, la precipitación mínima es de 0.36194 mm/día (agosto) equivalente a 0.36194 litros por m². Teniendo estos resultados de las precipitaciones efectivas en la zona de estudio, comparamos con el agua requerida para los cultivos de vetiver, con relación al agua para riego interdiario recomendado es de 0.001 m³ por metro de hilera; esto equivale a 1/2 litro de agua por metro lineal de hilera, el cual se considera de 0.15 m de ancho, o sea 1 metro de hilera es 0.15 m². Entonces, se necesita 3.33 litros de agua por m², inferior a la precipitación promedio de 3.80 litros de agua por m². Recomendando no dejar de lado el riego en los meses de mínimas precipitaciones como es el mes de agosto.

Tabla 40: Tasa de infiltración media en la zona de estudio.

TASA DE INFILTRACIÓN:			
Día/mes/año	Tasa de infiltración media (mm)		Tasa de infiltración media (m/día)
	/mes	/día	
01/01/2017	133.740	4.314	0.00431
01/02/2017	165.443	5.909	0.00591
01/03/2017	133.605	4.310	0.00431
01/04/2017	76.444	2.548	0.00255
01/05/2017	98.640	3.182	0.00318
01/06/2017	37.440	1.248	0.00125
01/07/2017	15.581	0.503	0.00050
01/08/2017	43.751	1.411	0.00141
01/09/2017	49.421	1.647	0.00165
01/10/2017	98.280	3.170	0.00317
01/11/2017	102.431	3.414	0.00341
01/12/2017	144.030	4.646	0.00465
01/01/2018	120.420	3.885	0.00388
01/02/2018	143.025	5.108	0.00511
01/03/2018	110.595	3.568	0.00357
01/04/2018	76.275	2.543	0.00254
01/05/2018	26.910	0.868	0.00087
01/06/2018	47.295	1.577	0.00158
01/07/2018	29.685	0.958	0.00096
01/08/2018	43.995	1.419	0.00142
01/09/2018	20.280	0.676	0.00068
01/10/2018	147.724	4.765	0.00477
01/11/2018	94.995	3.167	0.00317
01/12/2018	124.594	4.019	0.00402
01/01/2019	157.961	5.096	0.00510
01/02/2019	131.370	4.692	0.00469

01/03/2019	146.310	4.720	0.00472
01/04/2019	53.475	1.783	0.00178
01/05/2019	58.331	1.882	0.00188
01/06/2019	37.879	1.263	0.00126
01/07/2019	50.513	1.629	0.00163
01/08/2019	9.180	0.296	0.00030
01/09/2019	50.479	1.683	0.00168
01/10/2019	73.913	2.384	0.00238
01/11/2019	111.904	3.730	0.00373

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 11)

Según nos muestra la tabla, la máxima tasa de infiltración media en la zona de estudio es de 0.00591 m/día, velocidad con la que se infiltra la precipitación en el suelo.

4.1.3. Propiedades físicas del suelo del talud

Las muestras de material representativas del talud, se han obtenido en cantidades suficientes para poder realizar los ensayos de laboratorio correspondientes, teniéndose un debido cuidado para su conservación y traslado al laboratorio, tal como nos dice la norma NTP 339.151, que nos menciona las prácticas estándar para su preservación y transporte de muestras de suelos.

La toma de muestras se realizó, para las dos primeras calicatas C-01 y C-02 del estrato superior (entre 0.5 y 1.0 m) y para las otras C-03 y C-04 se tomó del estrato siguiente (entre 1.0 y 1.5 m). Los ensayos se realizaron mediante guías de ensayos de laboratorio, normas técnicas, además se aclara que los certificados de los ensayos se muestran en los anexos.

4.1.3.1. Contenido de humedad

En la siguiente tabla se resumen los resultados del contenido de humedad del suelo, lo cual nos indica el contenido de agua que contiene ésta.

Tabla 41: Resumen del contenido de humedad del suelo.

Calicata	HUMEDAD DEL SUELO (%)			
	N° Muestra			Promedio (%)
	M1	M2	M3	
C-01	11.83	11.58	11.82	11.74
C-02	11.70	11.65	11.76	11.71
C-03	15.83	15.79	15.84	15.82
C-04	15.89	15.82	15.83	15.85

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

En la tabla mostrada se presenta el contenido de humedad para cada calicata. Se aprecia un porcentaje promedio ya que estos suelos son arenosos con presencia de arcillas y limos.

4.1.3.2. Análisis granulométrico por tamizado

Se registraron los porcentajes pasantes en cada tamiz, para determinar los porcentajes de gravas, arenas y finos.

Tabla 42: Resumen del análisis granulométrico del suelo.

MALLA		% PASANTE ACUMULADO			
Tamiz	Abertura (mm)	N° Calicata			
		C-01	C-02	C-03	C-04
3"	76.200	100.0	100.0	100.0	100.0
2 1/2"	63.500	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50.800	100.0	100.0	100.0	100.0
1 1/2"	38.100	97.3	96.1	98.4	98.1
1"	25.400	91.4	90.1	94.6	94.6
3/4"	19.050	88.3	86.8	92.4	92.4
1/2"	12.700	82.8	80.8	87.0	86.7
3/8"	9.525	78.2	75.8	82.5	81.9
N° 4	4.760	67.1	64.4	71.7	70.5
N° 10	2.000	55.2	52.3	62.4	62.1
N° 20	0.840	-	-	54.8	55.2
N° 40	0.426	34.8	33.4	50.1	50.9
N° 100	0.149	-	-	42.6	42.8
N° 200	0.074	21.5	19.5	37.8	37.6
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

Cabe mencionar que los resultados de granulometría mostrados, son el resumen de los porcentajes pasantes acumulados de cada calicata.

Tabla 43: Porcentaje granulométrico de suelo.

% GRANULOMÉTRICO DEL SUELO			
Calicata	Grava 3" - N° 4: %	Arena N° 4 - N° 200: %	Finos < N° 200: %
C-1	32.86	45.62	21.52
C-2	35.58	44.96	19.46
C-3	28.34	33.84	37.81
C-4	29.49	32.87	37.63

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

En las tablas mostradas se presentan los porcentajes de suelo de cada calicata. Se aprecia un porcentaje mayor en arenas, así como finos, por lo que estos suelos son de plasticidad media.

4.1.3.3. Límites de Atterberg

A continuación, se muestra el resumen de los resultados obtenidos del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Estos resultados son muy importantes porque nos ayudaran a clasificar el suelo.

Tabla 44: Resultados del límite líquido, plástico e índice de plasticidad.

CALICATA	LIMITE LIQUIDO LL (%)	LIMITE PLÁSTICO LP (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP (%)
C-1	25.98	19.74	6.23
C-2	25.93	19.67	6.27
C-3	32.70	21.77	10.94
C-4	32.73	21.73	11.00

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

En la tabla mostrada se presentan los límites de consistencia del suelo en las cuatro calicatas, donde efectivamente los suelos encontrados en la zona de estudio son de plasticidad media, esto según la carta de plasticidad de Casagrande.

4.1.3.4. Peso volumétrico del suelo

A continuación, se muestran los resultados del ensayo del peso unitario o peso volumétrico del suelo, que se determinó mediante el método de la parafina.

Tabla 45: Resultado del peso unitario del suelo.

PESO UNITARIO DEL SUELO (gr/cm ³)				
Calicata	N° Muestra			Promedio (gr/cm ³)
	M1	M2	M3	
C-01, C-02	1.79	1.77	1.80	1.79
C-03, C-04	1.75	1.73	1.71	1.73

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

En la tabla mostrada se presenta el peso volumétrico del suelo, donde estos resultados coinciden y se ajustan según los tipos de suelos encontrados.

4.1.3.5. Clasificación del suelo según el método SUCS y AASHTO

Para la clasificación del suelo por el método SUCS se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes acumulados de las mallas N°4, N°200 y los límites líquido y plástico.

Para la clasificación del suelo por el método AASHTO se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes acumulados de las mallas N°10, N°40 y N°200, los límites líquido, plástico y el índice de grupo IG.

Tabla 46: Clasificación de muestras de suelo representativas.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN SUCS				
Calicata	C-1	C-2	C-3	C-4
Grava 3" - N° 4	32.86 %	35.58 %	28.34 %	29.49 %
Arena N° 4 - N° 200	45.62 %	44.96 %	33.84 %	32.87 %
Finos < N° 200	21.52 %	19.46 %	37.81 %	37.63 %
Límite Líquido (LL)	25.98 %	25.93 %	32.70 %	32.73 %
Límite Plástico (LP)	19.74 %	19.67 %	21.77 %	21.73 %
Índice Plástico (IP)	6.23 %	6.27 %	10.94 %	11.00 %
Clasificación SUCS	SC-SM	SC-SM	SC	SC
Denominación	Arena Limo-Arcillosa	Arena Limo-Arcillosa	Arena Arcillosa	Arena Arcillosa
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN AASHTO				
Porcentaje que pasa N° 10 (2 mm)	55.20%	52.30%	62.40%	62.10%
Porcentaje que pasa N° 40 (0.425 mm)	34.80%	33.40%	50.10%	50.90%
Porcentaje que pasa N° 200 (0.075 mm)	21.50%	19.50%	37.80%	37.60%
Índice de Grupo (IG)	0	0	1	1
Clasificación AASHTO	A-1-b (0)	A-1-b (0)	A-6 (1)	A-6 (1)
Denominación	Grava con Arena Limosa	Grava con Arena Limosa	Grava con Arena Arcillosa	Grava con Arena Arcillosa

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 8)

4.1.4. Propiedades mecánicas del suelo del talud

Los ensayos tanto de laboratorio como in situ para la investigación se realizaron en base a las normas peruanas NTP y ASTM, para así poder tener resultados fiables durante el desarrollo de esta investigación.

4.1.4.1. Ensayo de corte directo

En las siguientes tablas se resumen los ensayos de corte directo, determinando los parámetros de resistencia sin y con presencia de raíces, como el ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (C) del suelo.

a) Resultados de ensayos de corte directo sin presencia de raíces de pastos Vetiver

Calicata C-01, C-02:

Tabla 47: Parámetros de resistencia de la calicata C-01, C-02.

Área (cm ²)	36	Calicata	C 01 , C 02	Muestra:	sin raíces
Ensayo de corte	Espécimen	Fuerza (kg)	Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	
	1	2	0.56	0.21	
Valores	2	4	1.11	0.53	
Obtenidos	3	8	2.22	0.85	

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

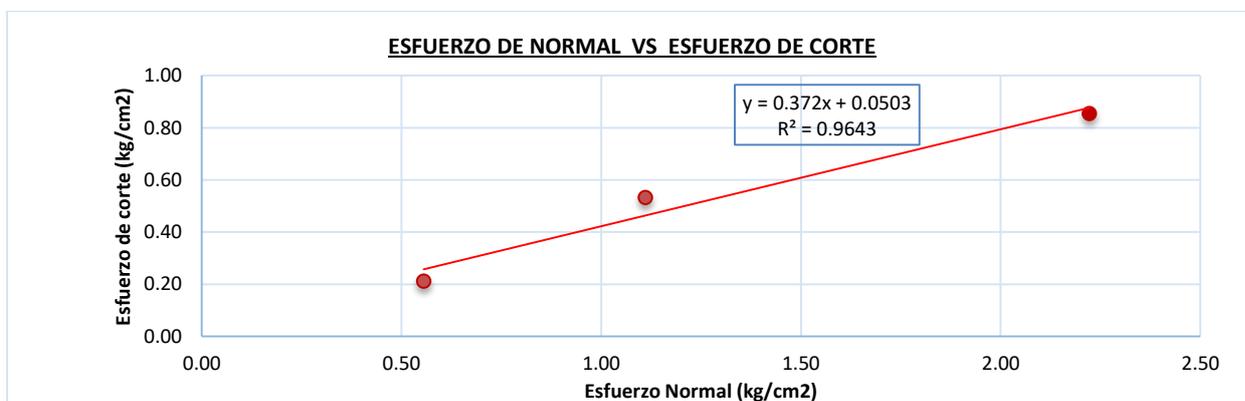


Gráfico 3: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-01, C-02.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se presenta la relación esfuerzo normal y esfuerzo cortante, de aquí se obtienen los valores de cohesión y ángulo de fricción mediante la ecuación de la línea de tendencia, los cuales son 0.0503 kg/cm² y 20.41° respectivamente. Los procedimientos de los datos obtenidos en el laboratorio se muestran en el anexo 9.

Calicata C-03, C-04:

Tabla 48: Parámetros de resistencia de la calicata C-03, C-04.

Área (cm ²)	36	Calicata	C 03 , C 04	Muestra:	sin raíces
Ensayo de corte	Espécimen	Fuerza (kg)	Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	
	1	2	0.56	0.21	
Valores	2	4	1.11	0.50	
Obtenidos	3	8	2.22	0.81	

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

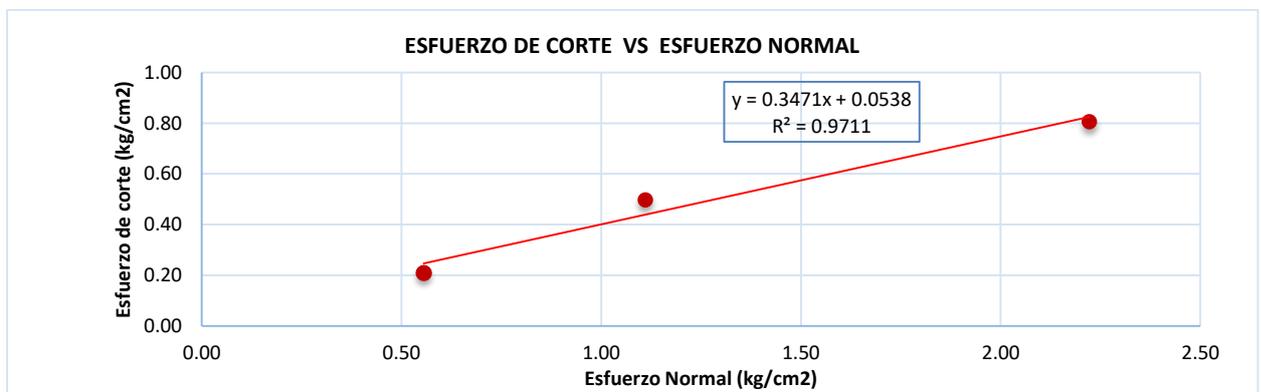


Gráfico 4: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-03, C-04.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se presentan la relación esfuerzo normal y esfuerzo cortante. De estos, se obtienen los valores de cohesión y ángulo de fricción mediante la ecuación de la línea de tendencia, los cuales son 0.0538 kg/cm² y 19.14° respectivamente. Los procedimientos de los datos obtenidos en el laboratorio se muestran en el anexo 9.

A continuación, se muestra el resumen de los parámetros de resistencia del suelo sin presencia de raíces de Vetiver.

Tabla 49: Resumen de Parámetros de Resistencia sin presencia de raíces de pastos Vetiver.

PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO			
Calicata	SUCS	Cohesión C (kg/cm ²)	Ángulo de fricción Ø (°)
C-01, C-02	SC-SM	0.0503	20.41
C-03, C-04	SC	0.0538	19.14

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

b) **Resultados de ensayos de corte directo con presencia de raíces de pastos Vetiver**

Calicata C-01, C-02:

Tabla 50: Parámetros de resistencia de la calicata C-01, C-02.

Área (cm ²)	36	Calicata	C 01 , C 02	Muestra:	con raíces
Ensayo de corte	Espécimen	Fuerza (kg)	Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	
	1	2	0.56	0.23	
Valores	2	4	1.11	0.57	
Obtenidos	3	8	2.22	0.93	

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

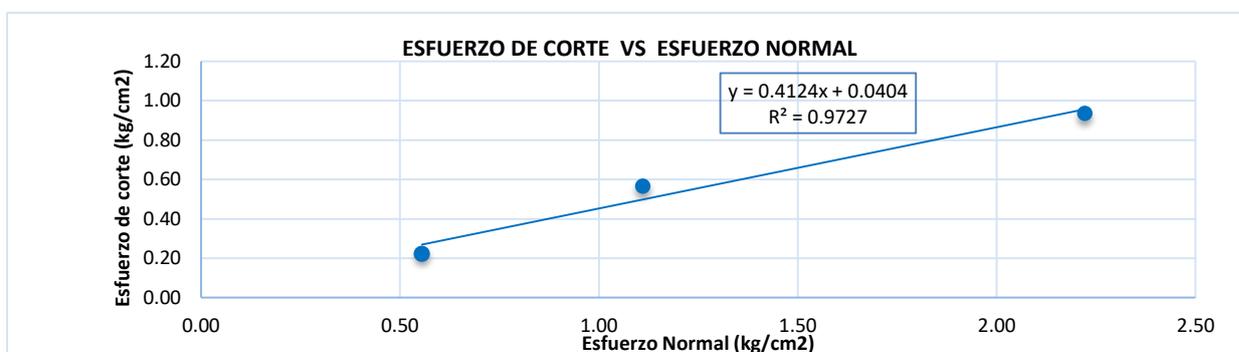


Gráfico 5: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-01, C-02.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se presentan la relación esfuerzo normal y esfuerzo cortante, de los cuales, se obtienen los valores de cohesión y ángulo de fricción mediante la ecuación de la línea de tendencia, los cuales son 0.0404 kg/cm² y 22.41° respectivamente. Los procedimientos de los datos obtenidos en el laboratorio se muestran en el anexo 9.

Calicata C-03, C-04:

Tabla 51: Parámetros de resistencia de la calicata C-03, C-04.

Área (cm ²)	36	Calicata	C 03 , C 04	Muestra:	con raíces
Ensayo de corte	Espécimen	Fuerza (kg)	Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	
	1	2	0.56	0.20	
Valores	2	4	1.11	0.49	
Obtenidos	3	8	2.22	0.97	

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

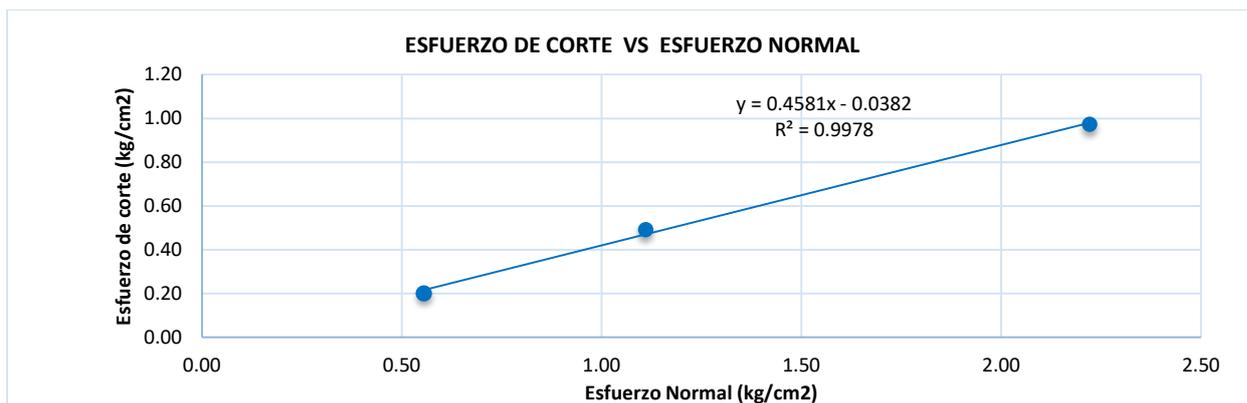


Gráfico 6: Esfuerzo normal VS Esfuerzo cortante C-03, C-04.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se presenta la relación esfuerzo normal y esfuerzo cortante, de donde se obtienen los valores de cohesión y ángulo de fricción mediante la ecuación de la línea de tendencia, los cuales son 0.0382 kg/cm² y 24.61° respectivamente. Los procedimientos de los datos obtenidos en el laboratorio se muestran en el anexo 9.

En la siguiente tabla se muestran el resumen de los parámetros de resistencia del suelo con presencia de raíces de vetiver.

Tabla 52: Resumen de parámetros de resistencia con presencia de raíces de pastos vetiver.

PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO			
Calicata	SUCS	Cohesión C (kg/cm ²)	Ángulo de fricción Ø (°)
C-01, C-02	SC-SM	0.0404	22.41
C-03, C-04	SC	0.0382	24.61

Fuente: Elaboración Propia. (Anexo 9)

4.1.5. Evaluación y comparación de los parámetros de resistencia sin y con presencia de raíces de pastos Vetiver

En el siguiente gráfico y tabla se resumen los parámetros de resistencia obtenidos con el ensayo de corte directo, sin y con presencia de raíces de pastos vetiver.

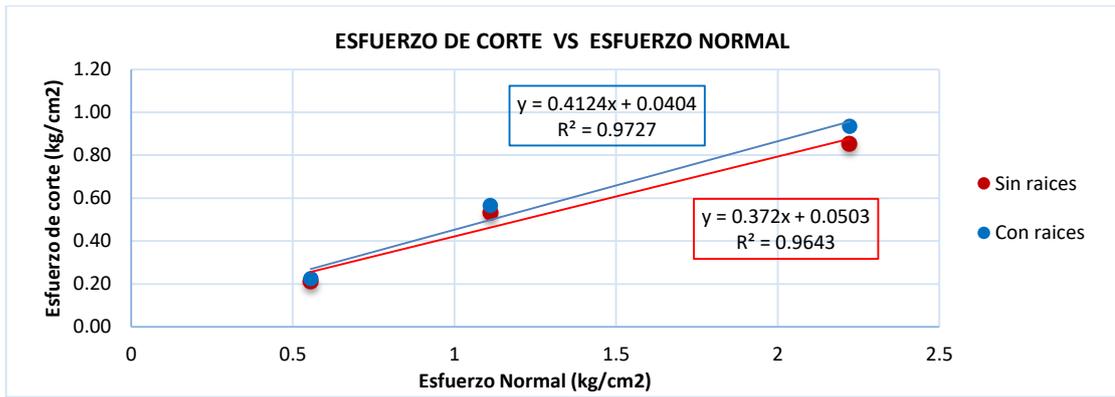


Gráfico 7: Envoltorio de falla C-01, C-02.

Fuente: Elaboración propia.

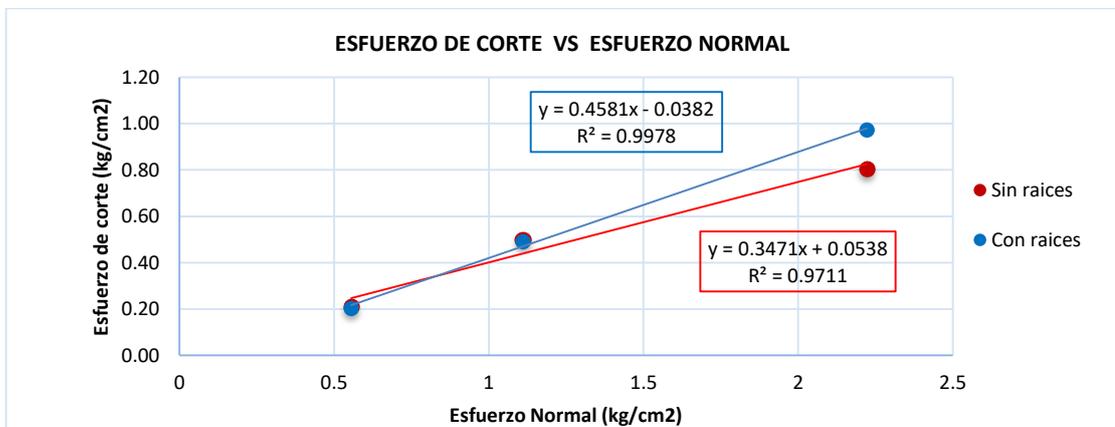


Gráfico 8: Envoltorio de falla C-03, C-04.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se presenta el efecto que causa las raíces de los pastos Vetiver en los parámetros de resistencia al corte del suelo, como el grado de cohesión y el ángulo de fricción.

