

IDENTIFICACIÓN DE TALUDES SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTO POR MEDIO DE LA
METODOLOGÍA DE TALUDES NATURALES (MTN) PARA UN CASO DE ESTUDIO: VEREDA
EL VALLANO, SECTOR ASTILLEROS, MUNICIPIO DE ENVIGADO, DEPARTAMENTO DE
ANTIOQUIA, COLOMBIA.

FERNEY ANDRÉS LÓPEZ

Tesis de Maestría

Profesor asesor

JORGE ALONSO PRIETO

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN

2024

Agradecimiento

Deseo agradecer a aquellas personas que han estado acompañándome en la culminación de mi maestría en ingeniería sobre un caso de estudio en el cual se hizo una identificación de los taludes susceptibles a deslizamientos por medio de la MTN. Este proyecto ha sido un desafío emocionante y, al mismo tiempo, una oportunidad invaluable para crecer tanto personal como profesionalmente.

Un reconocimiento especial a mis compañeros de investigación y amigos del programa de maestría, quienes han brindado su apoyo y colaboración en los momentos más exigentes.

A mi familia, cuya comprensión y aliento han sido una fuente constante de fuerza y confianza. Gracias por estar siempre ahí y por creer en mí durante todo este proceso.

Este trabajo es el resultado del esfuerzo conjunto de muchas personas, y me siento profundamente agradecido por cada una de sus contribuciones.

CONTENIDO

	pág.
0 INTRODUCCIÓN.....	16
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1 CONTEXTO GLOBAL	17
1.2 PROBLEMÁTICA EN COLOMBIA	18
1.3 PROBLEMÁTICA EN EL VALLE DE ABURRÁ.....	20
2 JUSTIFICACIÓN	22
3 OBJETIVOS	24
3.1 GENERAL	24
3.2 ESPECÍFICOS	24
4 MARCO TEÓRICO	25
4.1 FALLOS EN TALUDES	25
4.2 MOVIMIENTOS EN MASA Y SU CLASIFICACIÓN	26
4.2.1 FACTORES INHERENTES DEL TERRENO.....	26
4.2.2 FACTORES EXTERNOS CONTRIBUYENTES (NATURALES).....	26
4.2.3 FACTORES MODIFICADORES ANTROPOGÉNICOS.....	27
4.3 GENERALIDADES DE LA MTN	27
4.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MTN.....	28
4.5 INFORMACIÓN SECUNDARIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MTN.....	31
4.5.3 AGENTES DETONANTES.....	34
4.6 EFECTIVIDAD DE LA MTN A PARTIR DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.....	35
5 METODOLOGÍA: DESCRIPCIÓN DE LA MTN PROPUESTA POR SHUK	38
5.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN.....	40
5.1.1 TOPOGRAFÍA	40
5.1.2 GEOLOGÍA.....	40
5.2 MEDICIONES DE TALUDES NATURALES A NVEL FAMILIA.....	40
5.2.1 ESTRUCTRUA OPERACIONAL DE LA MTN	40
5.2.2 SECUENCIAL CUMULATIVO DE INTERVALOS DE CURVAS DE NIVEL (SCICN).	42
5.2.3 CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES	44
5.3 ECUACIONES Y FUNCIONES DE CUBRIMIENTO TOTAL	44
5.3.1 FUNCIONES DE CORRELACIÓN Y SUS PARÁMETROS CUANTITATIVOS.....	45
5.4 PATRÓN TRIANGULAR.....	46
5.4.1 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA	46