Tabla 53: Efecto de las raíces sobre la cohesión y el ángulo de fricción.

PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO				
Calicata	SUCS	MUESTRA	Cohesión C (kg/cm ²)	Ángulo de fricción Ø (°)
C-01, C-02	SC-SM	Sin raíces	0.0503	20.41
C-01, C-02	SC-SM	Con raíces	0.0404	22.41
Variación %			19.68 %	9.80 %
C-03, C-04	SC	Sin raíces	0.0538	19.14
C-03, C-04	SC	Con raíces	0.0382	24.61
Variación %			29.00 %	28.58 %
Promedio de variación %			24.34 %	19.19 %

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

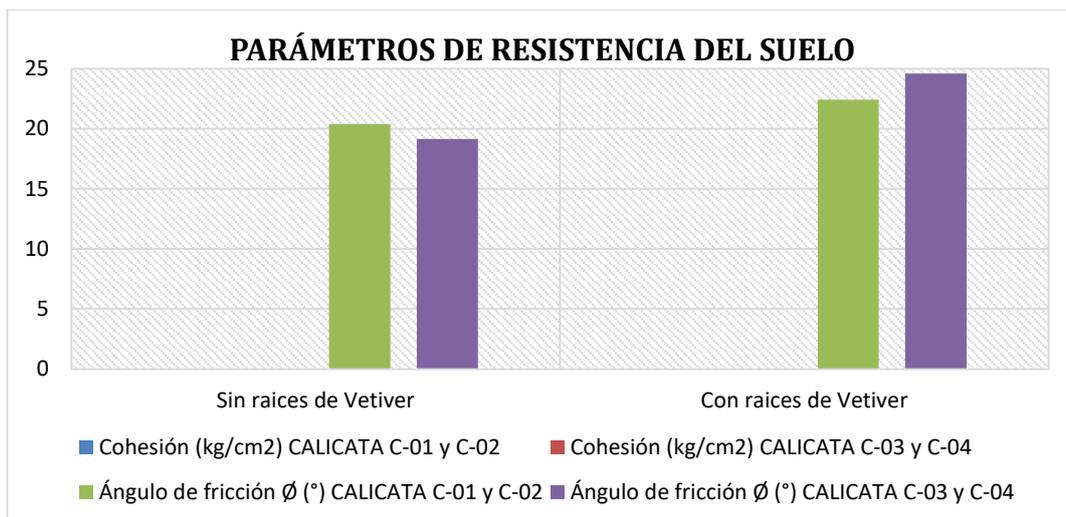


Gráfico 9: Cohesión y ángulo de fricción del suelo sin y con raíces de vetiver.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla y gráfico mostrados, se evidencia que el parámetro del grado de cohesión disminuye en un 24.34 %, y el que más aumenta es el ángulo de fricción interna del suelo en un 19.19 %, esto debido al porcentaje que ocupan las raíces en las partículas del suelo. Con esta información comprobamos que, el efecto de las raíces del pasto vetiver hace que el suelo adquiera una resistencia más elevada a los esfuerzos de corte, ya que son estas las que actúan en los taludes provocando los planos de falla originando los deslizamientos.

También, es de importancia mostrar cómo aumenta la resistencia al corte por el efecto de las raíces para las diferentes cargas normales.

Tabla 54: Máximos esfuerzos de corte con raíces de Vetiver.

RESISTENCIA AL ESFUERZO DE CORTE DEL SUELO						
Calicata	C-01, C-02			C-03, C-04		
Espécimen	2kg	4kg	8kg	2kg	4kg	8kg
Esfuerzo Normal σ_n(kg/cm²)	0.56	1.11	2.22	0.56	1.11	2.22
Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) Sin presencia de raíces de Vetiver	0.21	0.53	0.85	0.21	0.50	0.81
Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) Con presencia de raíces de Vetiver	0.23	0.57	0.93	0.20	0.49	0.97
Aumento %	6.71 %	6.12 %	9.45 %	-2.72 %	-1.14 %	20.74 %

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 9)

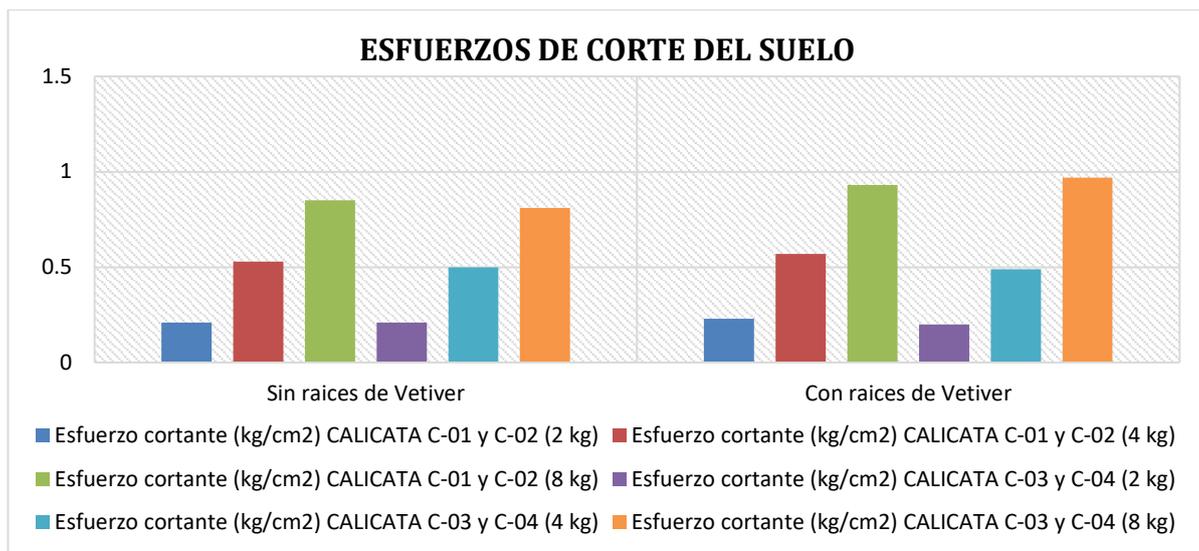


Gráfico 10: Esfuerzo cortante del suelo sin y con raíces de vetiver.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla mostrada, se evidencia que la presencia de raíces de vetiver aumenta los esfuerzos de corte que presenta el suelo, llegando a aumentar mínimamente para cargas normales de 2 k y 4 kg, pero en el espécimen de carga normal de 8 kg aumenta en un porcentaje de 9.45% para la calicata 1 y 2 (arenas con limos-arcillosos), pero el caso más favorable ocurre en la calicata 3 y 4 (arenas con arcillas) con un aumento de 20.74 % en el espécimen de carga normal de 8 kg.

4.1.6. Aporte al esfuerzo de corte mediante la resistencia a tensión del cultivo vetiver

Si bien es cierto que la resistencia a la tensión del pasto vetiver es muy elevado, en esta investigación se tomó como referencia a nuestro antecedente internacional Quiros Castegnaro, 2012, mostrado en el capítulo 2, el cual realizó experimentalmente ensayos de tensión de raíces, a partir de especímenes vivos de una planta de vetiver de tres años de edad.

En esta parte de la investigación se utilizó el modelo matemático presentado en el marco teórico, ítem, consideraciones de aporte al esfuerzo de corte mediante la resistencia a tensión del cultivo vetiver.

Tabla 55: Resistencia a tensión de haces de raíces de Vetiver.

N° Muestra	Co (kg/cm ²)	TR (kg/cm ²)	AR/A (%)	ΔSR
C 03 – C 04	0.0382	38.10	0.50	0.22
C = Co + ΔSR			C =	0.26 kg/cm²

Fuente: Elaboración propia.

Quiros Castegnaro, 2012, recomienda que, la configuración geométrica del cultivo de vetiver, sea de la siguiente manera:

- Separación horizontal de vetiver en hilera: 1 m
- Separación vertical de vetiver entre hilera: 1 m
- Longitud de raíces: 2.00 m (esto es conservador, ya que la planta puede desarrollar raíces hasta de 3 a 4 m).
- Radio de influencia de raíces: 0.50 cm

4.1.7. Análisis de estabilidad del talud global

Con el fin de evaluar la estabilidad que presenta el talud en estudio, se procedió a realizar un análisis por estabilidad global, para lo cual se utilizó el software SLIDE V6.0.



Figura 72: Interfaz del software slide.

Fuente: SLIDE V6.0

El software SLIDE V6.0, está orientado al análisis de las fallas circulares y planares tanto globales como locales, esto utilizando el concepto de equilibrio limite.

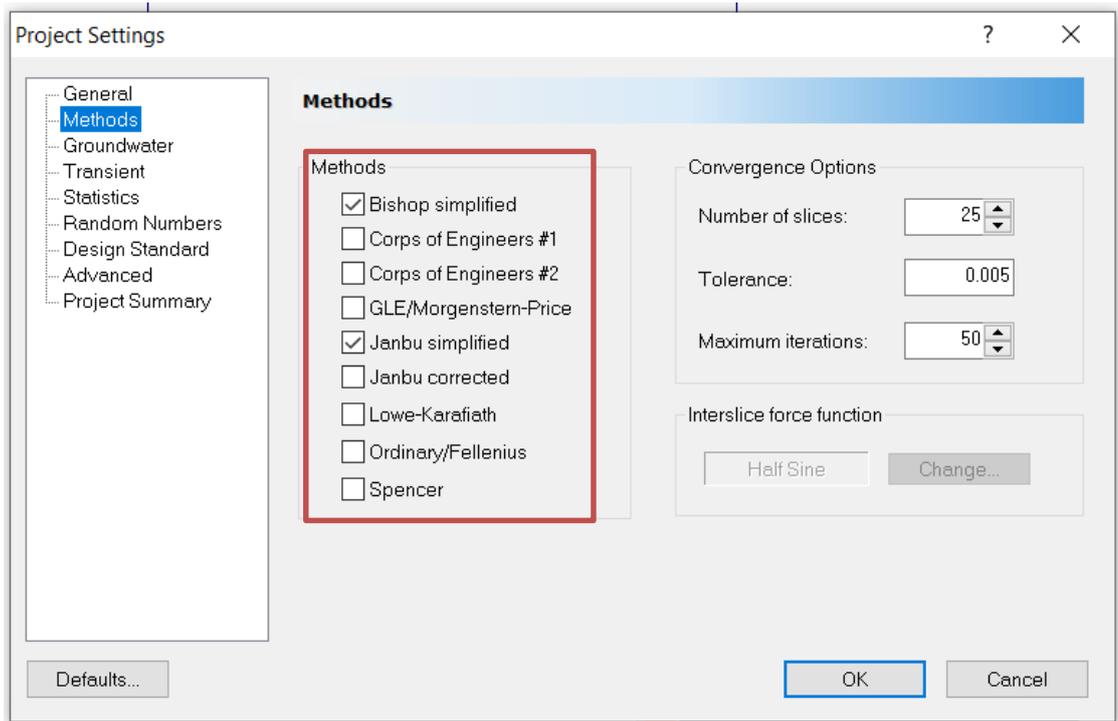


Figura 73: Definición del método de equilibrio límite con la que se evaluará.

Fuente: SLIDE V6.0.

Aquí se ingresaron parámetros como son las propiedades geotécnicas de la zona de estudio (ángulo de fricción, cohesión y peso unitario).

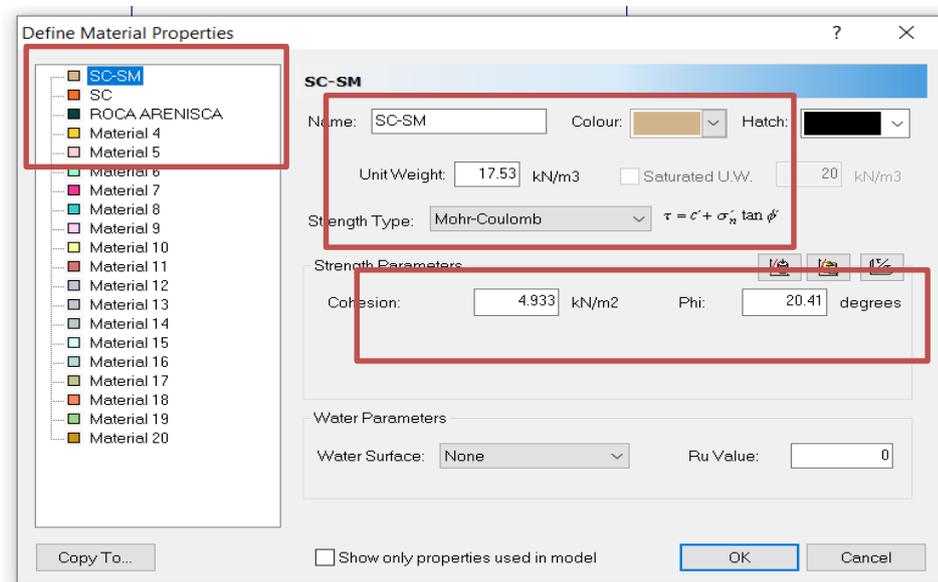


Figura 74: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de corte directo sin presencia de raíces de vetiver (C-01, C-02).

Fuente: SLIDE V6.0.

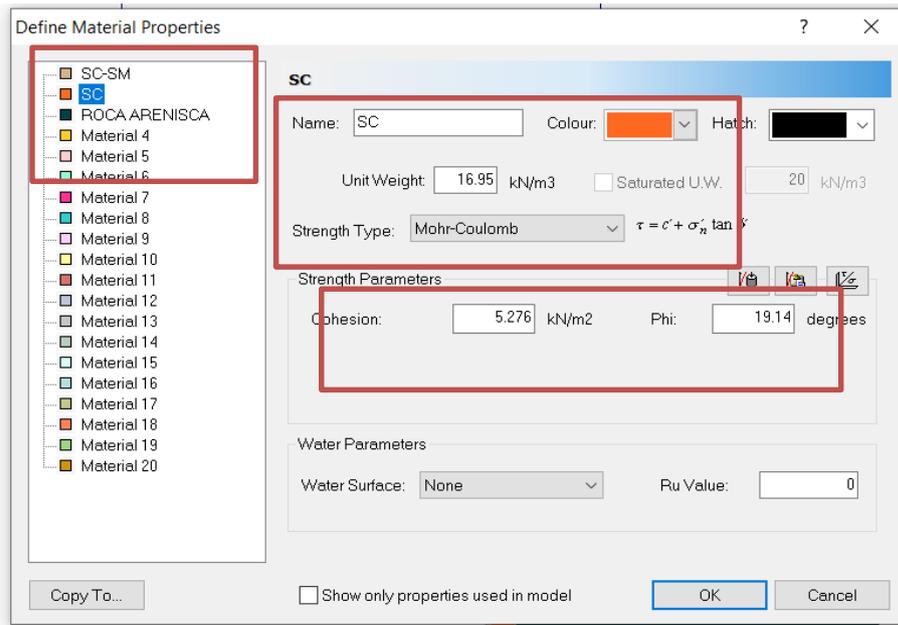


Figura 75: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de corte directo sin presencia de raíces de vetiver (C-03, C-04).

Fuente: SLIDE V6.0.

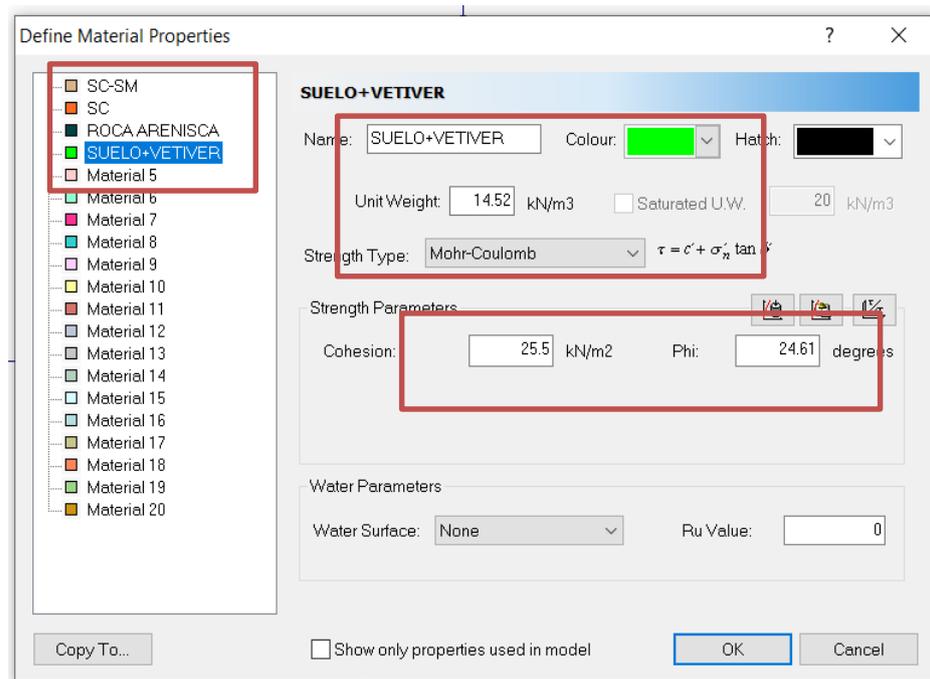


Figura 76: Asignación de parámetros geotécnicos del suelo - Ensayo de corte directo con presencia de raíces de vetiver (C-03, C-04), considerando la cohesión aportada por la resistencia a la tensión de raíces (tabla 55).

Fuente: SLIDE V6.0.

Con la definición de los parámetros geotécnicos del talud, se procedió a realizar un análisis de estabilidad estático sin y con la presencia de cultivos de pastos Vetiver.

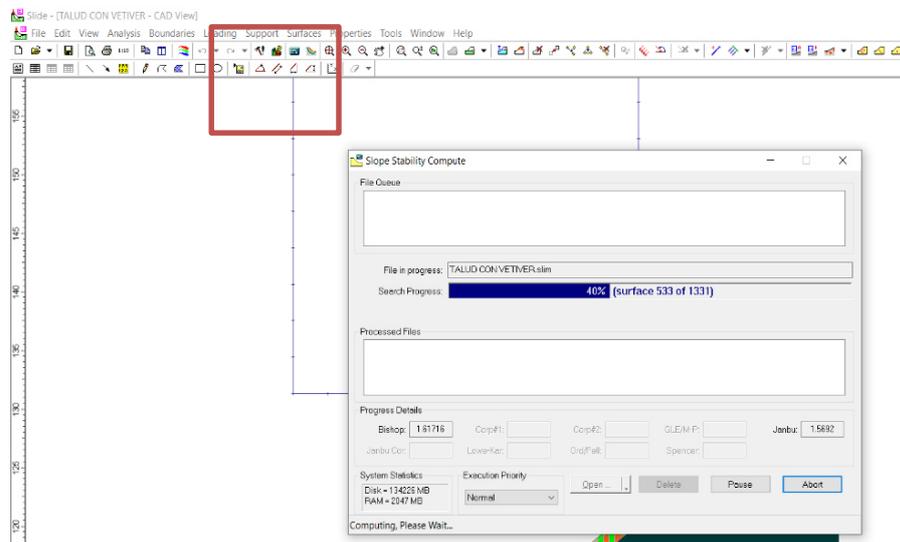


Figura 77: Proceso de análisis de estabilidad de taludes con los datos ingresados.

Fuente: SLIDE V6.0.

4.1.7.1. Análisis de estabilidad sin presencia de cultivo de vetiver

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para este primer análisis.

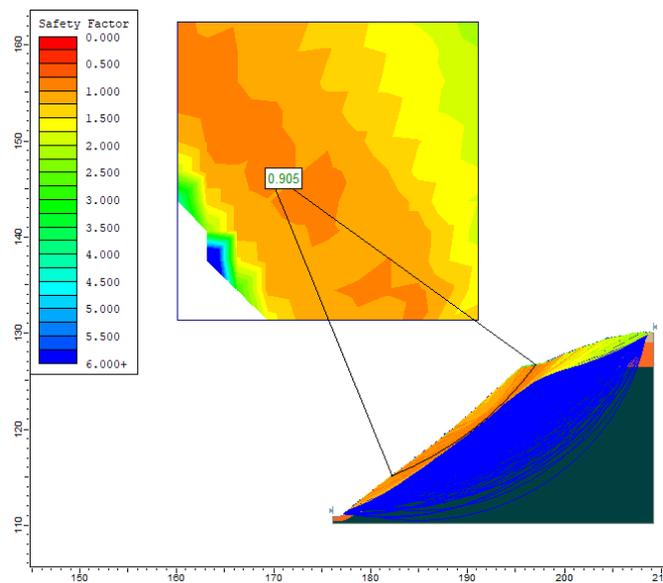


Figura 78: Análisis estático para el talud en estudio sin presencia de vetiver

Bishop FS=0.905.

Fuente: Elaboración Propia.

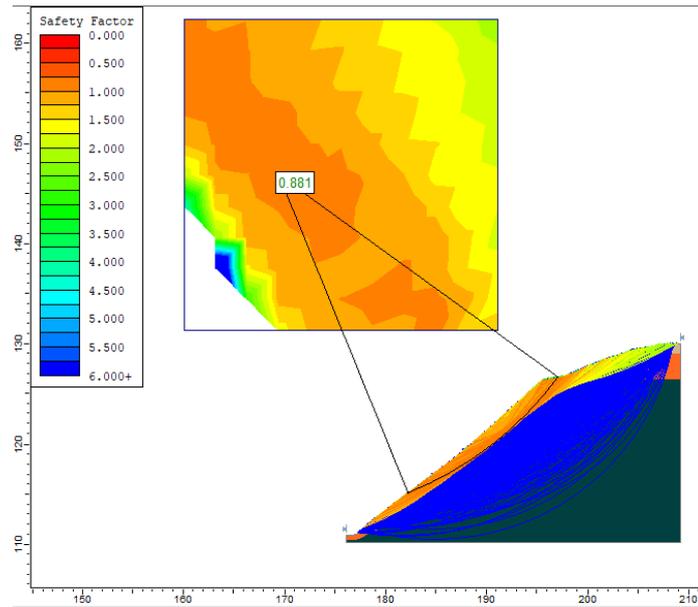


Figura 79: Análisis estático para el talud en estudio sin presencia de vetiver
Janbú FS=0.881.

Fuente: Elaboración propia.

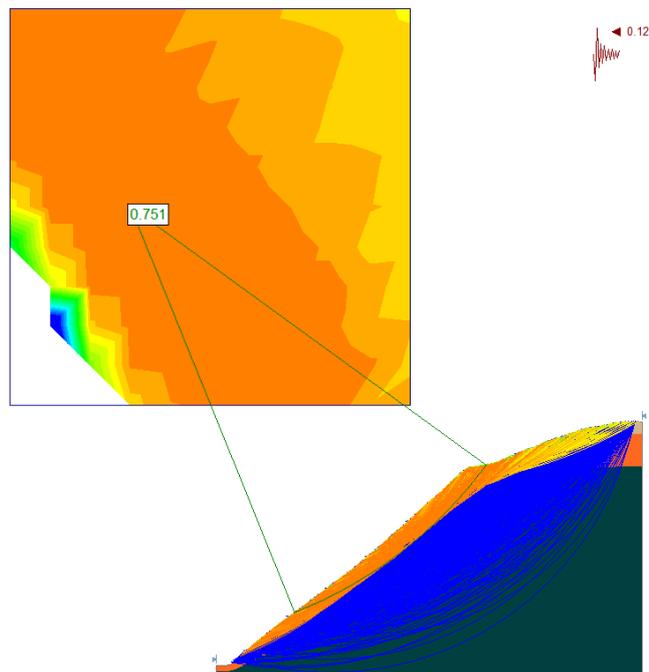


Figura 80: Análisis pseudoestático para el talud en estudio sin presencia de vetiver
Bishop FS=0.751.

Fuente: Elaboración propia.

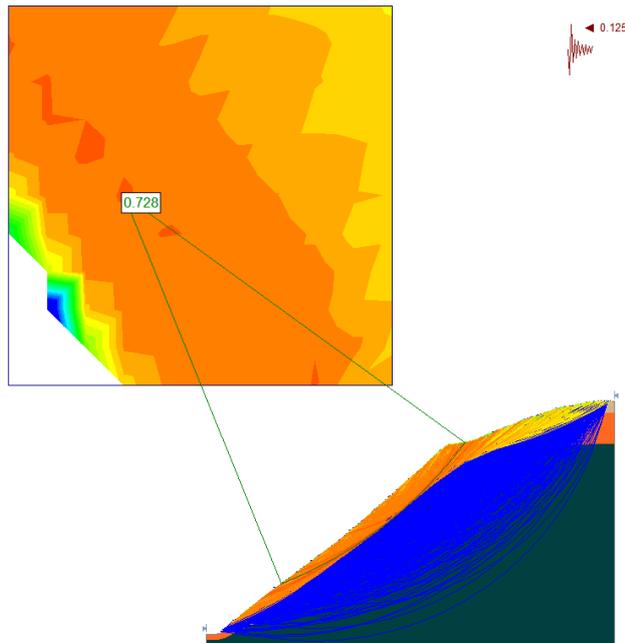


Figura 81: Análisis pseudoestático para el talud en estudio sin presencia de vetiver Janbú FS=0.728.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global en condición actual.

FACTOR DE SEGURIDAD SIN PRESENCIA DE VETIVER		
Zona de estudio	Análisis de estabilidad estático	
	Bishop (F.S.)	Janbú (F.S.)
Talud	0.905	0.881
Análisis de estabilidad pseudoestático (sísmico)		
Zona de estudio	Bishop (F.S.)	Janbú (F.S.)
	Talud	0.751

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla mostrada, se aprecia la condición de inestabilidad que presenta actualmente el talud en estudio, ya que los factores de seguridad según los métodos de Bishop S. y Janbú son menores a 1.50 y 1.25.

4.1.7.2. Análisis de estabilidad con presencia de cultivo de vetiver

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para este segundo análisis.

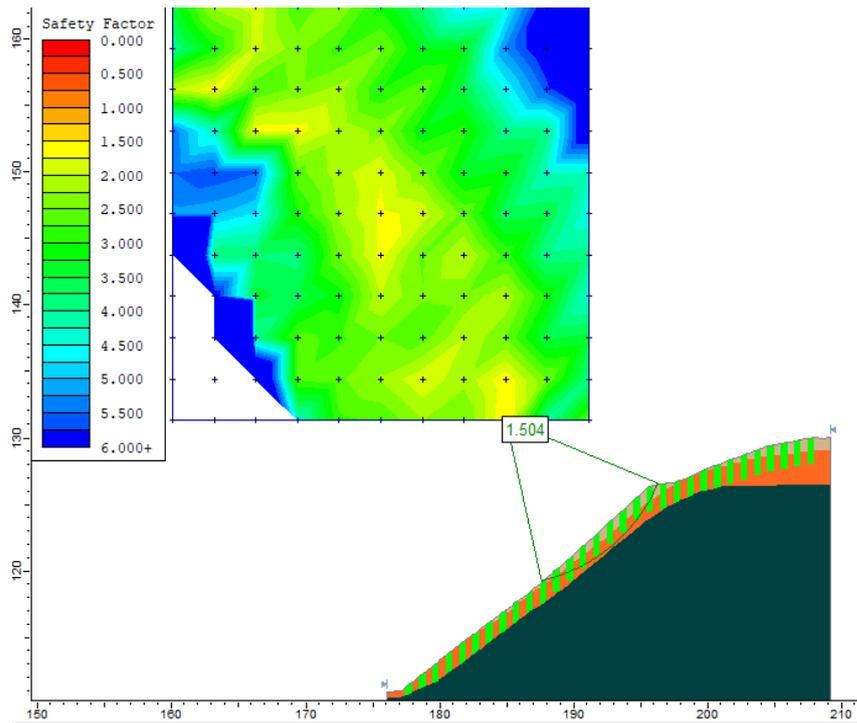


Figura 82: Análisis estático para el talud en estudio con presencia de vetiver
Bishop FS=1.504.

Fuente: Elaboración propia.

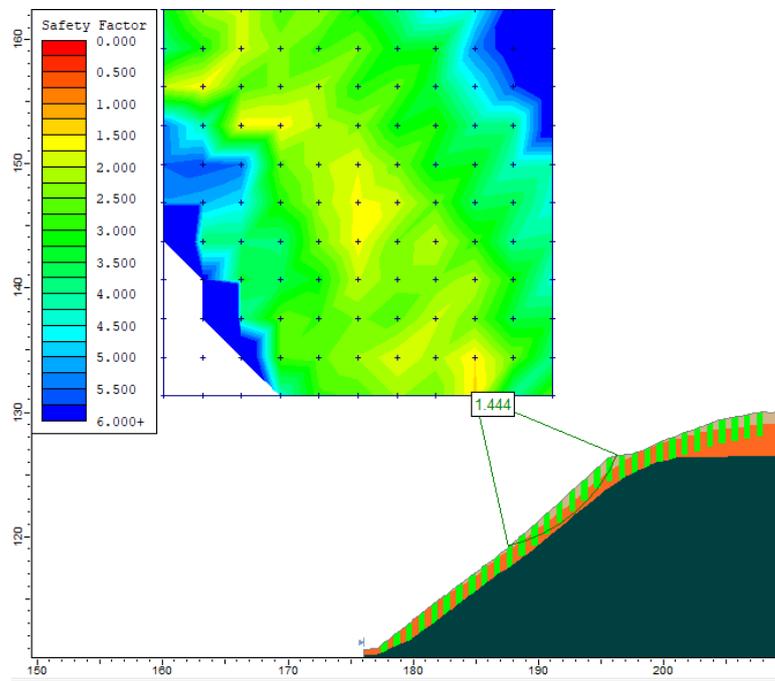


Figura 83: Análisis estático para el talud en estudio con presencia de vetiver
Janbú FS=1.444.

Fuente: Elaboración propia.

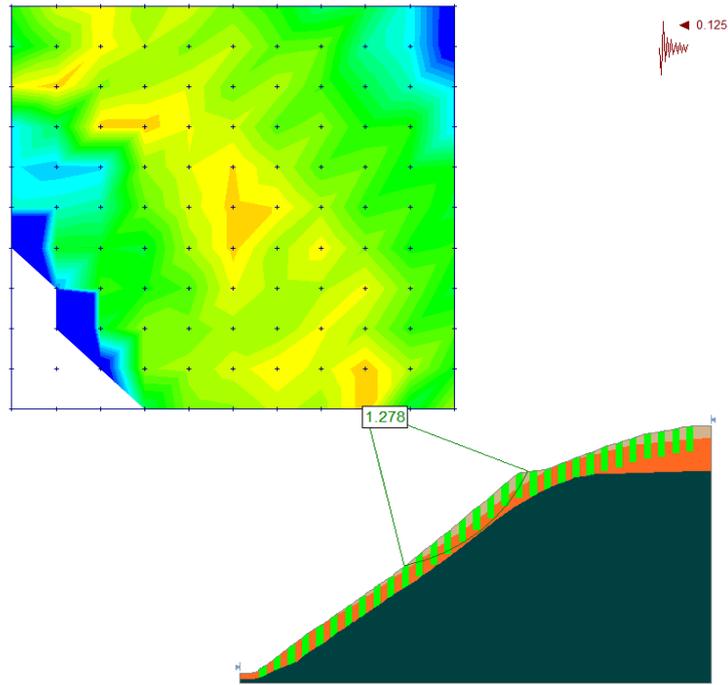


Figura 84: Análisis pseudoestático para el talud en estudio con presencia de vetiver
Bishop FS=1.278.

Fuente: Elaboración propia.

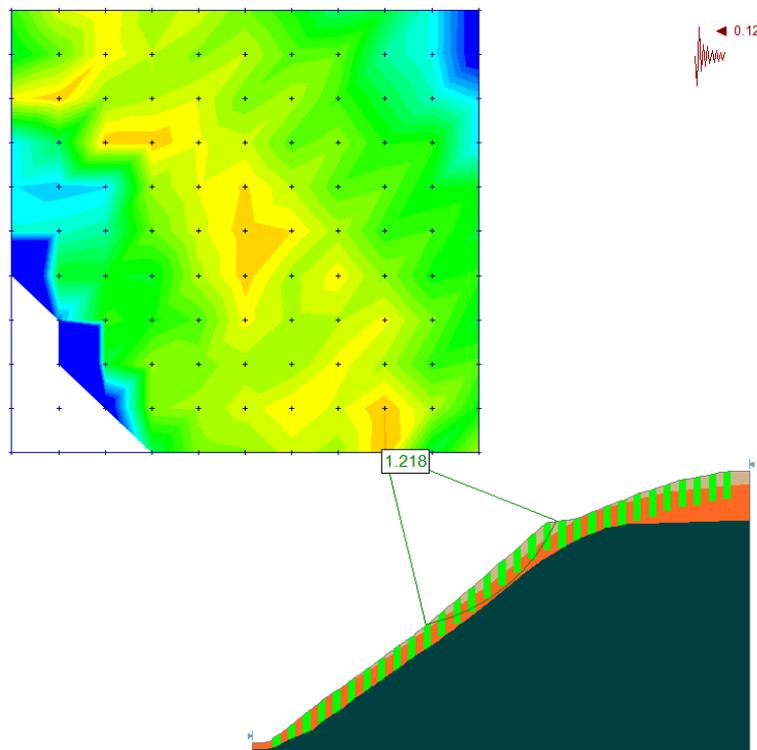


Figura 85: Análisis pseudoestático para el talud en estudio con presencia de vetiver
Janbú FS=1.218.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global con técnica de bioingeniería.

FACTOR DE SEGURIDAD CON PRESENCIA DE VETIVER		
Zona de estudio	Análisis de estabilidad Estático	
	Bishop (F.S.)	Janbú (F.S.)
Talud	1.504	1.444
	Análisis de estabilidad Pseudoestático (sísmico)	
Talud	Bishop (F.S.)	Janbú (F.S.)
	1.278	1.218

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla mostrada, se aprecia como la aplicación de la técnica de bioingeniería usando pastos de vetiver, mejora la condición de estabilidad del talud; esto se ve reflejado en el cambio de una condición inestable a estable para el método de Bishop S., pero para el método de Janbú el talud sigue aún inestable, aunque el aporte de las raíces es significativo.

4.1.8. Evaluación y comparación de los factores de seguridad en condiciones actuales y aplicando la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver

En el siguiente gráfico y tabla se resumen los parámetros de resistencia obtenidos con el ensayo de corte directo, sin y con presencia de raíces de pastos vetiver.

Tabla 58: Factores de seguridad sin y con la técnica de bioingeniería.

FACTOR DE SEGURIDAD		
Zona de estudio	Análisis de estabilidad estático	
	Bishop (F.S.)	Janbú (F.S.)
Sin Bioingeniería de Vetiver	0.905	0.881
Con Bioingeniería de Vetiver	1.504	1.444
Incremento (%)	66.19	63.90
	Análisis de estabilidad pseudoestático	
Sin Bioingeniería de Vetiver	0.751	0.728
Con Bioingeniería de Vetiver	1.278	1.218
Incremento (%)	70.17	67.31
Promedio (%)	68.18	65.61

Fuente: Elaboración propia.

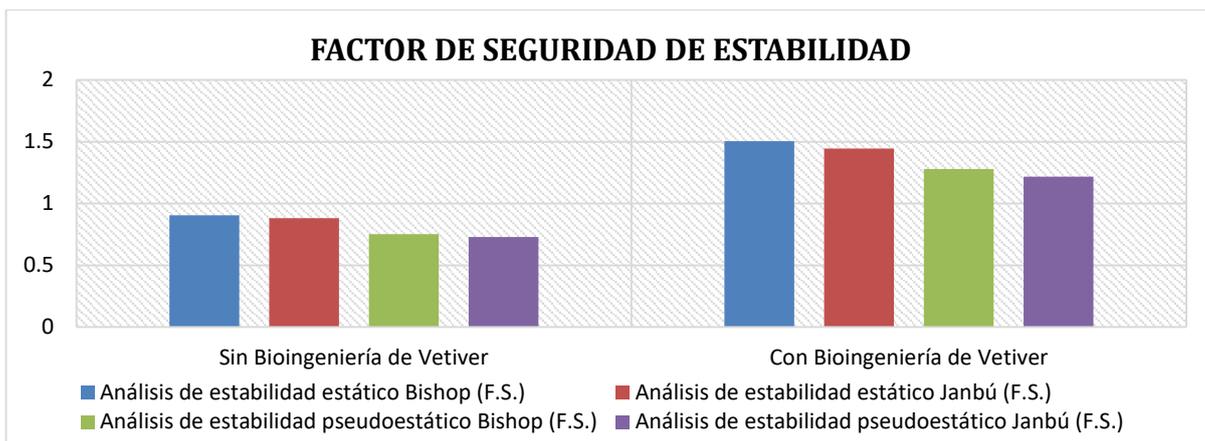


Gráfico 11: Factores de seguridad estático y pseudoestático sin y con bioingeniería de vetiver.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico mostrado, se aprecia la mejora en un promedio de 68% en el incremento de los factores de seguridad de estabilidad mediante el empleo de la técnica de bioingeniería usando pastos de vetiver. Además, notamos que la comparación de los resultados del talud antes de usar vetiver o un talud sin bioingeniería es más inestable que el talud actual. El vetiver mejora considerablemente la estabilidad, disminuyendo la probabilidad de que ocurran deslizamientos y fallas en el talud.

4.1.9. Evaluación y comparación de presupuestos de estabilización de talud según la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver versus el método de corte de taludes “Banquetas”

- Desbroce y limpieza de desnivel (hileras)

Tabla 59: Consideraciones técnicos.

Parámetros	Valor
Área total inestable (m ²)	2290.926
N° de hileras	31
Intervalo entre hileras (m)	1
Longitud total de hilera (m)	2235.5

Fuente: Elaboración propia.

- **Trazo de hileras**

Tabla 60: Consideraciones técnicas para el trazado.

Parámetros	Valor
Pendiente de talud	36.40°
Hileras	Líneas de contorno
Intervalo entre hileras (m)	1
Hilera superior	Cabeza de talud
Hilera inferior	Pie de talud

Fuente: Elaboración propia.

- **Surcado de las hileras**

Tabla 61: Dimensiones del surco de establecimiento del vetiver.

Parámetros	Valor
Ancho de surcado (m)	0.15
Profundidad del surcado (m)	0.20
Surcado de hileras (m)	2235.5

Fuente: Elaboración propia.

- **Preparación y adición de sustrato de siembra**

Tabla 62: Consideraciones para adición de sustrato de siembra del vetiver.

Parámetros	Valor
Ancho de surcado (m)	0.15
Profundidad del surcado (m)	0.20
Longitud total de hilera (m)	2235.5
Volumen de sustrato de siembra (m ³)	67.07

Fuente: Elaboración propia.

- **Cantidad de esquejes de Vetiver**

Tabla 63: Criterios técnicos para el cálculo del total de esquejes de vetiver.

Parámetros	Valor
Longitud total de hilera (m)	2235.5
Intervalo entre plantas (m)	1.17
Esquejes de Vetiver	1908
Resiembra (10%)	191
Total de esquejes requeridas (und)	2099

Fuente: Elaboración propia.

- **Plantado de esquejes de Vetiver**

Tabla 64: Establecimiento de esquejes de vetiver.

Parámetros	Valor
N° de hileras	31
Intervalo entre hileras (m)	1
Longitud total de hilera (m)	2235.5

Fuente: Elaboración propia.

- **Riego**

Tabla 65: Volumen de agua para riego.

Parámetros	Valor
Longitud total de hilera (m)	2235.5
N° de plantas de vetiver	2099
Volumen requerido por 1 m de hilera (m3)	0.001
Total de agua (m3)	2.24

Fuente: Elaboración propia.

- **Resiembra**

Tabla 66: Consideraciones de resiembra de vetiver.

Parámetros	Valor
Longitud total de hilera (m)	2235.5
Resiembra (m)	223.55

Fuente: Elaboración propia.

- **Fertilización**

Tabla 67: Consideraciones de fertilización del vetiver.

Parámetros	Valor
Longitud total de hilera (m)	2235.5
N° de plantas de vetiver	2099
Cantidad requerido por 1m de hilera (kg)	0.10
Total de fosfato di amónico – FDA (kg)	223.55

Fuente: Elaboración propia.

- **Poda**

Tabla 68: Consideraciones de poda del vetiver.

Parámetros	Valor
Longitud total de hilera (m)	2235.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69: Presupuesto para la estabilización de taludes con vetiver.

PROYECTO DE TESIS					
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019					
PROPUESTA ECONOMICA DE ESTABILIZACION MEDIANTE BIOINGENIERIA - VETIVER					
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	INSTALACION Y MANTENIMIENTO				24185.06
01.01	CONSTRUCCIONES PROVISIONALES				957.06
01.01.01	ALMACEN Y GUARDIANIA DE OBRA	glb	1	957.06	957.06
01.02	TRABAJOS PRELIMINARES				14693.86
01.02.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE DESNIVEL	m	2235.51	0.84	1870.32
01.02.02	TRAZOS, NIVELES Y REPLANTEO DE HILERAS	m	2235.51	2.40	5359.32
01.02.03	SURCADO DE 0.15m X 0.20m DE ANCHO Y PROFUNDIDAD	m	2235.51	0.80	1788.63
01.02.04	PREPARACION DE SUSTRATO DE SIEMBRA	m3	67.07	51.51	3454.84
01.02.05	ADQUISICION Y TRANSPORTE DE COBERTURA VEGETAL	und	2099.00	1.06	2220.74
01.03	REVEGETALIZACION				3934.99
01.03.01	ADICION DE SUSTRATO DE SIEMBRA	m3	67.07	32.00	2146.36
01.03.02	ESTABLECIMIENTO DE ESQUEJES DE VETIVER	m	2235.51	0.80	1788.63
01.04	MANTENIMIENTO				4599.16
01.04.01	RIEGO	m3	2.24	3.92	8.76
01.04.02	RESIEMBRA	m	223.55	0.90	201.87
01.04.03	FERTILIZACION	kg	223.55	11.63	2599.90
01.04.04	PODA	m	2235.51	0.80	1788.63
DISEÑO DE PIE DE PRESUPUESTO	COSTO DIRECTO				24185.06
	GASTOS GENERALES 5%				1209.25
	UTILIDAD 10%				2418.51
	SUBTOTAL				27812.82
	I.G.V (18%)				5006.31
	PRESUPUESTO DE LA OBRA				32819.13

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 12)

Como se muestra en la tabla, el presupuesto total para la estabilización convencional del talud, asciende a S/ 32819.13. Mientras que, el costo directo mediante bioingeniería - vetiver es de: S/ 24185.06 para un área de vulnerabilidad de 2290.926 m²; por lo tanto, el costo de unidad de siembra es de S/ 10.56.

Tabla 70: Presupuesto para la estabilización de taludes con Vetiver.

PROYECTO DE TESIS					
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019					
PROPUESTA ECONOMICA DE ESTABILIZACION MEDIANTE CORTE - BANQUETAS					
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	INSTALACION Y MANTENIMIENTO				36109.76
01.01	CONSTRUCCIONES PROVISIONALES				957.06
01.01.01	ALMACEN Y GUARDIANIA DE OBRA	glb	1	957.06	957.06
01.02	TRABAJOS PRELIMINARES				7229.64
01.02.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	m	2235.51	0.84	1870.32
01.02.02	TRAZOS, NIVELES Y REPLANTEO	m	2235.51	2.40	5359.32
01.03	MOVIMIENTO DE TIERRAS				27923.07
01.03.01	CORTE DE TALUD Y ELIMINACION PARA CONFORMACION DE BANQUETA	m3	642.87	43.44	27923.07
DISEÑO DE PIE DE PRESUPUESTO	COSTO DIRECTO				36109.76
	GASTOS GENERALES 5%				1805.49
	UTILIDAD 10%				3610.98
	SUBTOTAL				41526.23
	I.G.V (18%)				7474.72
	PRESUPUESTO DE LA OBRA				49000.95

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 12)

Como se muestra en la tabla, el presupuesto total para la estabilización del talud se estima en S/ 49 000. 95. Mientras que, el costo mediante corte Banquetas es de S/ 36 109. 76, para un área de vulnerabilidad de 2 290.926 m²; por lo tanto, el costo de unidad de corte es de S/ 15.76.

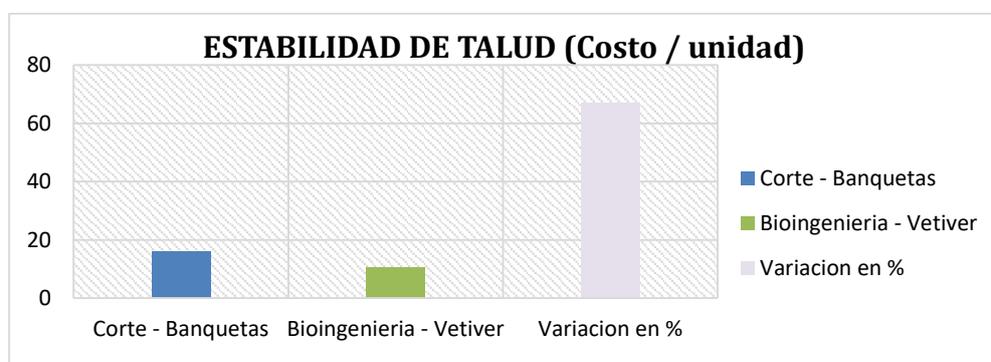


Gráfico 12: Variación de costos de bioingeniería – vetiver en comparación con Corte - Banquetas.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico mostrado, se aprecia la ventaja económica del uso de la bioingeniería de vetiver en comparación al método convencional de corte de banquetas. Los costos de bioingeniería de vetiver son solo 67.01% (reduce costos en un 32,99%) de los costos de la medida tradicional (banquetas), Además, los costos anuales de mantenimiento se reducen, una vez que las barreras de vetiver están adecuadamente establecidas.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La condición actual del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, en base a los estudios pertinentes ya expuestos, se determinó que el área en estudio presenta problemas de deslizamientos y erosiones constantes por las características propias del suelo (limo – arcilloso) y la geométrica del área (pendiente media natural de 73.73% (36.40°), con distancia vertical de pie de cabeza del talud de 19.85 m, distancia horizontal de 33.50 m y ancho de escarpe de 80.20 m, con un perfil longitudinal semirrecta cóncava). Ante estos resultados se evidenció la inestabilidad del talud por lo que se aplicó la técnica de bioingeniería empleando pastos vetiver para solucionar este problema. Las mismas características también evidencia, Mora Ortiz y otros, 2012, en su tesis: *“Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas”*; donde se encontró que, para una inclinación cercana a 25.11° y una distancia horizontal de pie a cabeza de 150 m, los taludes con suelos finos (limosos) son inestables; por lo que aplicó también la misma técnica. En tal sentido, se demuestra, como se planteó en el objetivo de la investigación que, la bioingeniería es la opción más adecuada para solucionar la inestabilidad de los taludes.
- Con relación a los estratos de suelo del talud se evidenció que, la caracterización física y mecánica del suelo eran de estrato de arena limo-arcillosa (SC-SM) con grado de cohesión de 0.0503 kg/cm² y ángulo de fricción de 20.41°. El estrato de arena arcillosa (SC) con grado de cohesión de 0.0538 kg/cm² y ángulo de fricción de 19.14°. Ambos resultados responden al talud en su proceso inicial, sin considerar el aporte de las raíces del pasto vetiver. Mientras que, los parámetros de resistencia considerando el aporte de raíces del vetiver, para el estrato de suelo (SC-SM) cambia. El grado de cohesión de 0.0404 kg/cm² y ángulo de fricción de 22.41°. El estrato de suelo (SC) determinó un grado de cohesión de 0.0382 kg/cm² y ángulo de fricción de 24.61°; lo que demuestra que, el grado de cohesión disminuye en un 24.34%, pero con el aporte de la tensión de las raíces de vetiver se eleva considerablemente y el ángulo de fricción del suelo aumentó en un 19.19%. Asimismo, los esfuerzos de corte en el suelo, aumentan para cargas normales, de 2 kg y 4 kg; pero en el espécimen de carga normal de 8 kg aumenta un porcentaje de 9.45% para el estrato (SC-SM), y el caso más favorable ocurre en el estrato (SC) con un aumento de 20.74 % en el espécimen de

carga normal de 8 kg. Los resultados expuestos coinciden con el estudio de Sánchez Restrepo y otros, 2019, en la tesis *“Control de la erosión de taludes mediante el uso de vetiver y micorrizas arbusculares, zona de Soceagro en el Municipio de Villavicencio - Meta”*; donde se encontró un aumento de las propiedades mecánicas del suelo por acción de la raíz potencializada por las micorrizas y su posterior mejora en la estabilidad del talud, por lo que, la implementación de vetiver es viable para el control de la erosión en taludes, ya que mejora las propiedades de resistencia al corte del suelo, información que coincide con el estudio realizado por Sánchez Restrepo y otros, 2019, por lo que podemos aseverar que se alcanzó el objetivo de la investigación.