5.4.2	PARÁMETROS FUNCIONALES a y b	46
5.4.3	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	47
5.4.4	DETERMINACIÓN DE LA FAMILIA DE TALUDES NATURALES	48
5.4.5	PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN	51
5.4.6	LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PATRÓN TRIANGULAR	53
5.4.7	ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN.....	54
5.4.8	ÁNGULO DE FRICCIÓN ENTRE MINERALES.....	56
5.4.9	LÍMITE INFERIOR DEL PATRÓN TRIANGULAR.....	57
5.4.10	MATERIALES DEGRADADOS Y DESAGREGADOS	58
5.4.11	VÉRTICE DEL PT	59
5.4.12	TENDENCIA DE PENDIENTES PROMEDIAS	60
5.5	SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN).....	60
5.5.1	ENVOLUTA TRANSFORMADA DE ESFUERZOS DE CORTE (ETEC).....	61
5.5.2	ENVOLVENTES HIPOTÉTICAS.....	65
5.5.3	CONDICIONES DE PRESURIZACIÓN	74
5.5.4	PARÁMETROS GEOMECÁNICOS.....	78
5.6	FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FS_r)	85
5.6.1	TALUD DE DISEÑO.....	86
5.6.2	ESTUDIOS REGIONALES	87
5.7	ENFOQUE METODOLÓGICO PARA RECOMENDACIONES DE BIOINGENIERÍA EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES NATURALES.....	88
5.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	88
6	RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA MTN PARA EL CASO DE ESTUDIO	89
6.1	INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN.....	89
6.1.1	TOPOGRAFÍA DE LA VEREDA EL VALLANO	90
6.1.2	GEOLOGÍA DE LA VEREDA EL VALLANO.....	92
6.1.3	HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA DE LA VEREDA EL VALLANO.....	96
6.1.4	GEOMORFOLOGÍA DE LA VEREDA EL VALLANO	97
6.1.5	CLIMA DE LA VEREDA EL VALLANO	97
6.1.6	DIAGNÓSTICO DE LA VEREDA EL VALLANO.....	103
6.2	MEDICIONES DE LAS FAMILIAS (TALUDES NATURALES) EN LA VEREDA EL VALLANO.....	104
6.2.1	RESULTADOS DE SCICN	104
6.2.2	CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES	106

6.3 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA EN LA VEREDA EL VALLANO	109
6.3.1 PARÁMETROS FUNCIONALES a y b	109
6.3.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	111
6.3.3 EVALUACIÓN DE LA FAMILIA DE TALUDES NATURALES	112
6.3.4 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN	113
6.3.5 LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PT	113
6.3.6 LIMITE INFERIOR DEL PT	116
6.3.7 ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN	118
6.3.8 TENDIENCIA DE PENDIENTE PROMEDIAS	119
6.4 SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN)	121
6.4.1 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS	121
6.5 FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FS _r) EN LA VEREDA EL VALLANO	124
6.5.1 MAPA DE SUSCEPTIBILIDADES DE LA VEREDA EL VALLANO	126
6.5.2 IDENTIFICACIÓN DE TALUDES SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS EN LA VEREDA EL VALLANO	129
6.6 RECOMENDACIONES DE BIOINGENIERÍA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA VEREDA VALLANO	133
6.6.1 PROBLEMAS DE EROSIÓN SUPERFICIAL EN TALUDES NATURALES	133
6.6.2 TALUDES NATURALES CON POSIBLES DESLIZAMIENTOS LENTOS O MOVIMIENTOS DE MASA	136
6.6.3 TALUDES NATURALES CON POSIBLES DESLIZAMIENTOS POR SATURACIÓN DEL SUELO	138
6.6.4 TALUDES NATURALES MUY INCLINADOS O ROCOSOS	139
6.6.5 ESTABILIZACIÓN DE TALUDES NATURALES ALTOS	140
7 CONCLUSIONES	144
8 RECOMENDACIONES	146
9 REFERENCIAS	148
ANEXOS	154