- En relación a los factores de seguridad de estabilidad del talud, con la aplicación de la técnica de bioingeniería esta mejoró, de 1.504 y 1.444 para un análisis en condición estática y un factor de seguridad de 1.278 y 1.218 para condición pseudoestático. Con relación a este ítem, igual resultado obtuvo Wellmann Castellanos, 2017; en su estudio *“Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas”*, quien después de diversos estudios para disminuir el riesgo de desprendimiento masivo en el área a causa de la erosión laminar, por viento y escorrentía, determinó que, la siembra del pasto vetiver mejora las condiciones mecánicas y de seguridad en el talud de investigación. Por lo tanto, de lo expuesto, se precisa que se logró variar el factor de estabilidad del talud mediante la técnica de bioingeniería con pastos vetiver, teniendo coincidencia en la mejora de propiedades mecánicas del suelo, así como en el factor de seguridad de estabilidad, difiriendo en el porcentaje de variación, demostrado que el objetivo de la investigación se ha alcanzado.
- Los factores de estabilidad se determinaron en base a las propiedades del suelo y mediante la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivos de pastos vetiver, obteniendo una variabilidad en los factores de estabilidad de 0.905 a 1.504 en condiciones estáticas; y 0.751 a 1.278 en condiciones pseudoestáticas, encontrándose mejoras de estabilidad en un 66% y 70% para condiciones estáticas y pseudoestáticas. Sumado a esto, los costos de esta técnica son menores, en comparación a la medida convencional con cortes para banquetas, en un 33%. Por lo tanto, se considera a la bioingeniería usando pastos vetiver como una herramienta no costosa e importante para la mejora los parámetros geotécnicos de resistencia al corte del suelo, como en

el grado de cohesión y el ángulo de fricción (20%), debido al aporte del esfuerzo de tensión que las raíces del vetiver aportan al grado de cohesión del suelo. Esta información se corrobora con la tesis de Quiros Castegnaro, 2012, titulada: *“Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos”*, donde se encontró de manera experimental el aumento de la resistencia al corte en suelos limosos y arcillosos de alta compresibilidad, así como en suelos limosos arenosos con el uso de raíces de pasto vetiver y; además, de ser un medio de bajo costo y sencillo para evaluar el efecto de las raíces en la estabilidad de taludes. Según el objetivo de la tesis, se logró identificar la variabilidad de estabilidad del talud mediante la bioingeniería empleando pastos vetiver, llegando a plantear una nueva alternativa en la estabilización de taludes, y teniendo coincidencias con los resultados para suelos arcillosos del estudio realizado por Quiros, 2012.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En cuanto a la evaluación de la condición actual de estabilidad del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa, presenta suelos arenosos limo-arcillosos. Las características geométricas del talud muestran una pendiente media natural de 73.73% (36.40°), distancia vertical de pie a cabeza de 19.85 m, distancia horizontal de 33.50 m y un ancho de escarpe de 80.20 m con un perfil longitudinal semirrecta cóncava. Los planos de falla superficiales precisan un factor de seguridad de estabilidad de 0.905 en condición estática y 0.751 en condición pseudoestático (método Bishop simplificado). Estos resultados evidenciaban la inestabilidad del talud, tal es así que se consideró que, la alternativa más viable para revertir este hecho es la técnica de bioingeniería empleando pastos vetiver.

- En relación a las características físicas y mecánicas del suelo del talud en estudio, haciendo uso de raíces del pasto vetiver, para el estrato de suelo SC-SM, se obtuvo un grado de cohesión de 0.0404 kg/cm² y ángulo de fricción de 22.41°; para el estrato de suelo SC, se determinó un grado de cohesión de 0.0382 kg/cm² y ángulo de fricción de 24.61°, a comparación de la información obtenida del talud al inicio del estudio, donde se identificó los parámetros de resistencia del suelo para la arena limo-arcillosa (SC-SM), que evidenciaba un grado de cohesión de 0.0503 kg/cm² y ángulo de fricción de 20.41° y; en el estrato de arena arcillosa (SC), presentaba un grado de cohesión de 0.0538 kg/cm² y ángulo de fricción de 19.14°. Con la información expuesta se evidenció que, el grado de

cohesión disminuyó en un 24.34%. El ángulo de fricción del suelo se incrementó en un 19.19%; además, el efecto de las raíces sobre la resistencia al corte del suelo con diferentes cargas normales, tiende a incrementarse considerablemente, para estratos de SC-SM y SC. Para especímenes de 2 kg y 4 kg aumenta mínimamente, pero en el de 8 kg aumenta un máximo de 9.45% y 20.74% respectivamente.

- En cuanto a la determinación de los factores de seguridad de estabilidad del talud, con la aplicación de la técnica de bioingeniería la condición de estabilidad del talud llegó a una estabilidad de 1.504 y 1.444 para el análisis en condición estática y un factor de seguridad de 1.278 y 1.218 para condición pseudoestático (método de Bishop y Janbú); en comparación a la información obtenida al inicio del estudio que, determinaba una inestabilidad con un factor de seguridad de 0.905 y 0.881 para un análisis en condición estática, y un factor de seguridad de 0.751 y 0.728 para una condición pseudoestático (método de Bishop y Janbú). Al aplicar la técnica de la bioingeniería se evidenció mejoras de estabilidad del talud mediante el empleo de pastos vetiver en un 66% y 70% para condiciones estáticas y pseudoestático (método Bishop) y, en un 64% y 67% para condiciones estáticas y pseudoestático (método Janbú); pasando de un factor inestable a uno estable.
- Según la evaluación de estabilidad del talud en estudio, con relación a las propiedades del suelo y la aplicación de la técnica de bioingeniería, empleando cultivos de pastos vetiver, se evidencia mejoras de estabilidad en un 66% y 70% para condiciones estáticas y pseudoestáticas, respectivamente. Además, los costos, con la aplicación de esta técnica se reducen en 33%, en comparación a la medida convencional de cortes para banquetas. Por lo tanto, se concluye que, la implementación de pastos vetiver es un camino viable y rentable económicamente como alternativa en la estabilización y control de erosión de taludes en zonas tropicales.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, en el tema del estudio de la topografía y el estudio geotécnico, se cuente con los equipos calibrados, con el fin de que los resultados sean más confiables y disminuya la discrepancia en resultado, logrando así resultados más afinados, todo esto con la finalidad de poder plantear soluciones integrales en temas de estabilidad de taludes.
- Se recomienda que, al momento de realizar los ensayos de laboratorio sean de acuerdo al tipo de suelo encontrado, ya que puede existir partículas de gran tamaño, con lo cual es necesario realizar un ensayo de corte directo in situ o a gran escala, con el fin de que los resultados sean más confiables y disminuya la discrepancia en resultado de los parámetros; así mismo debido a la falta de instrumentación no se pudo realizar el ensayo de tensión de las raíces del Vetiver en laboratorio, por lo que para efectos de propuestas de solución de inestabilidad se tomaron como referencias antecedentes a esta investigación, por lo que se espera que más adelante se pueda contar con las herramientas necesarias para realizar ciertos tipos de ensayos.
- Se recomienda que, si se desea usar el software slide para realizar análisis de estabilidad de taludes, se deba tener conocimiento básico de mecánica de suelos, el cómo obtener los parámetros de resistencia del suelo como el ángulo de fricción, grado de cohesión y peso específico, así mismo que los resultados del factor de seguridad dados por el Slide sean los que en realidad se presenta en campo.
- Se recomienda que, para la estabilidad del talud en general, no solamente basarse en el factor de seguridad técnico y económico, sino también en otros factores como la accesibilidad para la construcción, trabajos previos, tema de materiales presentes en la zona, además de estos se recomienda plantear y realizar procesos de plantaciones de Vetiver, mediante el cual se logre insertar una metodología con lo cual permita una mayor efectividad en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bañon, Blazquez Luis y Bevia Garcia, Jose. 2012.** *Manual de Carreteras*. Lima : s.n., 2012. pág. 328. Vol. II.
- Borja S., Manuel. 2012.** *Metodologia de la investigacion para ingenieros*. Chiclayo : s.n., 2012.
- Braja Das, M. 2013.** *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica*. 4ta Ed. Mexico : Cengage Learning Editores, 2013. 978-607-519-373-1.
- Castillo Acuña, A. M. 2010.** *Análisis del efecto de la cohesión aparente en el cálculo de estabilidad de taludes*. San Pedro : Unversidad de Costa Rica, 2010.
- Ccanto Mallma, Germán. 2010.** *Metodologia de la investigacion cientifica en ingenieria civil - ingenieria de transportes*. 3ra. ed. 2010. 0260-89-330-0.
- CE.020. 2019.** *Estabilizacion de suelos y taludes*. Lima : s.n., 2019.
- Crespo Villalaz, Carlos. 2004.** *Mecanica de suelos y cimentaciones*. Mexico : LIMUSA, 2004. 968-18-6489-1.
- Das, Braja M. 2013.** *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica*. Cuarta. Mexico : Cengage Learning Editores, 2013. pág. 658. 978-607-519-373-1.
- De la Cruz Fallaque, Luis Alberto. 2005.** *Uso de la Bioingenieria de suelos para el control de erosion hidrica en taludes*. Lima : s.n., 2005.
- De La Cruz Quispe, L. Á. y Tunque Huamán, L. M. 2015.** *Inestabilidad de taludes en el sector de Santa Bárbara de la Ciudad de Huancavelica*. Huancavelica : Universidad Nacional de Huancavelica, 2015.
- E.030, Diseño Sismorresistente. 2018.** *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima : s.n., 2018.
- E.050, Norma Tecnica Peruana. 2015.** *Suelos y Cimentaciones*. Lima : MACRO, 2015.
- Escobar Potes, Carlos Enrique. 2017.** *Geotecnia para el tropico andino*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- Fernandez Espinoza, Joel Manuel. 2015.** *Propuesta de restauracion del tramo urbano del rio Rimac mediante la aplicacion de Bioingenieria*. Lima : Pontificia Universidad Catolica del Peru, 2015.
- Hernandez Sampieri, Roberto, Fernandez Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. 2010.** *Metodologia de la investigacion*. 5ta ed. Mexico D.F. : McGRAW-HILL, 2010. 978-607-15-0291-9.
- Herrera Passos, Jessika Magreth. 2017.** *Evaluacion de parametros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver*. Colombia : Revista de la escuela Colombiana de Ingenieria, 2017. n° 108.

- Huariccallo Maquera, Jose Luis. 2013.** *Propuesta de estructuras de Biotecnología para el control de erosión hídrica (cárcava) en la comunidad de Challacollo-Ilave-Puno-2013.* Puno : Universidad Nacional del Altiplano, 2013.
- Iberico Rodriguez, Rodolfo Ricardo. 2015.** *Estabilización y recuperación de taludes en carreteras, caso "IIRSA NORTE TRAMO N° 1 KM 45+690 - KM 45 + 830".* Lima : s.n., 2015.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1986.** *Manual de taludes.* Madrid : Ed. EPTISA, 1986.
- Martinez Galvez, Luis Martin. 2006.** *Estabilización de taludes con reforestación.* Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, 2006.
- Martinez, J. 2010.** *Mezclas ecológicas para el control de la erosión y estabilidad de taludes.* s.l. : Facultad de Ingeniería, 2010. Vol. 19.
- Mays Arratea, Nirvana Candy. 2017.** *Reducción de la erosión hídrica del suelo, con la utilización de la Vetiveria Zizanioides en la Microcuenca de Tingoragra-Nauyan Rondos, Provincia de Huánuco 2017.* Huánuco : Universidad de Huánuco, 2017.
- Miranda Muñoz, Ricardo. 2016.** *Revisión panorámica del uso del pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides) en restauración de taludes como técnica de Bioingeniería del suelo.* Bogotá : Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2016.
- Mora Ortiz, R. S. y Rojas Gonzáles, E. 2012.** *Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas.* Chiapas : Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2016.** *Manual de ensayos de materiales.* Lima : s.n., 2016.
- NTP 339.127, Norma Técnica Peruana. 2006.** *Contenido de humedad.* Lima : s.n., 2006.
- NTP 339.128, Norma Técnica Peruana. 2006.** *SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico.* Lima : Indecopi, 2006.
- NTP 339.129, Norma Técnica Peruana. 2006.** *SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.* Lima : Indecopi, 2006.
- Quiros Castegnaro, Andres. 2012.** *Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos.* Costa Rica : Universidad de Costa Rica, 2012.
- Sackschewski Chapman, Carlos Enrique. 2017.** *Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta - Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110.* Lima : s.n., 2017.

- Sanchez Restrepo, Salomon Andres y Oviedo Solano, Sergio. 2019.** *Control de la erosión de taludes mediante el uso de Vetiver y Micorrizas arbusculares, zona de Soceagro en el Municipio de Villavicencio - Meta.* Villavicencio : s.n., 2019.
- SERNANP. 2017.** *Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado.* Lima : s.n., 2017.
- Siva Subramanian, S., Ishikawa, T. y Tokoro, T. 2017.** *Stability assessment approach for soil slopes in seasonal cold regions.* 2017. págs. 154-169.
- Stead , D., y otros. 2000.** *Mechanism of failure of complex landslides: A Numerical Modelling Perspective.* Cardiff : International symposium on landslides, 2000.
- Suarez Diaz, Jaime. 2000.** *Análisis Geotécnico.* Bucaramanga : Division Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2000. Vol. Tomo I. ISBN 958-33-2734-4.
- . **2001.** *Control de erosión en zonas tropicales.* Bucaramanga : Division Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2001. ISBN 958-33-2734-4.
- . **2006.** *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Bucaramanga : Division Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2006. ISBN 958-33-2734-4.
- . **2000.** *Técnicas de Remediación.* Bucaramanga : Division Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2000. Vol. Tomo II. ISBN.
- Valverde Ruiz, E. A. 2010.** *Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud.* Cartago : Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
- Vilchez Mata, Manuel. 2012.** *Evaluación de peligros geológicos en el tramo de Carretera Izcuchaca- Acostambo.* Huancavelica, INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO - PERÚ. Acostambo : s.n., 2012.
- Wellmann Castellanos, Heike Gretel Hannelore. 2017.** *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto Vetiver en el talud ubicado en el Parque Ecológico Las Ardillas.* Guatemala : s.n., 2017.

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

ANEXO 2: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

ANEXO 3: PLANO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4: PLANO CLAVE DE LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 5: PLANO ESTRATIGRÁFICO DEL TALUD

ANEXO 6: PLANO DE CALICATAS DEL TALUD

ANEXO 7: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS ENSAYOS DE SUELOS EN LABORATORIO

ANEXO 8: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

ANEXO 9: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO SIN Y CON PRESENCIA DE RAÍCES DE PASTOS VETIVER

ANEXO 10: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

ANEXO 11: ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 12: PRESUPUESTO DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

“ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019”			
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿En qué medida la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales, mejorará en la estabilidad del talud?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>¿En qué medida la condición actual del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa se ajusta para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales?</p> <p>¿Cuál es la magnitud de las características físicas y mecánicas del suelo del talud para la evaluación de aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales?</p> <p>¿En qué medida varía el factor de seguridad de estabilidad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Identificar la variabilidad de estabilidad del talud mediante la aplicación de la técnica de bioingeniería en zonas tropicales empleando cultivo de pastos Vetiver.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>Identificar la condición actual de estabilidad del talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.</p> <p>Determinar la magnitud de las características físicas y mecánicas del suelo del talud para la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.</p> <p>Calcular el porcentaje de variación del factor de seguridad de estabilidad del talud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La aplicación de la técnica de bioingeniería mediante las plantaciones de cultivos de pastos Vetiver en zonas tropicales mejora la estabilidad de talud.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>La condición actual de estabilidad que presenta el talud de la progresiva 33+450 km de la carretera Pozuzo – Santa Rosa es de una configuración inestable según las características del suelo y geométricas que presenta el talud.</p> <p>En el talud de estudio los suelos comunes son de mediana y alta cohesividad, cuya propiedad mecánica de resistencia aumenta en su magnitud con la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.</p> <p>El factor de seguridad de estabilidad del talud aumenta considerablemente debido a la aplicación de la técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver en zonas tropicales.</p>	<p><u>VARIABLES INDEPENDIENTES</u></p> <p>X1: Técnica de bioingeniería empleando cultivo de pastos Vetiver (Condiciones de la propuesta de solución)</p> <p><u>VARIABLE DEPENDIENTE</u></p> <p>Y1: Estabilidad de talud (Condiciones actuales del talud)</p>

ANEXO 2: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

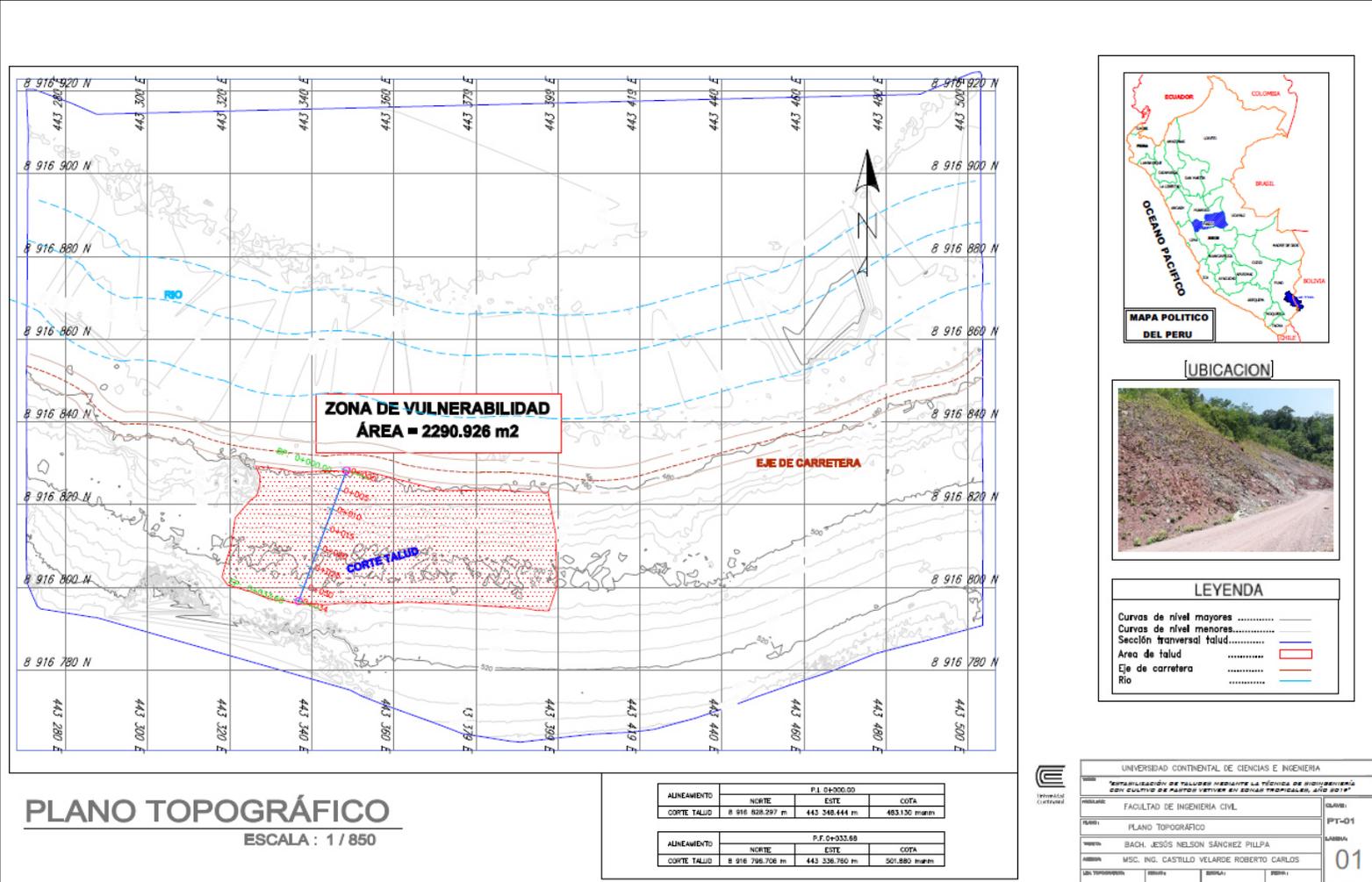


Figura 86: Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con Dron.
Fuente: Elaboración Propia



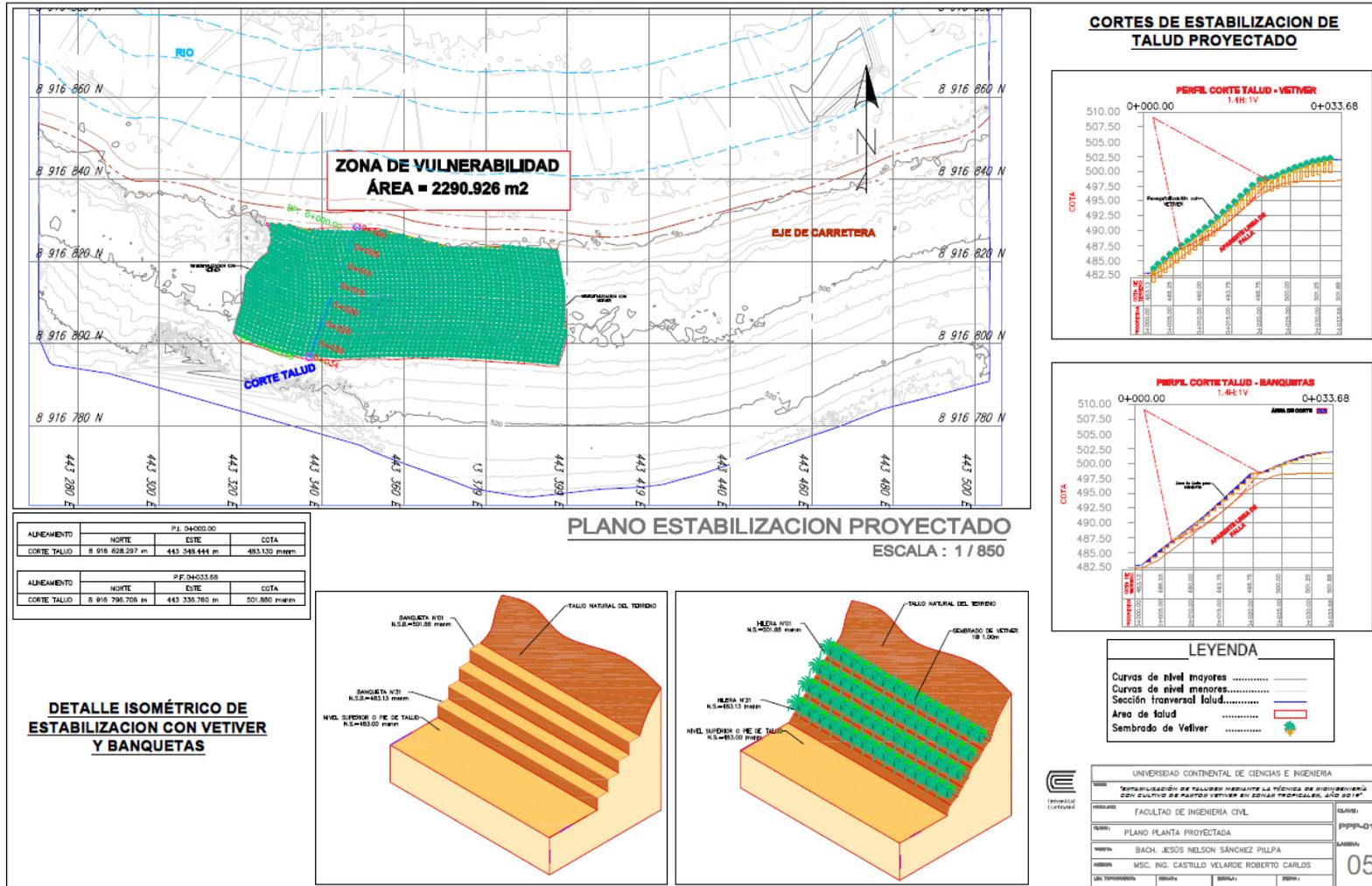
Figura 87: Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con Dron.
Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3: PLANO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO



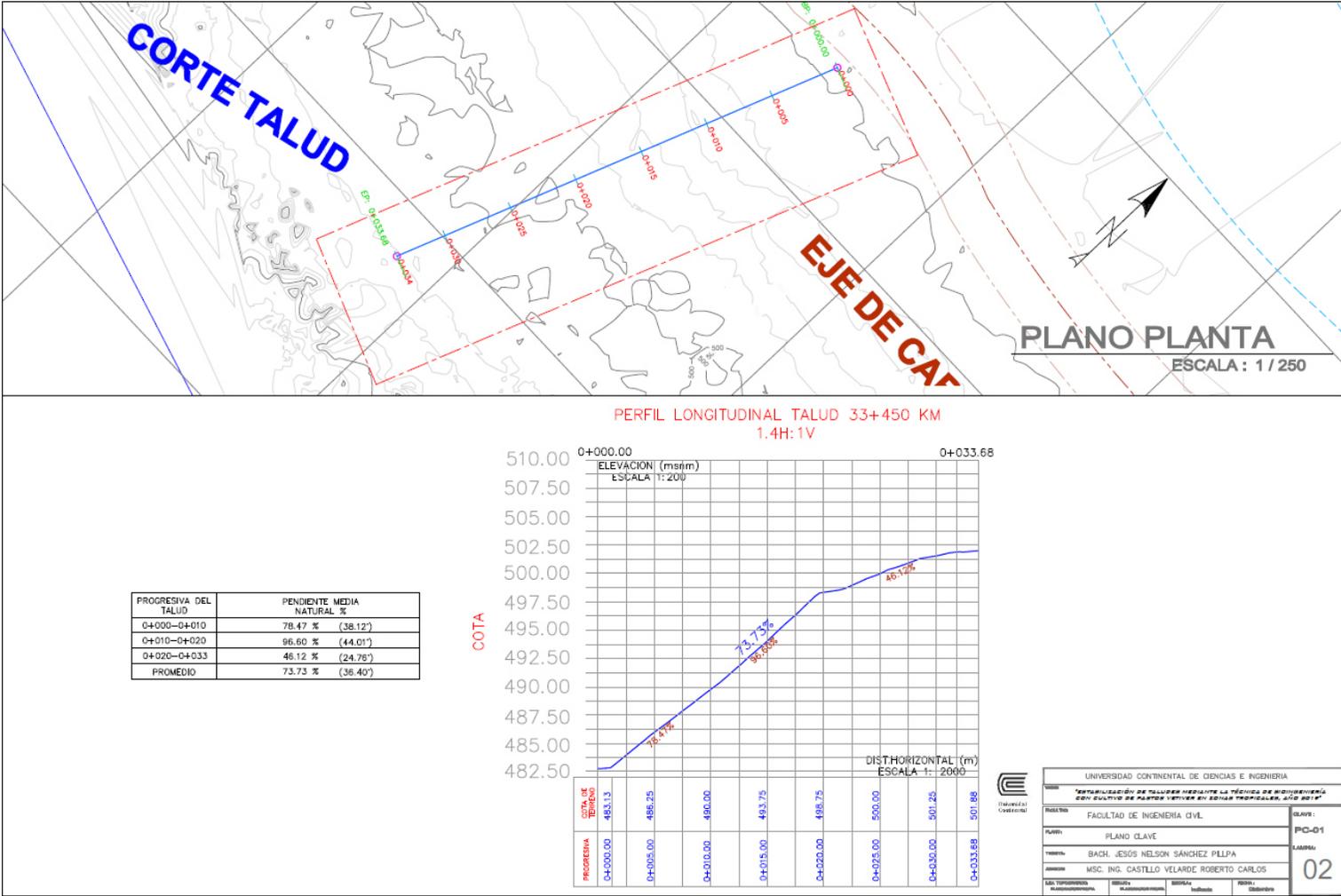
Fuente: Elaboración Propia.

- PLANO DE PLANTA PROYECTADA



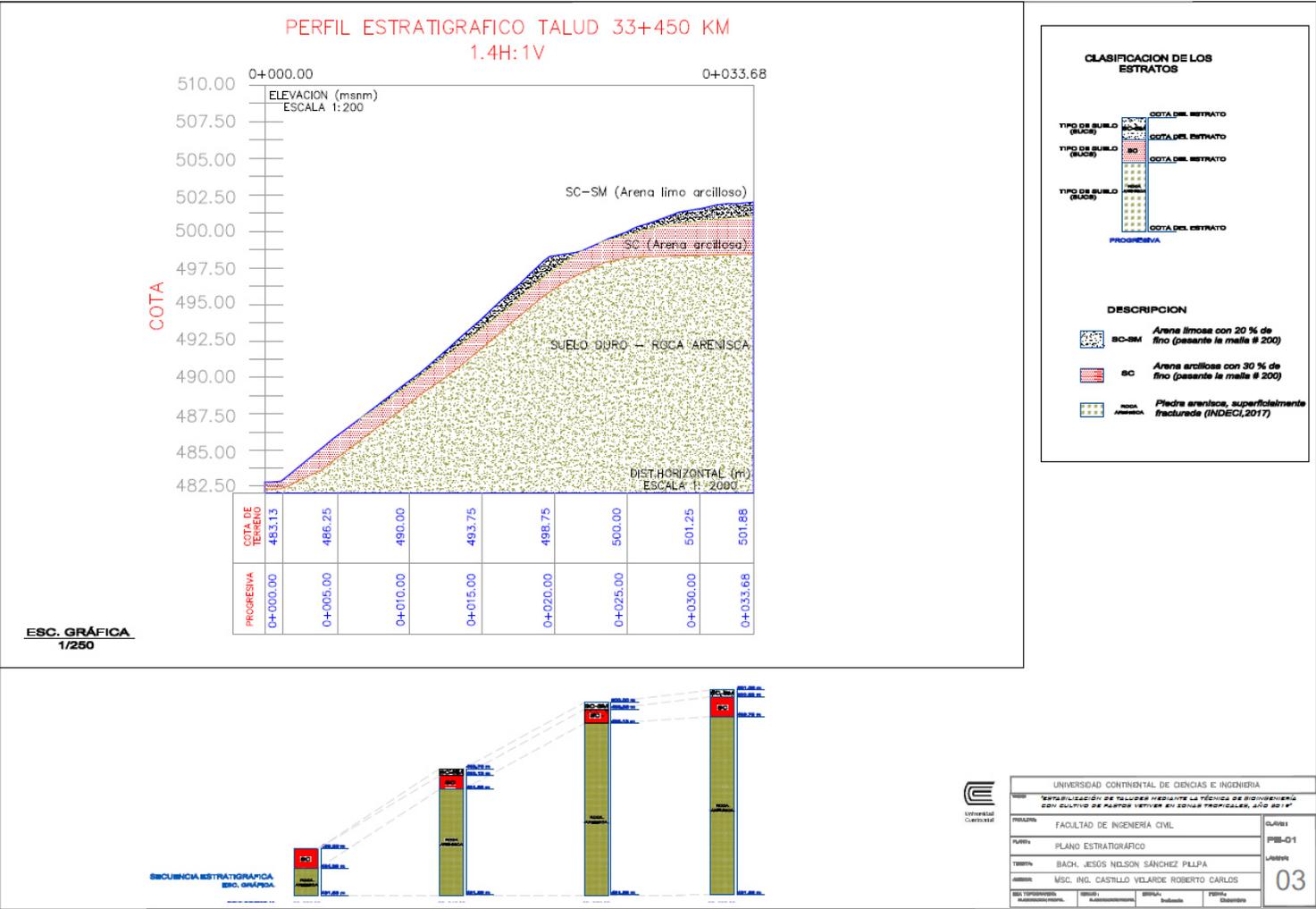
Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 4: PLANO CLAVE DE LA ZONA DE ESTUDIO



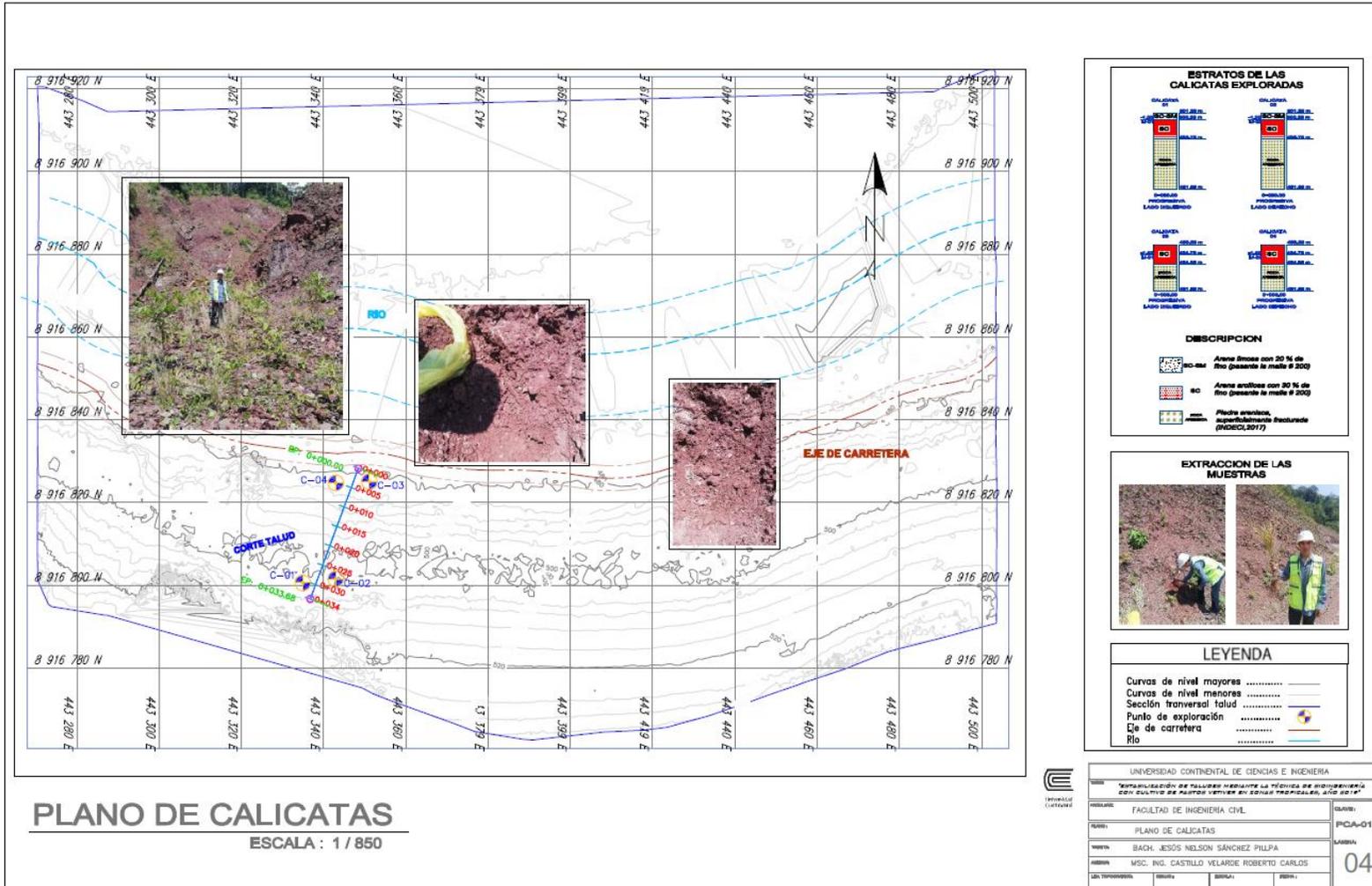
Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 5: PLANO ESTRATIGRÁFICO DEL TALUD



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 6: PLANO DE CALICATAS DEL TALUD



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 7: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS ENSAYOS DE SUELOS EN LABORATORIO

- ANEXO 7.1: Ensayos de Contenido de Humedad (NTP 339.127-MTC E 108)



Figura 88: Determinación del contenido de humedad natural de las muestras.

Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 7.2: Ensayos de granulometría por tamizado (NTP 339.128-MTC E 107)



Figura 89: Análisis granulométrico por tamizado de las muestras.

Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 7.3: Ensayos de límites de consistencia (NTP 339.129-MTC E110-E111)



Figura 90: Ensayos de límite líquido de las muestras.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 91: Ensayos de límite plástico de las muestras.

Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 7.4: Ensayos de Corte Directo (NTP 339.171-MTC E123)



Figura 92: Preparación de especímenes para el ensayo de corte directo sin presencia de raíces de pastos Vetiver.

Fuente: Elaboración Propia.

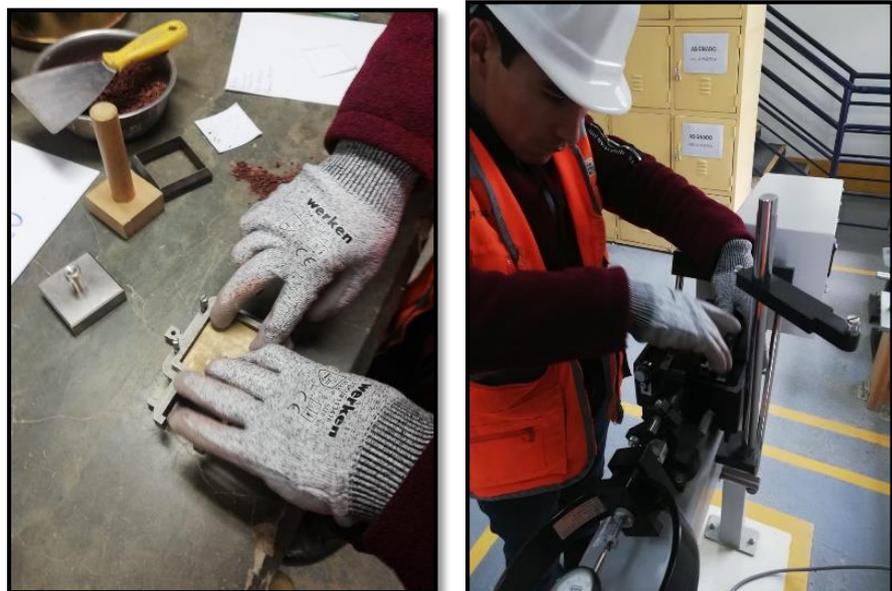


Figura 93: Preparación de especímenes para el ensayo de corte directo con presencia de raíces de pastos Vetiver.

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 8: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

- **ANEXO 8.1: Certificados de ensayos de laboratorio de la calicata C-01.**
 - **Determinación de humedad natural**
 - **Límites de consistencia**
 - **Análisis granulométrico por tamizado**
 - **Determinación de peso volumétrico de masa**

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD NATURAL
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 108, ASTM D 2216

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-01
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	T-1	T-2	T-3
PESO TARA + SUELO HUMEDO gr.	1120.40	1230.80	1112.50
PESO TARA + SUELO SECO gr.	1035.80	1136.30	1028.80
PESO DE LA TARA gr.	320.40	320.40	320.40
PESO DEL AGUA gr.	84.60	94.50	83.70
PESO SUELO SECO gr.	715.40	815.90	708.40
HUMEDAD %	11.83	11.58	11.82
HUMEDAD NATURAL PROMEDIO %	11.74		

Observaciones: _____

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA

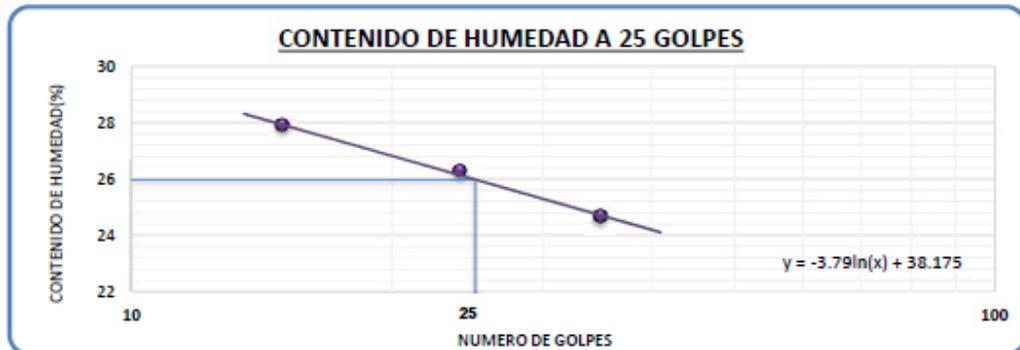
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 110 - MTC E 111, ASTM D 4318, AASHTO T 89 - T 90

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-01
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

LÍMITE LIQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)				
Nº TARA		LL-1	LL-2	LL-3
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		32.88	32.75	33.18
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		28.80	28.88	29.42
PESO DE AGUA (gr.)		4.08	3.87	3.76
PESO DE LA TARA (gr.)		14.15	14.15	14.15
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		14.65	14.73	15.27
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		27.85	26.27	24.62
NUMERO DE GOLPES		15	24	35

LÍMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)				
Nº TARA		LP-1	LP-2	PROMEDIO
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		22.19	22.46	
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		20.92	21.15	
PESO DE LA TARA (gr.)		14.50	14.50	
PESO DEL AGUA (gr.)		1.27	1.31	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		6.42	6.65	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		19.78	19.70	19.74



LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LÍMITE LIQUIDO (%)	25.98
LÍMITE PLÁSTICO (%)	19.74
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	6.23

OBSERVACIONES:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

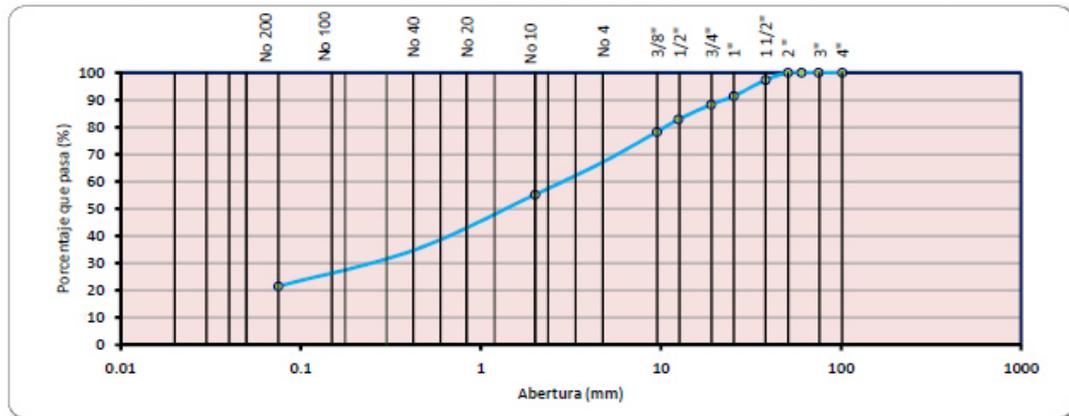
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-01
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETEND.	% RETEND. PARCIAL	% RETEND. ACUMUL.	% QUE PASA ACUMUL.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA																															
4"	101.600	0	0.0	0	100.0	<p>Pesos de Muestra</p> <table border="0"> <tr> <td>Grava > N° 4:</td> <td>1225.90</td> <td>gr.</td> <td>32.86%</td> </tr> <tr> <td>Arena < N° 4:</td> <td>1702.00</td> <td>gr.</td> <td>45.62%</td> </tr> <tr> <td>Finos < N° 200:</td> <td>802.90</td> <td>gr.</td> <td>21.52%</td> </tr> <tr> <td>Total Material Seco:</td> <td>3730.80</td> <td>gr.</td> <td>100.00%</td> </tr> </table> <p>Límites de Consistencia</p> <table border="0"> <tr> <td>Límite Líquido :</td> <td>25.98</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Límite Plástico :</td> <td>19.74</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Índice Plástico :</td> <td>6.23</td> <td>%</td> </tr> </table> <p>Clasificación del Suelo</p> <table border="0"> <tr> <td>Clasificación (SUCS) :</td> <td>SC - SM</td> </tr> <tr> <td>Clasificación (AASHTO) :</td> <td>A-1-b (0)</td> </tr> <tr> <td>Cont. de Humedad Natural(%):</td> <td>11.74</td> </tr> </table>	Grava > N° 4:	1225.90	gr.	32.86%	Arena < N° 4:	1702.00	gr.	45.62%	Finos < N° 200:	802.90	gr.	21.52%	Total Material Seco:	3730.80	gr.	100.00%	Límite Líquido :	25.98	%	Límite Plástico :	19.74	%	Índice Plástico :	6.23	%	Clasificación (SUCS) :	SC - SM	Clasificación (AASHTO) :	A-1-b (0)	Cont. de Humedad Natural(%):	11.74
Grava > N° 4:	1225.90	gr.	32.86%																																		
Arena < N° 4:	1702.00	gr.	45.62%																																		
Finos < N° 200:	802.90	gr.	21.52%																																		
Total Material Seco:	3730.80	gr.	100.00%																																		
Límite Líquido :	25.98	%																																			
Límite Plástico :	19.74	%																																			
Índice Plástico :	6.23	%																																			
Clasificación (SUCS) :	SC - SM																																				
Clasificación (AASHTO) :	A-1-b (0)																																				
Cont. de Humedad Natural(%):	11.74																																				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0																																
2 1/2"	60.350	0.0	0.0	0.0	100.0																																
2"	50.800	0.0	0.0	0.0	100.0																																
1 1/2"	38.100	100.4	2.7	2.7	97.3																																
1"	25.400	220.8	5.9	8.6	91.4																																
3/4"	19.000	116.1	3.1	11.7	88.3																																
1/2"	12.500	203.4	5.5	17.2	82.8																																
3/8"	9.500	170.8	4.6	21.8	78.2																																
N° 4	4.750	414.4	11.1	32.9	67.1																																
N° 10	2.000	445.4	11.9	44.8	55.2																																
N° 40	0.425	761.2	20.4	65.2	34.8																																
N° 200	0.075	495.4	13.3	78.5	21.5																																
< N° 200	FONDO	802.9	21.5	100.0	0.0																																
TOTAL		3730.8																																			

CURVA GRANULOMÉTRICA



Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO DE MASA

NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.139, BS 1377

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-01
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	P1	P2	P3
PESO DE TARA gr.	19.60	19.60	19.60
PESO DE TARA + MUESTRA gr.	74.30	74.70	74.40
PESO DE MUESTRA gr.	54.70	55.10	54.80
PESO DE MUESTRA + PARAFINA gr.	65.50	61.10	58.80
PESO DE PARAFINA gr.	10.80	6.00	4.00
PESO ESPECIFICO DE PARAFINA gr/cm3.	0.87	0.87	0.87
VOLUMEN DE PARAFINA cm3	12.41	6.90	4.60
VOLUMEN DE AGUA INICIAL gcm3.	500.00	500.00	500.00
VOLUMEN DE MUESTRA+PARAFINA+AGUA cm3.	543.00	538.00	535.00
VOLUMEN DE MUESTRA cm3.	30.59	31.10	30.40
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.79	1.77	1.80
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.79		

Observaciones: 17.53 KN/m3

Fuente: Elaboración Propia.