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Estructura operativa de la MTN.....	29
Tabla 2. Relación entre el número de mediciones y el porcentaje representativo de la muestra.....	31
Tabla 3. Parámetros iniciales de las envolventes hipotéticas de matricial del SAMTN.....	68
Tabla 4. Puntos del polígono calculados en el talud 2 de la vereda el Vallano, Municipio de Envigado Antioquia Colombia.....	106
Tabla 5. Puntos del polígono a calcular talud 2 vereda El Vallano Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia Colombia.....	107
Tabla 6. Mediciones de las distancias con su respectivo intervalo talud 2 vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia Colombia.....	108
Tabla 7. Cálculo logarítmico de las mediciones obtenidas talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.....	110
Tabla 8. Correlación lineal para estimación de los parámetros a y b talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia	111
Tabla 9. Resumen de la evaluación de la familia talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.....	112
Tabla 10. Condiciones para aceptar la MTN talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia	113
Tabla 11. Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia	114
Tabla 12. Mediciones de tendencias actual de mediciones máximas de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	114
Tabla 13. Mediciones de límite inferior del PT de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.....	117
Tabla 14. Resumen de los datos y cálculo de las iteraciones y cálculo de Angulo de Fricción Básico de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.....	118
Tabla 15. Resumen de Parámetros Funcionales Asociados a las Tendencias de Pendientes en el PT	119
Tabla 16. Solución de envolutas Hoja cálculo de propiedades geotécnicos Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia	122
Tabla 17. Condiciones de presurización Hoja cálculo de propiedades geotécnicos Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia	123
Tabla 18. Resultados Hoja cálculo de propiedades geotécnicos Vereda El Vallano, sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.....	124
Tabla 19. Hoja electrónica factor de seguridad relativos al deslizamiento estudio regional taludes de 1 al 20.....	125
Tabla 20. Parámetros de la función potencial de la pendiente promedio del PT a nivel de población.	125
Tabla 21. Factores de Seguridad de los 98 taludes identificados en la vereda el Vallano.....	132
Tabla 22. Cantidad de taludes según susceptibilidad.....	133
Tabla 23. Recomendaciones para la Estabilización de Taludes mediante Bioingeniería	143

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Fig. 1 Proceso metodológico del caso de estudio	39
Fig. 2 Medición de taludes a nivel de familia a través del Sistema SCICN	43
Fig. 3 Características del PT.	52
Fig. 4 Relación entre $(\tan \phi_m)$ y $(\tan \phi_b)$	56
Fig. 5 Representación del PT y atributos de variabilidad, degradación y desagregación.	59
Fig. 6 Propiedades de la ETEC y envolutas hipotéticas del SAMTN.	65
Fig. 7 Organización Matricial de la ETEC y del SAMTN.	67
Fig. 8 Ensayo de cizallamiento de discontinuidades.	80
Fig. 9 Relaciones entre Parámetros Geomecánicos de Resistencia en Masa y Laboratorio.	84
Fig. 10 Curvas de Estabilidad Límite ($FS = 1$).	86
Fig. 11 Factor de seguridad relativo (F_{sr}) en taludes de diseño según el tiempo.	87
Fig. 12 Factor de Seguridad Relativo (F_{sr}) en Estudios Regionales Según el Tiempo.	87
Fig. 13 Localización de la vereda El Vallano, sector Astilleros, Municipio de Envigado, Antioquia (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) con curvas de nivel cada metro.	90
Fig. 14 Topografía del sector.	91
Fig. 15 Plancha de geología local.	93
Fig. 16 Temperatura máxima y mínima promedio desde 2015 hasta la actualidad.	98
Fig. 17 . Energía solar de onda corta incidente diario promedio desde el 2015 hasta la actualidad.	99
Fig. 18 Categorías de nubosidad promedio desde el 2015 hasta la actualidad.	99
Fig. 19 Promedio mensual de lluvia desde el 2015 hasta la actualidad.	100
Fig. 20 Niveles promedio de comodidad de la humedad desde el 2015 hasta la actualidad, categorizado por el punto de rocío.	101
Fig. 21 Velocidad promedio del viento desde el 2015 hasta la actualidad.	102
Fig. 22 Dirección promedio del viento desde el 2015 hasta la actualidad.	102
Fig. 23 Trayecto del drenaje.	103
Fig. 24 Delimitación de los polígonos y extracción de coordenadas talud 2 marcación de cotas vereda El vallano sector Astilleros Municipio de envigado Antioquia Colombia.	105
Fig. 25 Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales.	115
Fig. 26 Mediciones de tendencias actual de mediciones Máximas de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	116
Fig. 27 Mediciones de tendencia de límite inferior de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	117
Fig. 28 . Patrón Triangular de la Población. Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	120
Fig. 29 Mapa de susceptibilidades al deslizamiento en distintos horizontes temporales, Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	126
Fig. 30 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a corto plazo de la Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	127
Fig. 31 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a mediano plazo de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.	128