- **ANEXO 8.2: Certificados de ensayos de laboratorio de la calicata C-02.**
 - **Determinación de humedad natural**
 - **Límites de consistencia**
 - **Análisis granulométrico por tamizado**

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD NATURAL
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 108, ASTM D 2216

CONCEPTO : INVESTIGACION - TESIS **CALICATA:** C-02
PROVINCIA: HUANCAYO **MUESTRA :** M-1
DEPARTAMENTO: JUNIN **PROFUNDIDAD :** 1.00 m
CLIENTE: BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	T-4	T-5	T-6
PESO TARA + SUELO HUMEDO gr.	985.60	1010.30	1002.70
PESO TARA + SUELO SECO gr.	915.90	938.30	930.90
PESO DE LA TARA gr.	320.40	320.40	320.40
PESO DEL AGUA gr.	69.70	72.00	71.80
PESO SUELO SECO gr.	595.50	617.90	610.50
HUMEDAD %	11.70	11.65	11.76
HUMEDAD NATURAL PROMEDIO %	11.71		

Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA

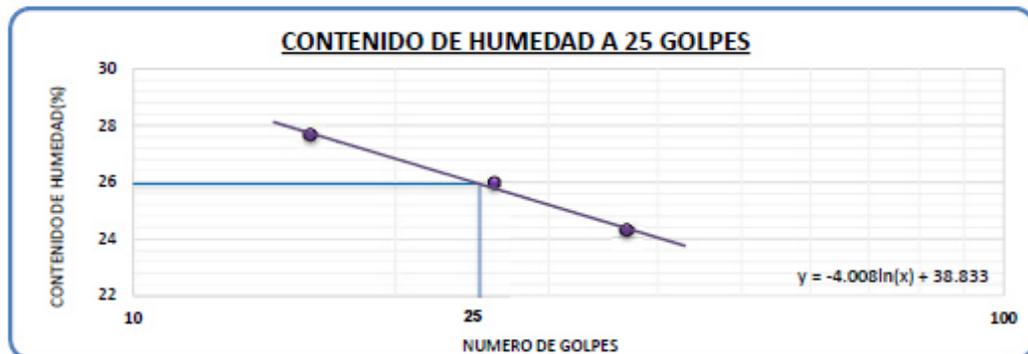
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 110 - MTC E 111, ASTM D 4318, AASHTO T 89 - T 90

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-02
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

LIMITE LIQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)				
Nº TARA		LL-4	LL-5	LL-6
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		39.50	41.13	38.74
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		34.01	35.57	33.94
PESO DE AGUA (gr.)		5.49	5.56	4.80
PESO DE LA TARA (gr.)		14.15	14.15	14.15
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		19.86	21.42	19.79
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		27.64	25.96	24.25
NUMERO DE GOLPES		16	26	37

LIMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)				
Nº TARA		LP-3	LP-4	PROMEDIO
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		24.64	25.72	
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		22.97	23.88	
PESO DE LA TARA (gr.)		14.50	14.50	
PESO DEL AGUA (gr.)		1.67	1.84	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		8.47	9.38	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		19.72	19.62	19.67



LIMITE DE CONSISTENCIA	
LIMITE LIQUIDO (%)	25.93
LIMITE PLASTICO (%)	19.67
INDICE DE PLASTICIDAD (%)	6.27

OBSERVACIONES:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

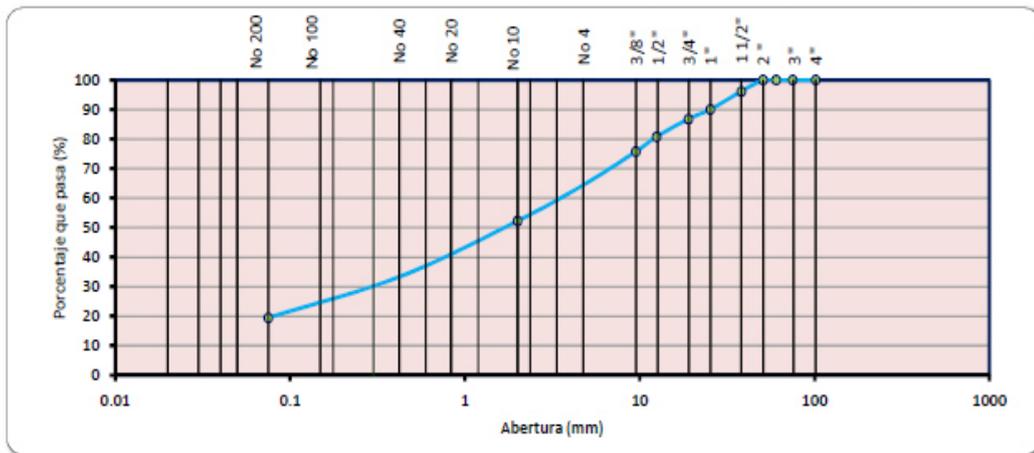
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-02
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETEND.	% RETEND. PARCIAL	% RETEND. ACUMUL.	% QUE PASA ACUMUL.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
4"	101.600	0	0.0	0	100.0	<p align="center"><u>Pesos de Muestra</u></p> Grava > N° 4: 1471.50 gr. 35.58% Arena < N° 4: 1859.20 gr. 44.96% Finos < N° 200: 804.90 gr. 19.46% Total Material Seco: 4135.60 gr. 100.00% <p align="center"><u>Límites de Consistencia</u></p> Límite Líquido : 25.93 % Límite Plástico : 19.67 % Índice Plástico : 6.27 % <p align="center"><u>Clasificación del Suelo</u></p> Clasificación (SUCS) : SC - SM Clasificación (AASHTO) : A-1-b (0) Cont. de Humedad Natural(%) : 11.71
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	
2 1/2"	60.350	0.0	0.0	0.0	100.0	
2"	50.800	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.100	159.5	3.9	3.9	96.1	
1"	25.400	250.6	6.1	9.9	90.1	
3/4"	19.000	135.9	3.3	13.2	86.8	
1/2"	12.500	247.4	6.0	19.2	80.8	
3/8"	9.500	208.3	5.0	24.2	75.8	
N° 4	4.750	469.8	11.4	35.6	64.4	
N° 10	2.000	502.8	12.2	47.7	52.3	
N° 40	0.425	778.8	18.8	66.6	33.4	
N° 200	0.075	577.6	14.0	80.5	19.5	
< N° 200	FONDO	804.9	19.5	100.0	0.0	
TOTAL		4135.6				

CURVA GRANULOMÉTRICA



Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

- **ANEXO 8.3: Certificados de ensayos de laboratorio de la calicata C-03.**
 - **Determinación de humedad natural**
 - **Límites de consistencia**
 - **Análisis granulométrico por tamizado**
 - **Determinación de peso volumétrico de masa**

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD NATURAL
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 108, ASTM D 2216

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-03
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.50 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	T-7	T-8	T-9
PESO TARA + SUELO HUMEDO gr.	1098.10	924.70	1004.90
PESO TARA + SUELO SECO gr.	989.60	840.10	909.10
PESO DE LA TARA gr.	304.30	304.30	304.30
PESO DEL AGUA gr.	108.50	84.60	95.80
PESO SUELO SECO gr.	685.30	535.80	604.80
HUMEDAD %	15.83	15.79	15.84
HUMEDAD NATURAL PROMEDIO %	15.82		

Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA

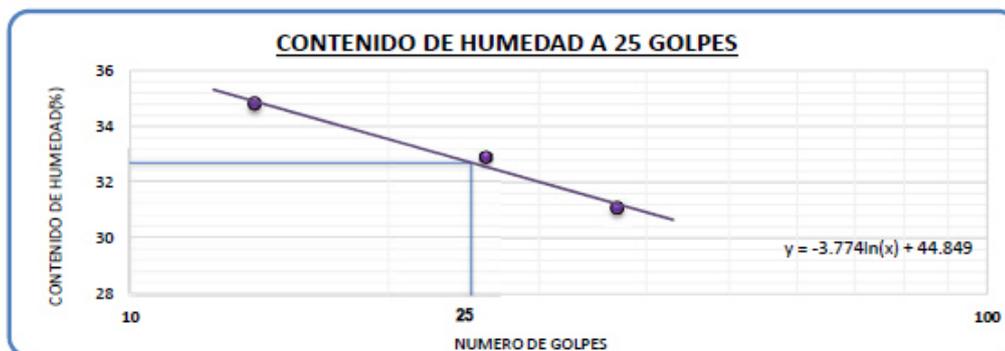
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 110 - MTC E 111, ASTM D 4318, AASHTO T 89 - T 90

CONCEPTO : INVESTIGACION - TESIS **CALICATA:** C-03
PROVINCIA: HUANCAYO **MUESTRA :** M-1
DEPARTAMENTO: JUNIN **PROFUNDIDAD :** 1.50 m
CLIENTE: BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA

DATOS DE LA MUESTRA

LIMITE LIQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)				
Nº TARA		LL-7	LL-8	LL-9
PESO TARA + SUELO HUMEDO	(gr.)	38.68	36.96	38.43
PESO TARA + SUELO SECO	(gr.)	32.35	31.32	32.68
PESO DE AGUA	(gr.)	6.33	5.64	5.75
PESO DE LA TARA	(gr.)	14.15	14.15	14.15
PESO DEL SUELO SECO	(gr.)	18.20	17.17	18.53
CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	34.78	32.85	31.03
NUMERO DE GOLPES		14	26	37

LIMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)				
Nº TARA		LP-5	LP-6	PROMEDIO
PESO TARA + SUELO HUMEDO	(gr.)	22.80	25.40	
PESO TARA + SUELO SECO	(gr.)	21.31	23.46	
PESO DE LA TARA	(gr.)	14.50	14.50	
PESO DEL AGUA	(gr.)	1.49	1.94	
PESO DEL SUELO SECO	(gr.)	6.81	8.96	
CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	21.88	21.65	21.77



LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LIMITE LIQUIDO (%)	32.70
LIMITE PLÁSTICO (%)	21.77
INDICE DE PLASTICIDAD (%)	10.94

OBSERVACIONES:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

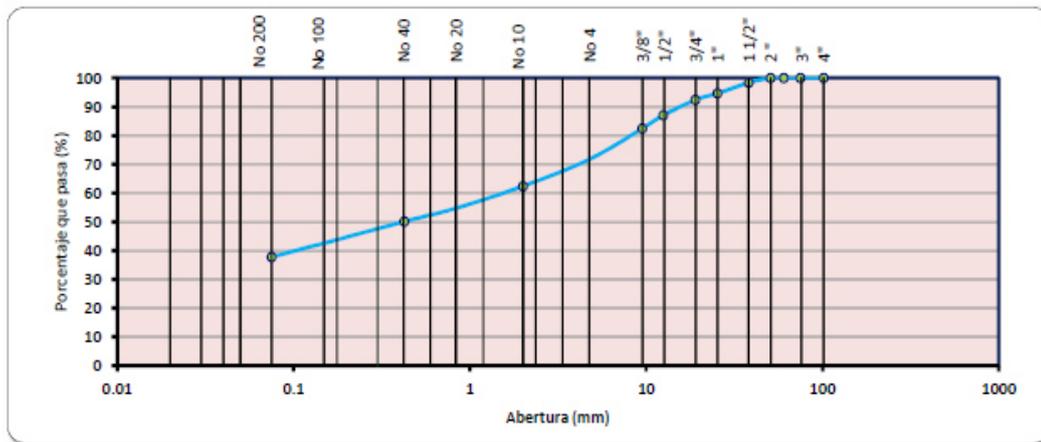
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-03
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.50 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETEND.	% RETEND. PARCIAL	% RETEND. ACUMUL.	% QUE PASA ACUMUL.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
4"	101.600	0	0.0	0	100.0	<p align="center"><u>Pesos de Muestra</u></p> Grava > N° 4: 997.80 gr. 28.34% Arena < N° 4: 1191.40 gr. 33.84% Finos < N° 200: 1331.00 gr. 37.81% Total Material Seco: 3520.20 gr. 100.00% <p align="center"><u>Límites de Consistencia</u></p> Límite Líquido : 32.70 % Límite Plástico : 21.77 % Índice Plástico : 10.94 % <p align="center"><u>Clasificación del Suelo</u></p> Clasificación (SUCS) : SC Clasificación (AASHTO) : A-6 (1) Cont. de Humedad Natural(%): 15.82
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	
2 1/2"	60.350	0.0	0.0	0.0	100.0	
2"	50.800	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.100	57.8	1.6	1.6	98.4	
1"	25.400	131.4	3.7	5.4	94.6	
3/4"	19.000	78.6	2.2	7.6	92.4	
1/2"	12.500	188.6	5.4	13.0	87.0	
3/8"	9.500	160.8	4.6	17.5	82.5	
N° 4	4.750	380.6	10.8	28.3	71.7	
N° 10	2.000	325.8	9.3	37.6	62.4	
N° 20	0.840	268.0	7.6	45.2	54.8	
N° 40	0.425	165.2	4.7	49.9	50.1	
N° 100	0.150	263.2	7.5	57.4	42.6	
N° 200	0.075	169.2	4.8	62.2	37.8	
< N° 200	FONDO	1331.0	37.8	100.0	0.0	
TOTAL		3520.2				

CURVA GRANULOMÉTRICA



Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO DE MASA
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.139, BS 1377

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-03
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.50 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	P4	P5	P6
PESO DE TARA gr.	19.60	19.60	19.60
PESO DE TARA + MUESTRA gr.	86.50	87.80	90.70
PESO DE MUESTRA gr.	66.90	68.20	71.10
PESO DE MUESTRA + PARAFINA gr.	82.30	78.20	81.10
PESO DE PARAFINA gr.	15.40	10.00	10.00
PESO ESPECIFICO DE PARAFINA gr/cm3.	0.87	0.87	0.87
VOLUMEN DE PARAFINA cm3	17.70	11.49	11.49
VOLUMEN DE AGUA INICIAL gcm3.	500.00	500.00	500.00
VOLUMEN DE MUESTRA+PARAFINA+AGUA cm3.	556.00	551.00	553.00
VOLUMEN DE MUESTRA cm3.	38.30	39.51	41.51
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.75	1.73	1.71
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.73		

Observaciones: 16.95 KN/m3

Fuente: Elaboración Propia.

- **ANEXO 8.4: Certificados de ensayos de laboratorio de la calicata C-04.**
 - **Determinación de humedad natural**
 - **Límites de consistencia**
 - **Análisis granulométrico por tamizado**

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD NATURAL
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 108, ASTM D 2216

CONCEPTO : INVESTIGACION - TESIS **CALICATA:** C-04
PROVINCIA: HUANCAYO **MUESTRA :** M-1
DEPARTAMENTO: JUNIN **PROFUNDIDAD :** 1.50 m
CLIENTE: BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	T-10	T-11	T-12
PESO TARA + SUELO HUMEDO gr.	988.40	969.20	1010.30
PESO TARA + SUELO SECO gr.	894.60	878.40	913.80
PESO DE LA TARA gr.	304.30	304.30	304.30
PESO DEL AGUA gr.	93.80	90.80	96.50
PESO SUELO SECO gr.	590.30	574.10	609.50
HUMEDAD %	15.89	15.82	15.83
HUMEDAD NATURAL PROMEDIO %	15.85		

Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA

NORMAS TÉCNICAS: MTC E 110 - MTC E 111, ASTM D 4318, AASHTO T 89 - T 90

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-04
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.50 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

LIMITE LIQUIDO (MTC E 110, AASHTO T 89)				
Nº TARA		LL-10	LL-11	LL-12
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		35.42	34.85	35.27
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		29.95	29.77	30.25
PESO DE AGUA (gr.)		5.47	5.08	5.02
PESO DE LA TARA (gr.)		14.15	14.15	14.15
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		15.80	15.62	16.10
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		34.62	32.52	31.18
NUMERO DE GOLPES		15	28	36

LIMITE PLÁSTICO (MTC E 111, AASHTO T 90)				
Nº TARA		LP-7	LP-8	PROMEDIO
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)		20.16	21.22	
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)		19.15	20.02	
PESO DE LA TARA (gr.)		14.50	14.50	
PESO DEL AGUA (gr.)		1.01	1.20	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)		4.65	5.52	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		21.72	21.74	21.73



LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LIMITE LIQUIDO (%)	32.73
LIMITE PLÁSTICO (%)	21.73
INDICE DE PLASTICIDAD (%)	11.00

OBSERVACIONES:

Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

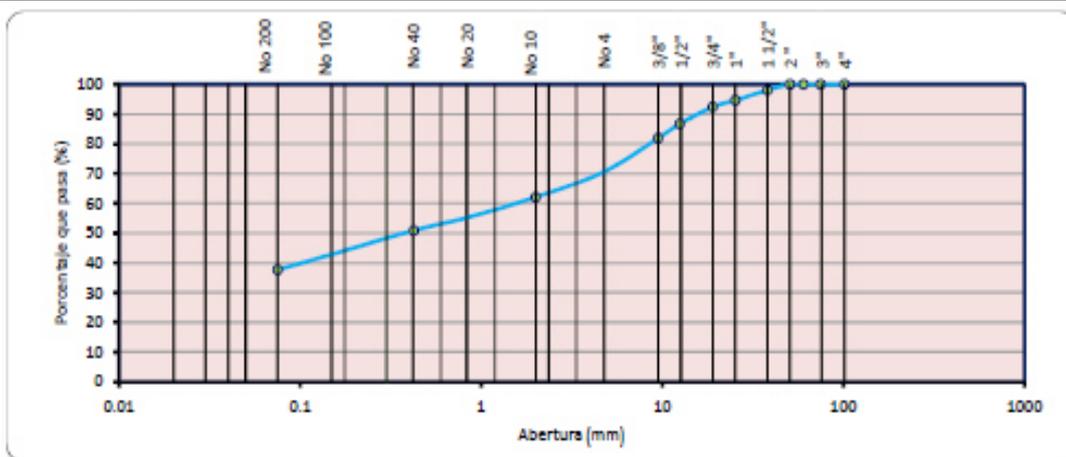
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-04
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.50 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

DATOS DE LA MUESTRA

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETEND.	% RETEND. PARCIAL	% RETEND. ACUMUL.	% QUE PASA ACUMUL.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA																															
4"	101.600	0	0.0	0	100.0	<p>Pesos de Muestra</p> <table border="0"> <tr> <td>Grava > Nº 4:</td> <td>693.30</td> <td>gr.</td> <td>29.49%</td> </tr> <tr> <td>Arena < Nº 4:</td> <td>772.70</td> <td>gr.</td> <td>32.87%</td> </tr> <tr> <td>Finos < Nº 200:</td> <td>884.60</td> <td>gr.</td> <td>37.63%</td> </tr> <tr> <td>Total Material Seco:</td> <td>2350.60</td> <td>gr.</td> <td>100.00%</td> </tr> </table> <p>Límites de Consistencia</p> <table border="0"> <tr> <td>Límite Líquido :</td> <td>32.73</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Límite Plástico :</td> <td>21.73</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Índice Plástico :</td> <td>11.00</td> <td>%</td> </tr> </table> <p>Clasificación del Suelo</p> <table border="0"> <tr> <td>Clasificación (SUCS) :</td> <td>SC</td> </tr> <tr> <td>Clasificación (AASHTO) :</td> <td>A-6 (1)</td> </tr> <tr> <td>Cont. de Humedad Natural(%) :</td> <td>15.85</td> </tr> </table>	Grava > Nº 4:	693.30	gr.	29.49%	Arena < Nº 4:	772.70	gr.	32.87%	Finos < Nº 200:	884.60	gr.	37.63%	Total Material Seco:	2350.60	gr.	100.00%	Límite Líquido :	32.73	%	Límite Plástico :	21.73	%	Índice Plástico :	11.00	%	Clasificación (SUCS) :	SC	Clasificación (AASHTO) :	A-6 (1)	Cont. de Humedad Natural(%) :	15.85
Grava > Nº 4:	693.30	gr.	29.49%																																		
Arena < Nº 4:	772.70	gr.	32.87%																																		
Finos < Nº 200:	884.60	gr.	37.63%																																		
Total Material Seco:	2350.60	gr.	100.00%																																		
Límite Líquido :	32.73	%																																			
Límite Plástico :	21.73	%																																			
Índice Plástico :	11.00	%																																			
Clasificación (SUCS) :	SC																																				
Clasificación (AASHTO) :	A-6 (1)																																				
Cont. de Humedad Natural(%) :	15.85																																				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0																																
2 1/2"	60.350	0.0	0.0	0.0	100.0																																
2"	50.800	0.0	0.0	0.0	100.0																																
1 1/2"	38.100	45.6	1.9	1.9	98.1																																
1"	25.400	80.8	3.4	5.4	94.6																																
3/4"	19.000	53.1	2.3	7.6	92.4																																
1/2"	12.500	133.1	5.7	13.3	86.7																																
3/8"	9.500	112.4	4.8	18.1	81.9																																
Nº 4	4.750	268.3	11.4	29.5	70.5																																
Nº 10	2.000	198.4	8.4	37.9	62.1																																
Nº 20	0.840	160.8	6.8	44.8	55.2																																
Nº 40	0.425	102.1	4.3	49.1	50.9																																
Nº 100	0.150	188.9	8.0	57.2	42.8																																
Nº 200	0.075	122.5	5.2	62.4	37.6																																
< Nº 200	FONDO	884.6	37.6	100.0	0.0																																
TOTAL		2350.6																																			

CURVA GRANULOMÉTRICA

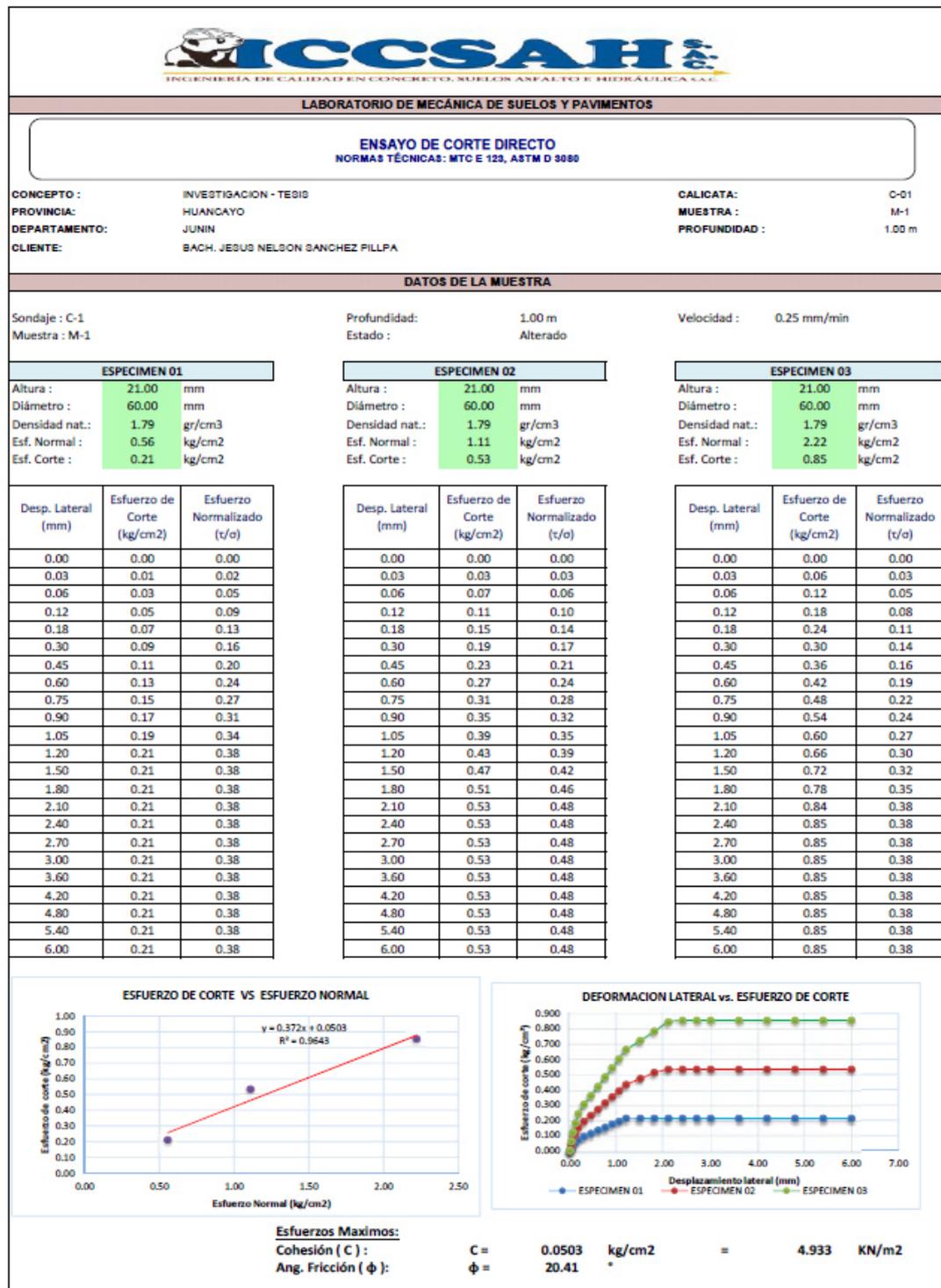


Observaciones:

Fuente: Elaboración Propia.

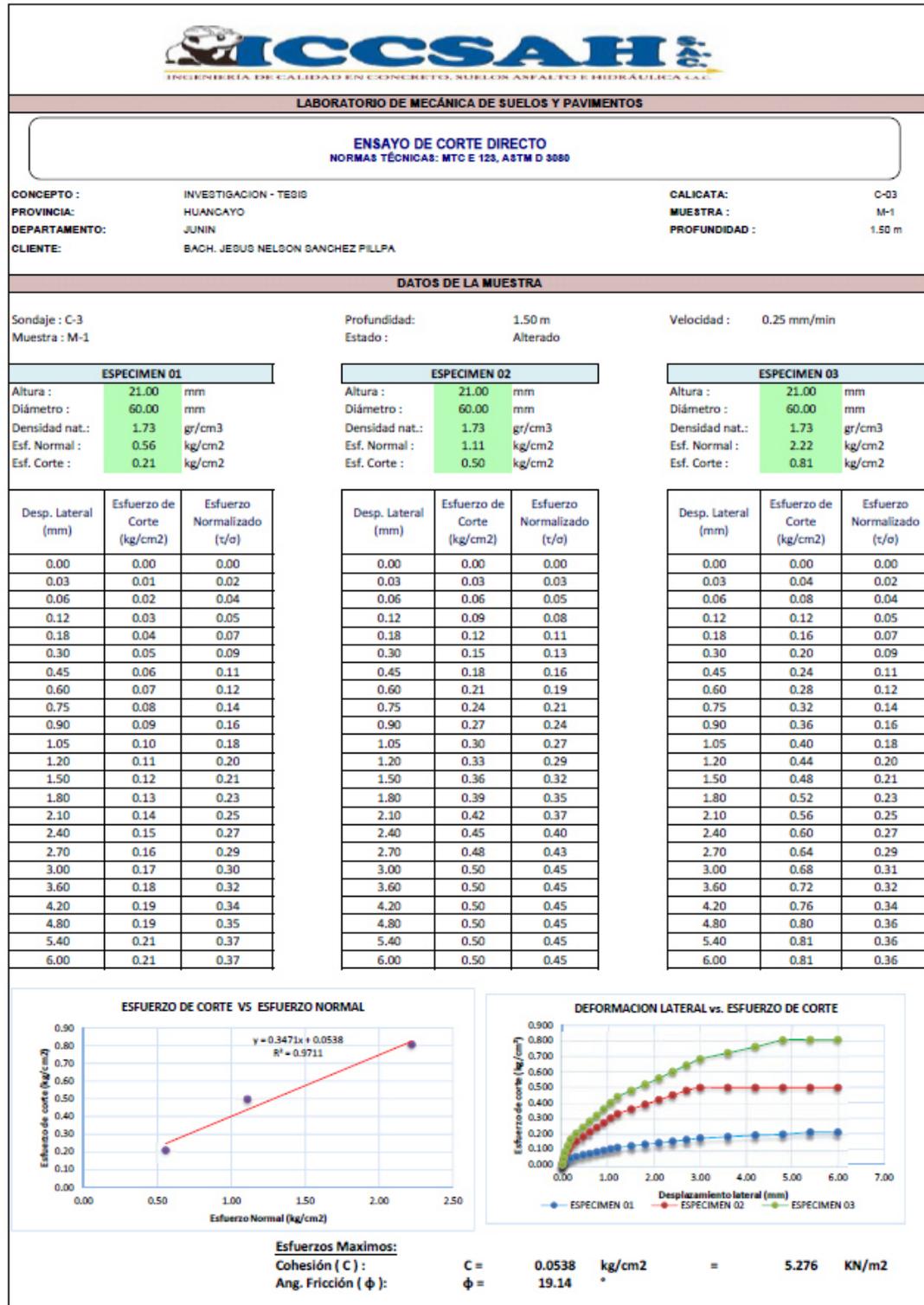
ANEXO 9: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO SIN Y CON PRESENCIA DE RAÍCES DE PASTOS VETIVER REALIZADOS EN LABORATORIO

- ANEXO 9.1: Parámetros de resistencia del suelo sin presencia de raíces de pastos Vetiver, C-01, C-02.



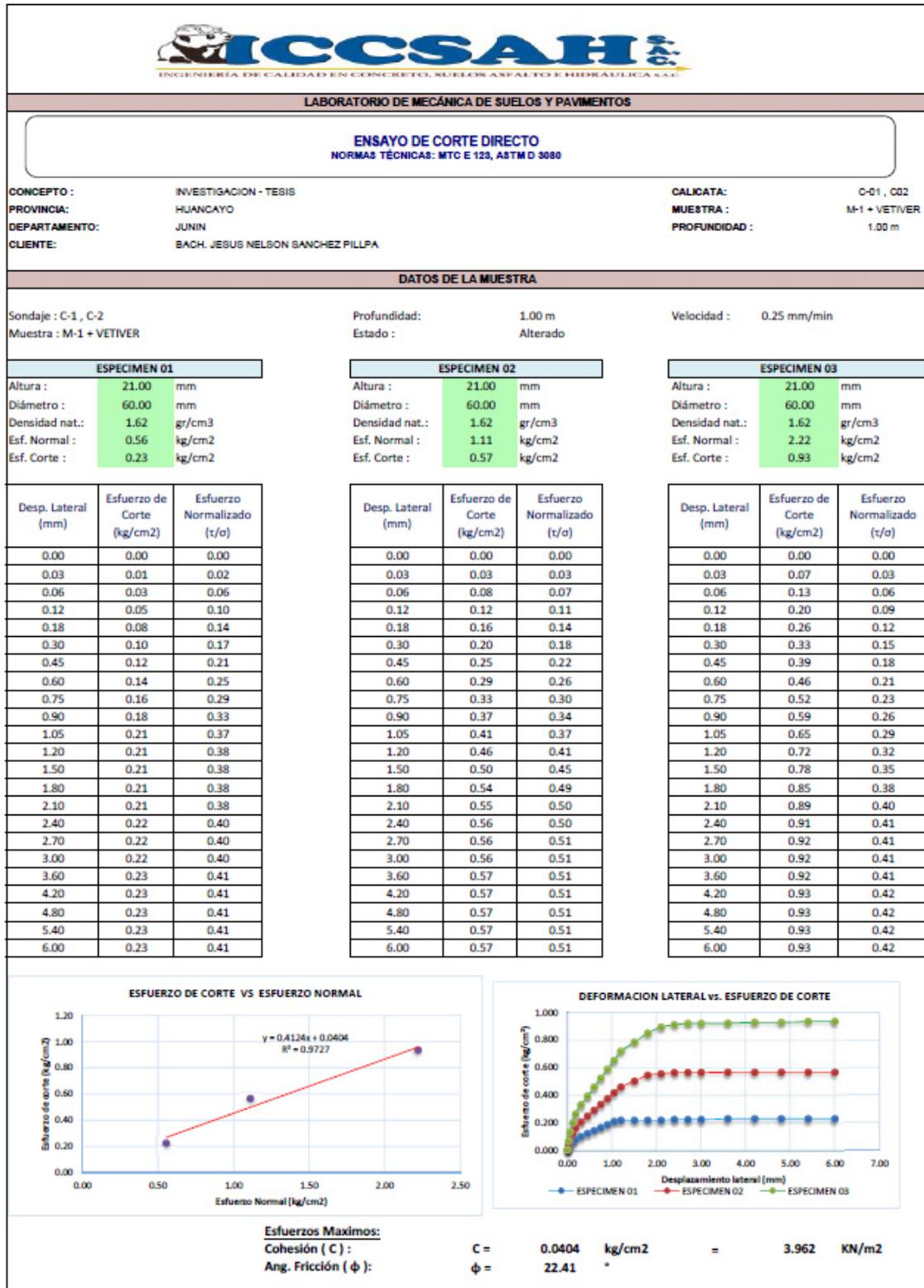
Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 9.2: Parámetros de resistencia del suelo sin presencia de raíces de pastos Vetiver, C-03, C-04.



Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 9.3: Parámetros de resistencia del suelo con presencia de raíces de pastos Vetiver, y peso volumétrico de masa, C-01, C-02



Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO DE MASA

NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.139, BS 1377

CONCEPTO :	INVESTIGACION - TESIS	CALICATA:	C-01 , C-02
PROVINCIA:	HUANCAYO	MUESTRA :	M-1 + VETIVER
DEPARTAMENTO:	JUNIN	PROFUNDIDAD :	1.00 m
CLIENTE:	BACH. JESUS NELSON SANCHEZ PILLPA		

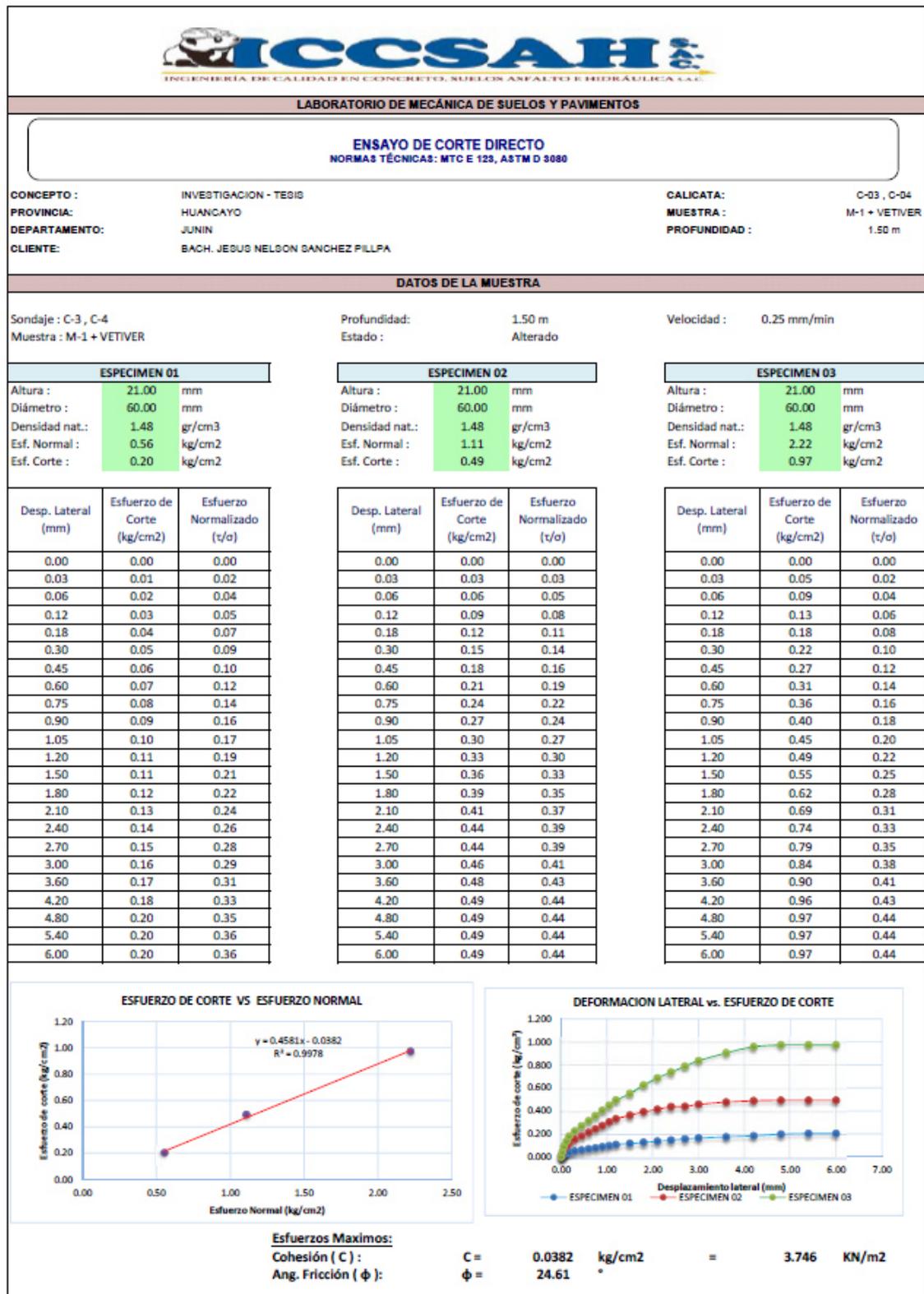
DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	P1R	P2R	P3R
PESO DE TARA gr.	19.60	19.60	19.60
PESO DE TARA + MUESTRA gr.	82.40	83.10	85.30
PESO DE MUESTRA gr.	62.80	63.50	65.70
PESO DE MUESTRA + PARAFINA gr.	95.40	98.70	99.80
PESO DE PARAFINA gr.	32.60	35.20	34.10
PESO ESPECIFICO DE PARAFINA gr/cm3.	0.87	0.87	0.87
VOLUMEN DE PARAFINA cm3	37.47	40.46	39.20
VOLUMEN DE AGUA INICIAL gcm3.	500.00	500.00	500.00
VOLUMEN DE MUESTRA+PARAFINA+AGUA cm3.	576.00	580.00	580.00
VOLUMEN DE MUESTRA cm3.	38.53	39.54	40.80
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.63	1.61	1.61
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.62		

Observaciones: 15.84 KN/m3

Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 9.4: Parámetros de resistencia del suelo con presencia de raíces de pastos Vetiver, y peso volumétrico de masa, C-03, C-04.



Fuente: Elaboración Propia.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO DE MASA
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.139, BS 1377

CONCEPTO: INVESTIGACION - TESIS **CALICATA:** C-03 , C-04
PROVINCIA: HUANCAYO **MUESTRA:** M-1 + VETIVER
DEPARTAMENTO: JUNIN **PROFUNDIDAD:** 1.50 m
CLIENTE: BACH. JESUS NELSON SHANCHEZ PILLPA

DATOS DE LA MUESTRA

ENSAYO N°	1	2	3
Nro. DE TARA	P4R	P5R	P6R
PESO DE TARA gr.	19.60	19.60	19.60
PESO DE TARA + MUESTRA gr.	95.40	96.80	98.70
PESO DE MUESTRA gr.	75.80	77.20	79.10
PESO DE MUESTRA + PARAFINA gr.	92.30	88.60	90.50
PESO DE PARAFINA gr.	16.50	11.40	11.40
PESO ESPECIFICO DE PARAFINA gr/cm3.	0.87	0.87	0.87
VOLUMEN DE PARAFINA cm3	18.97	13.10	13.10
VOLUMEN DE AGUA INICIAL gcm3.	500.00	500.00	500.00
VOLUMEN DE MUESTRA+PARAFINA+AGUA cm3.	569.00	566.00	567.00
VOLUMEN DE MUESTRA cm3.	50.03	52.90	53.90
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.51	1.46	1.47
PESO ESPECIFICO VOLUMETRICO DE MUESTRA gr/cm3.	1.48		

Observaciones: 14.52 KN/m³

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 10: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

- ANEXO 10.1: Análisis de estabilidad del talud sin presencia de raíces de pastos Vetiver

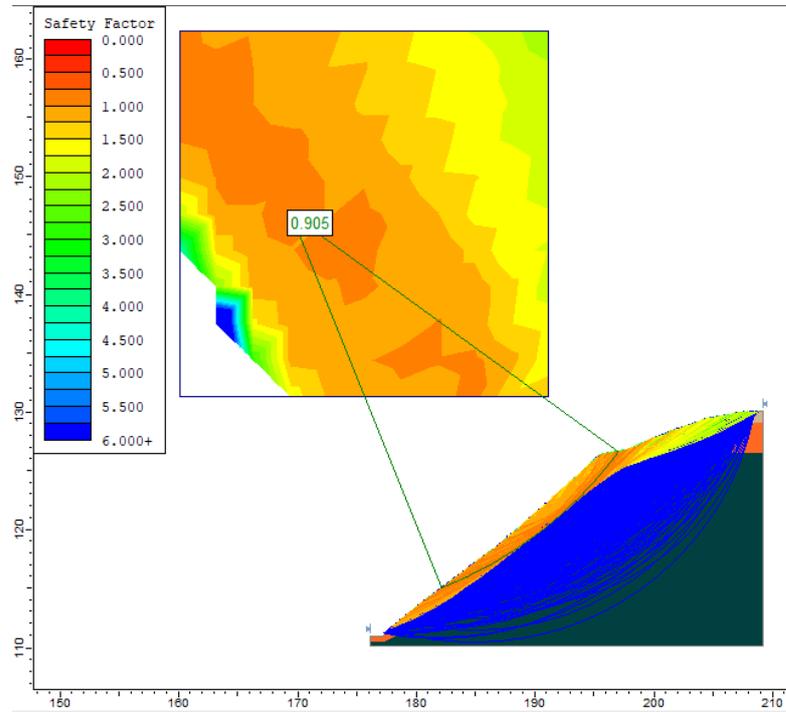


Figura 94: Factor de seguridad Bishop (análisis estático).
Fuente: Elaboración Propia.

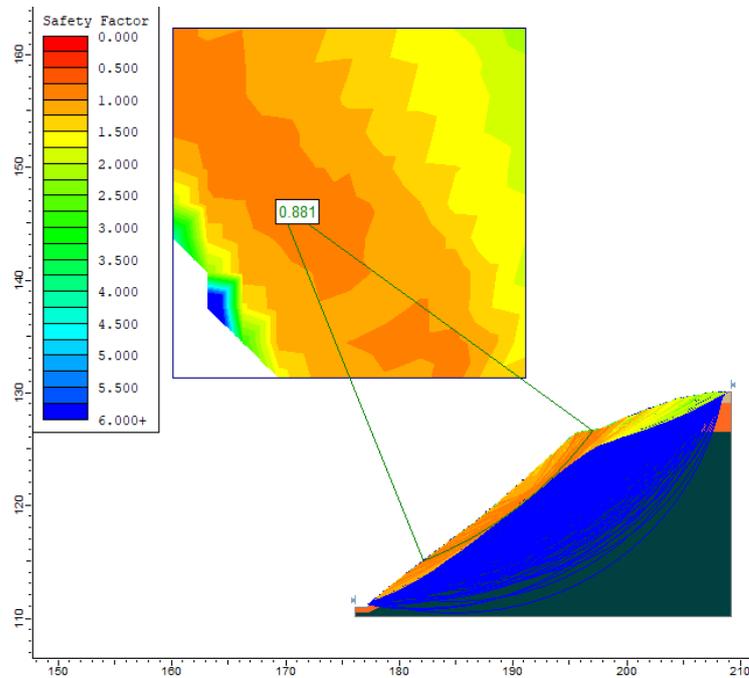


Figura 95: Factor de seguridad Janbú (análisis estático).
Fuente: Elaboración Propia.

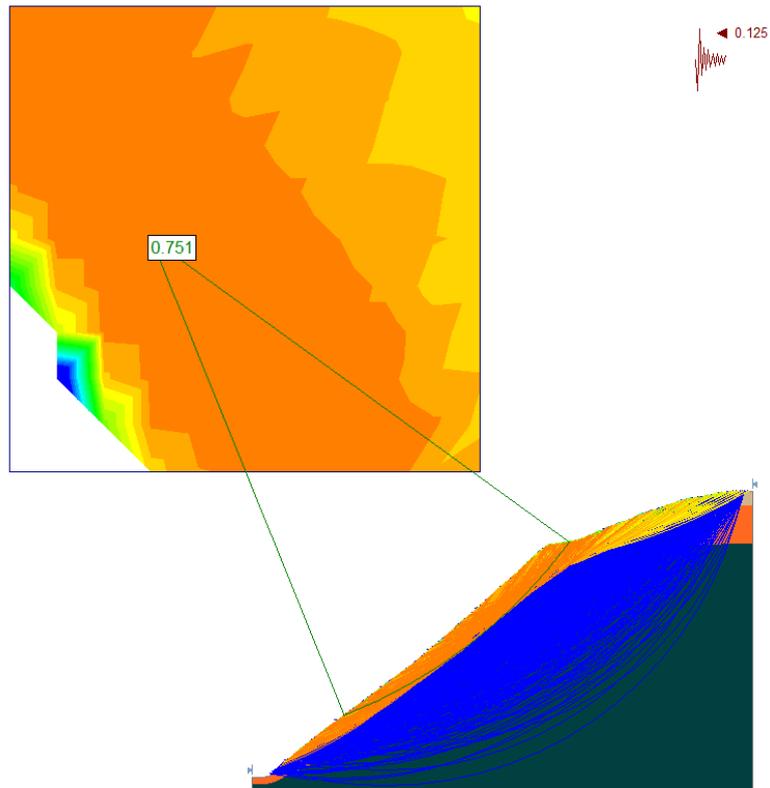


Figura 96: Factor de seguridad Bishop (análisis pseudoestático-sísmico).
Fuente: Elaboración Propia.