Fig. 32 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a largo plazo de la Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia. 129

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1.....	41
Ecuación 2.....	41
Ecuación 3.....	41
Ecuación 4.....	45
Ecuación 5.....	45
Ecuación 6.....	45
Ecuación 7.....	45
Ecuación 8.....	46
Ecuación 9.....	47
Ecuación 10.....	48
Ecuación 11.....	48
Ecuación 12.....	49
Ecuación 13.....	49
Ecuación 14.....	49
Ecuación 15.....	49
Ecuación 16.....	49
Ecuación 17.....	50
Ecuación 18.....	50
Ecuación 19.....	50
Ecuación 20.....	50
Ecuación 21.....	53
Ecuación 22.....	53
Ecuación 23.....	54
Ecuación 24.....	54
Ecuación 25.....	54
Ecuación 26.....	54
Ecuación 27.....	55
Ecuación 28.....	55
Ecuación 29.....	55
Ecuación 30.....	55
Ecuación 31.....	55
Ecuación 32.....	57
Ecuación 33.....	57
Ecuación 34.....	60
Ecuación 35.....	60
Ecuación 36.....	61
Ecuación 37.....	61
Ecuación 38.....	62
Ecuación 39.....	62
Ecuación 40.....	63

Ecuación 41.....	63
Ecuación 42.....	63
Ecuación 43.....	63
Ecuación 44.....	63
Ecuación 45.....	63
Ecuación 46.....	63
Ecuación 47.....	63
Ecuación 48.....	64
Ecuación 49.....	66
Ecuación 50.....	69
Ecuación 51.....	69
Ecuación 52.....	69
Ecuación 53.....	70
Ecuación 54.....	71
Ecuación 55.....	72
Ecuación 56.....	73
Ecuación 57.....	73
Ecuación 58.....	79
Ecuación 59.....	79
Ecuación 60.....	80
Ecuación 61.....	81
Ecuación 62.....	81
Ecuación 63.....	82
Ecuación 64.....	82
Ecuación 65.....	82
Ecuación 66.....	82
Ecuación 67.....	82
Ecuación 68.....	82
Ecuación 69.....	83
Ecuación 70.....	83
Ecuación 71.....	83
Ecuación 72.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

Af : Área de afectación por un deslizamiento

a, b : Parámetros funcionales de la relación L vs. H.

an, bn : Parámetros funcionales de cualquier envoluta "n" potencial simple.

βn : Ángulo cuya tangente es Hn/Ln .

CP : Corto Plazo

c : Cohesión (símbolo generalizado); o cohesión de suelos.

ci : Cohesión por imbricación (o entramamiento) estructural de rocas en el $EO\sigma_v$

co : Cohesión total de rocas en el $EO\sigma_v$

ct : Cohesión traccional de rocas

$EO\sigma_v$: Eje origen de los esfuerzos verticales.

Fd : Factor dimensional; $Fd = 1.0$, en el sistema MKS

Fs : Factor de seguridad convencional

Fsr : Factor de seguridad relativo

FT : Sistema de medición: Facetas de Taludes

φ : Ángulo de fricción (símbolo generalizado)

φb : Ángulo básico de fricción

φm : Ángulo de fricción entre minerales

φp : Ángulo de fricción pico

φpq : Ángulo de fricción pico para compresión inconfiada

φr : Ángulo de fricción residual

γ : Peso unitario (símbolo generalizado)

$\gamma a, \gamma b$: Pesos unitarios, subíndices "a" y "b"

$\gamma d, \gamma t$: Pesos unitarios: seco y total (símbolos generalizados).

$\gamma da, \gamma ta$: Pesos unitarios aparentes: seco y total

$\gamma dm, \gamma tm$: Pesos unitarios de la masa: seco y total.