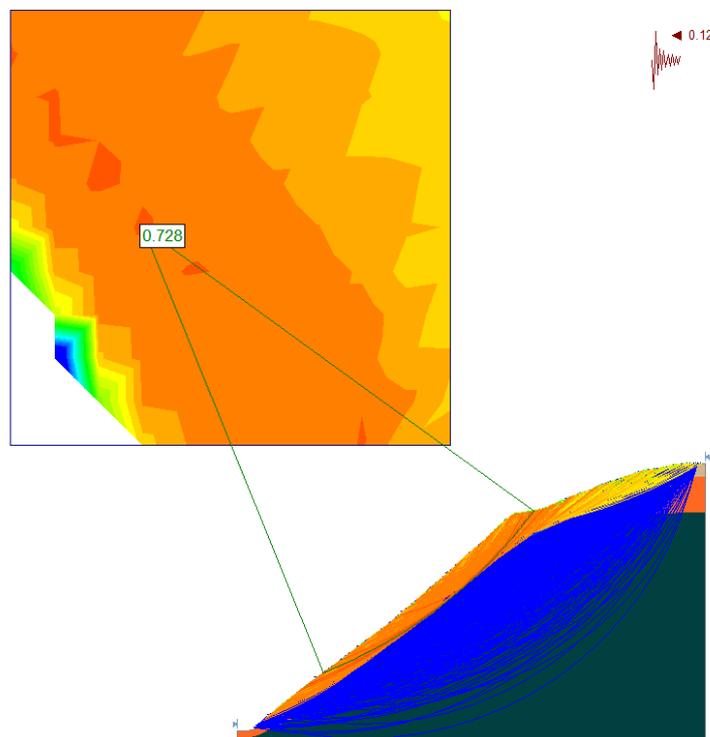


Figura 97: Factor de seguridad Janbú (análisis pseudoestático-sísmico).
Fuente: Elaboración Propia.

- ANEXO 10.2: Análisis de estabilidad del talud con presencia de raíces de pastos Vetiver

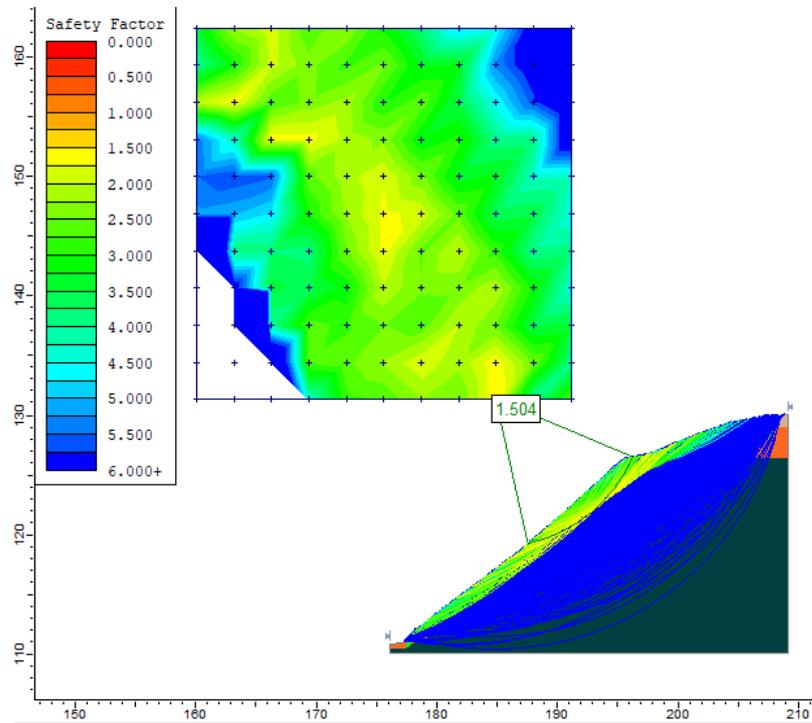


Figura 98: Factor de seguridad Bishop (análisis estático).
Fuente: Elaboración Propia.

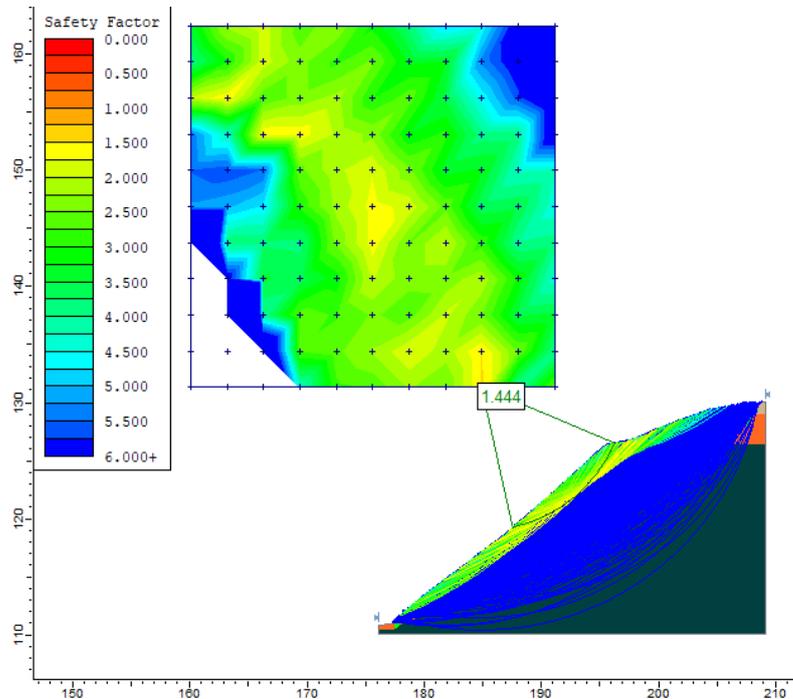


Figura 99: Factor de seguridad Janbú (análisis estático).
Fuente: Elaboración Propia.

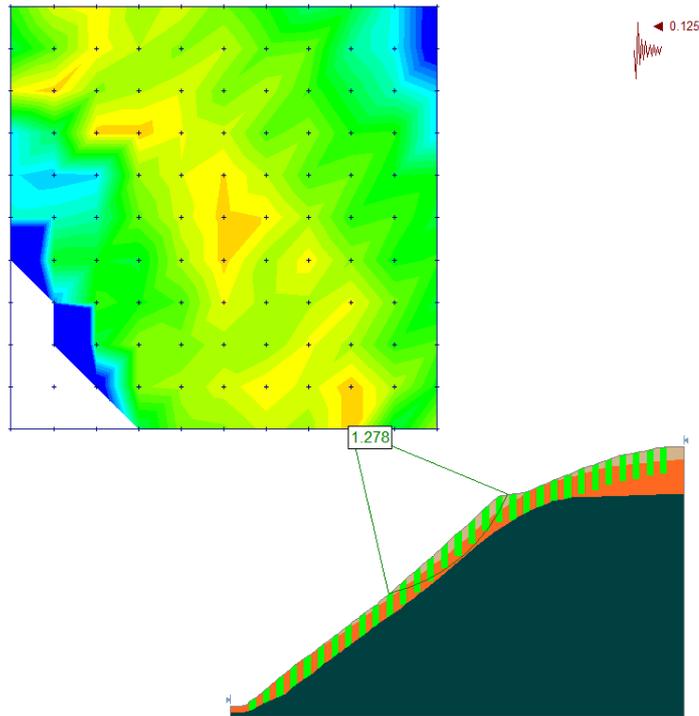


Figura 100: Factor de seguridad Bishop (análisis pseudoestático-sísmico).
Fuente: Elaboración Propia.

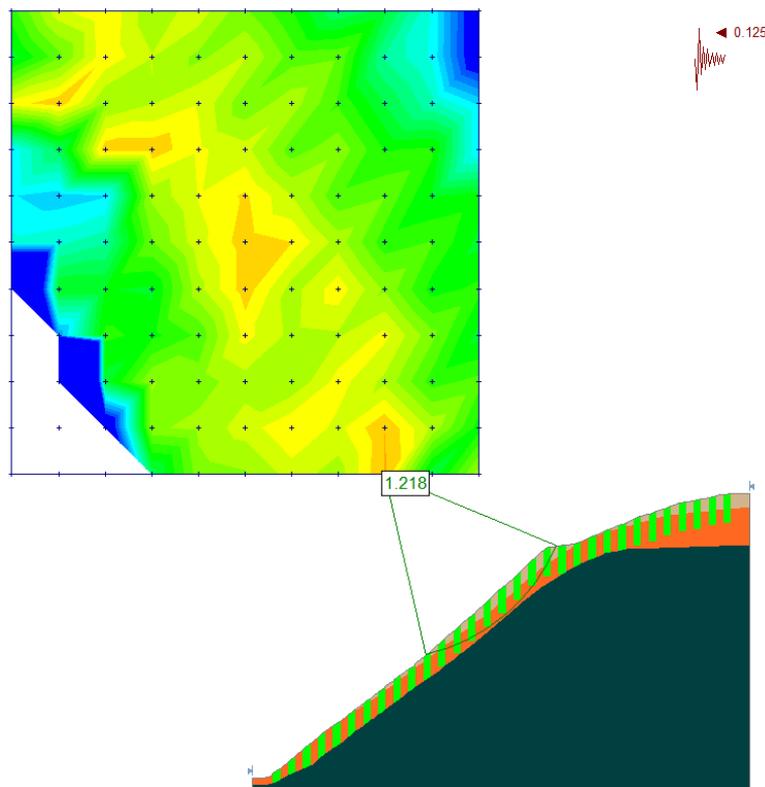


Figura 101: Factor de seguridad Janbú (análisis pseudoestático-sísmico).
Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 11: ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

RESUMEN DEL CACULO DE LA PRECIPITACION MEDIA

Departamento : PASCO Provincia : OXAPAMPA Distrito : POZUZO
 Latitud : 10°03'01" S Longitud : 75°33'01" W Altitud : 1000 msnm.

Dia/Mes/Año	Precipitacion registrada mensual (mm)				
	Estacion Oxapampa	Estacion Pozuzo	Estacion Puerto Inca	Estacion Puerto Bermudez	PROMEDIO (mm)
01/01/2017	302.30	446.30	422.30	17.90	297.20
01/02/2017	234.40	288.60	379.30	568.30	367.65
01/03/2017	277.40	336.50	252.30	321.40	296.90
01/04/2017	110.00	368.50	201.00	0.00	169.88
01/05/2017	115.90	210.20	104.40	446.30	219.20
01/06/2017	6.60	9.40	19.60	297.20	83.20
01/07/2017	15.30	61.70	15.70	45.80	34.63
01/08/2017	30.10	88.50	53.70	216.60	97.23
01/09/2017	133.90	141.60	54.40	109.40	109.83
01/10/2017	112.10	326.00	174.80	260.70	218.40
01/11/2017	128.3	258.7	430.8	92.7	227.63
01/12/2017	265.1	365	330.1	320.1	320.07
01/01/2018	347.7	324.1	131	267.6	267.60
01/02/2018	227.6	340.5	385.4	317.8	317.83
01/03/2018	188.2	329.5	219.6	245.8	245.77
01/04/2018	175.8	167.6	165.1	169.5	169.50
01/05/2018	32.8	119.6	27	59.8	59.80
01/06/2018	78.4	111.3	125.6	105.1	105.10
01/07/2018	58.6	69.4	69.9	66.0	65.97
01/08/2018	75.1	162.3	55.9	97.8	97.77
01/09/2018	27.7	52.1	55.4	45.1	45.07
01/10/2018	188.9	408.5	314	401.7	328.28
01/11/2018	146.9	342.1	296.3	59.1	211.10
01/12/2018	302.4	444.8	86.4	273.9	276.88
01/01/2019	306.7	408.4	578.1	110.9	351.03
01/02/2019	313.6	259.5	302.7	291.9	291.93
01/03/2019	192.6	502.2	280.6	325.1	325.13
01/04/2019	82.8	142.4	131.3	118.8	118.83
01/05/2019	83.1	167.3	77.5	190.6	129.63
01/06/2019	41.1	79.8	68.5	147.3	84.18
01/07/2019	38.4	60.5	52.5	297.6	112.25
01/08/2019	16.1	56.9	3.8	4.8	20.40
01/09/2019	86	193.5	103.9	65.3	112.18
01/10/2019	148.2	169.4	136.2	203.2	164.25
01/11/2019	152.9	259.9	191.3	390.6	248.68

Fuente: Elaboración Propia.

DATOS METEREOLÓGICOS POZUZO

Departamento : PASCO Provincia : OXAPAMPA Distrito : POZUZO
Latitud : 10°03'01" S Longitud : 75°33'01" W Altitud : 1000 msnm.

Precipitación media- Promedio aritmético

Día/mes/año	Precipitación media - P. Aritmético (mm)		Precipitación media (m/día)
	/mes	/día	
01/01/2017	297.20	9.59	0.00959
01/02/2017	367.65	13.13	0.01313
01/03/2017	296.90	9.58	0.00958
01/04/2017	169.88	5.66	0.00566
01/05/2017	219.20	7.07	0.00707
01/06/2017	83.20	2.77	0.00277
01/07/2017	34.63	1.12	0.00112
01/08/2017	97.23	3.14	0.00314
01/09/2017	109.83	3.66	0.00366
01/10/2017	218.40	7.05	0.00705
01/11/2017	227.63	7.59	0.00759
01/12/2017	320.07	10.32	0.01032
01/01/2018	267.60	8.63	0.00863
01/02/2018	317.83	11.35	0.01135
01/03/2018	245.77	7.93	0.00793
01/04/2018	169.50	5.65	0.00565
01/05/2018	59.80	1.93	0.00193
01/06/2018	105.10	3.50	0.00350
01/07/2018	65.97	2.13	0.00213
01/08/2018	97.77	3.15	0.00315
01/09/2018	45.07	1.50	0.00150
01/10/2018	328.28	10.59	0.01059
01/11/2018	211.10	7.04	0.00704
01/12/2018	276.88	8.93	0.00893
01/01/2019	351.03	11.32	0.01132
01/02/2019	291.93	10.43	0.01043
01/03/2019	325.13	10.49	0.01049
01/04/2019	118.83	3.96	0.00396
01/05/2019	129.63	4.18	0.00418
01/06/2019	84.18	2.81	0.00281
01/07/2019	112.25	3.62	0.00362
01/08/2019	20.40	0.66	0.00066
01/09/2019	112.18	3.74	0.00374
01/10/2019	164.25	5.30	0.00530
01/11/2019	248.68	8.29	0.00829

Fuente: Elaboración Propia.

HOJA DE CALCULO (TASA DE INFILTRACION MEDIA DEL TALUD)

Departamento : PASCO Provincia : OXAPAMPA Distrito : POZUZO
Latitud : 10°03'01" S Longitud : 75°33'01" W Altitud : 1000 msnm.

PRECIPITACIÓN EFECTIVA:

Día/mes/año	Precipitacion media (mm)		Precipitacion efectiva media (mm)	
	/mes	/día	/mes	/día
01/01/2017	297.200	9.587	163.46000	5.27290
01/02/2017	367.650	13.130	202.20750	7.22170
01/03/2017	296.900	9.577	163.29500	5.26758
01/04/2017	169.875	5.663	93.43125	3.11438
01/05/2017	219.200	7.071	120.56000	3.88903
01/06/2017	83.200	2.773	45.76000	1.52533
01/07/2017	34.625	1.117	19.04375	0.61431
01/08/2017	97.225	3.136	53.47375	1.72496
01/09/2017	109.825	3.661	60.40375	2.01346
01/10/2017	218.400	7.045	120.12000	3.87484
01/11/2017	227.625	7.588	125.19375	4.17313
01/12/2017	320.067	10.325	176.03667	5.67860
01/01/2018	267.600	8.632	147.18000	4.74774
01/02/2018	317.833	11.351	174.80833	6.24315
01/03/2018	245.767	7.928	135.17167	4.36038
01/04/2018	169.500	5.650	93.22500	3.10750
01/05/2018	59.800	1.929	32.89000	1.06097
01/06/2018	105.100	3.503	57.80500	1.92683
01/07/2018	65.967	2.128	36.28167	1.17038
01/08/2018	97.767	3.154	53.77167	1.73457
01/09/2018	45.067	1.502	24.78667	0.82622
01/10/2018	328.275	10.590	180.55125	5.82423
01/11/2018	211.100	7.037	116.10500	3.87017
01/12/2018	276.875	8.931	152.28125	4.91230
01/01/2019	351.025	11.323	193.06375	6.22786
01/02/2019	291.933	10.426	160.56333	5.73440
01/03/2019	325.133	10.488	178.82333	5.76849
01/04/2019	118.833	3.961	65.35833	2.17861
01/05/2019	129.625	4.181	71.29375	2.29980
01/06/2019	84.175	2.806	46.29625	1.54321
01/07/2019	112.250	3.621	61.73750	1.99153
01/08/2019	20.400	0.658	11.22000	0.36194
01/09/2019	112.175	3.739	61.69625	2.05654
01/10/2019	164.250	5.298	90.33750	2.91411
01/11/2019	248.675	8.289	136.77125	4.55904

Fuente: Elaboración Propia.

TASA DE INFILTRACIÓN:

Día/mes/año	Tasa de infiltración media (mm)		Tasa de infiltración media (m/día)
	/mes	/día	
01/01/2017	133.740	4.314	0.00431
01/02/2017	165.443	5.909	0.00591
01/03/2017	133.605	4.310	0.00431
01/04/2017	76.444	2.548	0.00255
01/05/2017	98.640	3.182	0.00318
01/06/2017	37.440	1.248	0.00125
01/07/2017	15.581	0.503	0.00050
01/08/2017	43.751	1.411	0.00141
01/09/2017	49.421	1.647	0.00165
01/10/2017	98.280	3.170	0.00317
01/11/2017	102.431	3.414	0.00341
01/12/2017	144.030	4.646	0.00465
01/01/2018	120.420	3.885	0.00388
01/02/2018	143.025	5.108	0.00511
01/03/2018	110.595	3.568	0.00357
01/04/2018	76.275	2.543	0.00254
01/05/2018	26.910	0.868	0.00087
01/06/2018	47.295	1.577	0.00158
01/07/2018	29.685	0.958	0.00096
01/08/2018	43.995	1.419	0.00142
01/09/2018	20.280	0.676	0.00068
01/10/2018	147.724	4.765	0.00477
01/11/2018	94.995	3.167	0.00317
01/12/2018	124.594	4.019	0.00402
01/01/2019	157.961	5.096	0.00510
01/02/2019	131.370	4.692	0.00469
01/03/2019	146.310	4.720	0.00472
01/04/2019	53.475	1.783	0.00178
01/05/2019	58.331	1.882	0.00188
01/06/2019	37.879	1.263	0.00126
01/07/2019	50.513	1.629	0.00163
01/08/2019	9.180	0.296	0.00030
01/09/2019	50.479	1.683	0.00168
01/10/2019	73.913	2.384	0.00238
01/11/2019	111.904	3.730	0.00373

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 12: PRESUPUESTO DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD

PROYECTO DE TESIS

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019

PROPUESTA ECONOMICA DE ESTABILIZACION MEDIANTE BIOINGENIERIA - VETIVER

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	INSTALACION Y MANTENIMIENTO				24185.06
01.01	CONSTRUCCIONES PROVISIONALES				957.06
01.01.01	ALMACEN Y GUARDIANIA DE OBRA	glb	1	957.06	957.06
01.02	TRABAJOS PRELIMINARES				14693.86
01.02.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE DESNIVEL	m	2235.51	0.84	1870.32
01.02.02	TRAZOS, NIVELES Y REPLANTEO DE HILERAS	m	2235.51	2.40	5359.32
01.02.03	SURCADO DE 0.15m X 0.20m DE ANCHO Y PROFUNDIDAD	m	2235.51	0.80	1788.63
01.02.04	PREPARACION DE SUSTRATO DE SIEMBRA	m3	67.07	51.51	3454.84
01.02.05	ADQUISICION Y TRANSPORTE DE COBERTURA VEGETAL	und	2099.00	1.06	2220.74
01.03	REVEGETALIZACION				3934.99
01.03.01	ADICION DE SUSTRATO DE SIEMBRA	m3	67.07	32.00	2146.36
01.03.02	ESTABLECIMIENTO DE ESQUEJES DE VETIVER	m	2235.51	0.80	1788.63
01.04	MANTENIMIENTO				4599.16
01.04.01	RIEGO	m3	2.24	3.92	8.76
01.04.02	RESIEMBRA	m	223.55	0.90	201.87
01.04.03	FERTILIZACION	kg	223.55	11.63	2599.90
01.04.04	PODA	m	2235.51	0.80	1788.63
DISEÑO DE PIE DE PRESUPUESTO	COSTO DIRECTO				24185.06
	GASTOS GENERALES 5%				1209.25
	UTILIDAD 10%				2418.51
	SUBTOTAL				27812.82
	I.G.V (18%)				5006.31
	PRESUPUESTO DE LA OBRA				32819.13

Fuente: Elaboración Propia.

PROYECTO DE TESIS

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE LA TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA CON CULTIVO DE PASTOS VETIVER EN ZONAS TROPICALES, AÑO 2019

PROPUESTA ECONOMICA DE ESTABILIZACION MEDIANTE CORTE - BANQUETAS

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	INSTALACION Y MANTENIMIENTO				36109.76
01.01	CONSTRUCCIONES PROVISIONALES				957.06
01.01.01	ALMACEN Y GUARDIANIA DE OBRA	glb	1	957.06	957.06
01.02	TRABAJOS PRELIMINARES				7229.64
01.02.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	m	2235.51	0.84	1870.32
01.02.02	TRAZOS, NIVELES Y REPLANTEO	m	2235.51	2.40	5359.32
01.03	MOVIMIENTO DE TIERRAS				27923.07
01.03.01	CORTE DE TALUD Y ELIMINACION PARA CONFORMACION DE BANQUETA	m3	642.87	43.44	27923.07
DISEÑO DE PIE DE PRESUPUESTO	COSTO DIRECTO				36109.76
	GASTOS GENERALES 5%				1805.49
	UTILIDAD 10%				3610.98
	SUBTOTAL				41526.23
	I.G.V (18%)				7474.72
	PRESUPUESTO DE LA OBRA				49000.95

Fuente: Elaboración Propia.

Referente a los precios de plantas de Vetiver:

Nosotros ofrecemos los esquejes de Vetiver de la primera calidad
hasta 5000 Unidades **por Unidad a S/ 1.00**
a partir de 5000 hasta 10,000 Unidades **por Unidad a S/. 0.95**
y a partir de 10,000 Unidades **por Unidad a S/. 0.90**
Puesto en Lima y exonerado del IGV.

La entrega y/o envío se realizará a 2 o 4 días (según la cantidad) útiles después
haber recibido la conformidad del pago en el Banco Continental - Código de
cuenta Interbancaria 0011 194 000 1000 11529 83 Titular ALKE E.I.R.L. o en la
cuenta N° 0011-0194-83-01000 11529 del mismo Banco y Titular.

El servicio de envío a provincia incluido el flete es de S/. 80.00 para los
primeros 1000 esquejes.

Para cada 1000 esquejes adicionales del mismo envío es de S/. 40.00.

Cordiales saludos
Ing. Alois Kennerknecht
ALKE E.I.R.L.

Cel. 998906636

Fuente: Cotización ALKE EIRL