HT : Altura vertical máxima o crítica para una categoría de tiempo T

K : $K = HT \gamma t / c$

L, H : Parámetros de caracterización de la función $H = a L^b$

Lf : Longitud de afectación de una obra lineal por un deslizamiento

LLD, HLD : Longitud y altura límite superior; nivel de familia
LLF, HLF : Longitud y altura de la función $H = a Lb$
LLP, HLP : Longitud y altura límite superior; nivel de población
LLU, HLU : Longitud y altura límite superior; nivel de universo
LLX, HLX : Coordenadas del Vértice del Patrón Triangular
LP : Largo Plazo
MCP : Muy Corto Plazo
Md : Módulo de deformabilidad (símbolo generalizado)
MTN : Metodología de Taludes Naturales
m : Subíndice para la "Condición de la Masa".
P(Eft) : Probabilidad del evento de falla de una familia en sí
P(Em) : Probabilidad de una magnitud de falla dada
Pdg : Parámetro de degradación de la masa
Pds : Parámetro de desagregación de la masa
Pf : Probabilidad de falla (símbolo generalizado)
Pfi : Probabilidad de falla incondicional
Pfc : Probabilidad de falla condicional
Pft : Probabilidad de falla total
P(mf) : Probabilidad de ocurrencia de una magnitud de falla dada
pa : Parámetro adimensional de presurización (símbolo generalizado)
(pa)x : Valor máximo teórico de *pa* en cualquier envoluta del SAMTN
r : Resistencia a "s" movilizada a lo largo de la superficie de falla
s : Esfuerzo de empuje a lo largo de la superficie de falla
SCICN : Sistema de medición: Secuencial Cumulativo de Intervalos de Curvas de Nivel
SIG : Sistemas de Información Geográfica.
sa : Parámetro adimensional de resistencia máxima al corte
sH : Desviación estándar de H
(sH)T : sH para cualquier categoría de tiempo
TE : Sistema de medición: taludes enteros
TEPX : Sistema de medición: taludes enteros de pendientes máximas
u : Presurización (Símbolo generalizado).
V : Vulnerabilidad
Vf : Volumen de falla por un deslizamiento

V_{fp} : Valor de un sujeto o factor productivo por unidad de tiempo

V_m : Variabilidad de la masa

XLH : Parámetro que presenta una igual distancia desde el origen de coordenadas (0,0) hasta la intersección de una línea de 45° con la ETEC

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Topografía	154
Anexo B. Curvas El Vallano	154
Anexo C. Estudio Geotécnico Vallano	154
Anexo D. Resumen Estudio Geotécncio Vallano	154
Anexo E. Evaluación MTN.....	154
Anexo F. Evaluación Envolutas.....	154
Anexo G. Patrón Triangular Población.....	154
Anexo H. Factores de Seguridad Taludes	154
Anexo I. Factores de Seguridad Taludes Rangos de Susceptibilidad	154

Resumen

Esta investigación evaluó la susceptibilidad a deslizamientos utilizando la Metodología de Taludes Naturales (MTN), con el fin de identificar la estabilidad del terreno en áreas críticas de la vereda El Vallano, sector Astilleros, Municipio de Envigado, Antioquia. La investigación, de carácter descriptivo y aplicado, empleó la MTN propuesta por Tomás Shuk, que correlaciona parámetros geomorfológicos como altura y longitud de los taludes para estimar su estabilidad en terrenos complejos y con información primaria limitada. El estudio evidenció un deterioro progresivo en la estabilidad de los taludes, con un aumento en el número clasificado como de alta susceptibilidad en horizontes temporales largos. Este patrón se atribuye a factores como la erosión, saturación del suelo, variaciones climáticas y actividades humanas no reguladas. Asimismo, por escorrentías incontroladas, las cuales han sido vinculadas a deslizamientos superficiales previos. Con base en estos hallazgos, la estabilización de taludes en la Vereda El Vallano requiere un enfoque integral que combine soluciones técnicas avanzadas y principios de sostenibilidad ambiental. El manejo adecuado del agua superficial y subsuperficial emerge como un pilar fundamental, destacando el uso de sistemas de drenaje estratégicamente ubicados y técnicas de bioingeniería, como la incorporación de especies fitorremediadoras y barreras vivas. Estas medidas no solo reducen la saturación del suelo y fortalecen su resistencia al corte, sino que también contribuyen a mitigar los riesgos asociados a los deslizamientos, promoviendo la estabilidad geotécnica a largo plazo.

Palabras clave: Geomorfología, Geotecnia, Movimiento en masa, MTN, Susceptibilidad a deslizamientos, Taludes Naturales

0 INTRODUCCIÓN

La Metodología de Taludes Naturales (MTN) representa una contribución significativa en el campo de la geotecnia para la evaluación y manejo de la estabilidad de taludes, ofreciendo una alternativa efectiva y accesible frente a métodos tradicionales de análisis geotécnico. La importancia de esta metodología radica en su capacidad para identificar y caracterizar taludes con susceptibilidad a deslizamientos en contextos de alta complejidad geológica y topográfica, y con escasa información primaria, como es el caso de la vereda El Vallano sector Astilleros en el municipio de Envigado, Antioquia. En una región caracterizada por una geografía montañosa y una alta susceptibilidad a deslizamientos, la aplicación de la MTN permite optimizar recursos y reducir riesgos al brindar una base técnica para la prevención de desastres y la protección de la infraestructura y las comunidades locales.

El origen de la MTN se remonta a la necesidad de contar con un método analítico que, sin requerir pruebas de campo extensivas ni herramientas costosas, pueda ofrecer una evaluación fiable de la estabilidad de los taludes naturales. Esta metodología, desarrollada por Shuk, se centra en la correlación de parámetros geomorfológicos esenciales, como la altura y la longitud de los taludes naturales, para estimar su comportamiento frente a factores de inestabilidad [1], [2]. Este enfoque se fundamenta en la observación de los taludes como “ensayos naturales” de estabilidad, permitiendo extraer conclusiones a partir de la relación entre sus características geométricas y las condiciones ambientales circundantes.

El alcance de esta investigación se enfoca en el análisis de los taludes ubicados en la vereda El Vallano, buscando identificar aquellos sectores con mayor susceptibilidad a movimientos en masa. Para ello, se emplea la MTN en conjunto con herramientas de análisis geoespacial y cartográfico que facilitan la recopilación y evaluación de datos de campo. Este estudio además de determinar áreas susceptibles a deslizamientos, también se centra en caracterizar los factores inherentes y externos que influyen en la estabilidad de los taludes en la zona, proporcionando un diagnóstico integral que pueda ser utilizado en futuras intervenciones y medidas de mitigación.

Esta investigación ofrece información esencial sobre la susceptibilidad de los taludes a movimientos en masa en el área de interés. Al analizar exhaustivamente estas áreas, el estudio contribuye a la planificación territorial y a la creación de estrategias de mitigación para proteger a la comunidad y las infraestructuras local. De este modo, la implementación de la MTN en la vereda El Vallano establece una base sólida para el desarrollo de políticas y medidas preventivas que mejoren la seguridad y la sostenibilidad en la región.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 CONTEXTO GLOBAL

Los deslizamientos de tierra constituyen una de las amenazas naturales más destructivas a nivel global, siendo impulsados por la combinación de factores como la topografía, la geología, el clima y la intervención humana [3], [4], [5]. Estas condiciones han hecho que diversas regiones sean extremadamente susceptibles a estos eventos, especialmente aquellas situadas en zonas de alta actividad tectónica y con climas tropicales y subtropicales, como es el caso de Colombia [6], [7]. De acuerdo con el informe del Banco Mundial [8], en promedio, se registran alrededor de 400,000 deslizamientos significativos anuales provocados por lluvias y unos 130,000 adicionales desencadenados por sismos. Entre 1980 y 2018, se estima que ocurrieron aproximadamente 15.5 millones de deslizamientos por lluvias, lo cual resalta la magnitud de este fenómeno. En términos de mortalidad, entre 2004 y 2010 se registraron más de 80,000 muertes causadas por deslizamientos. Entre los eventos más devastadores destacan el terremoto de Wenchuan en China en 2008, que resultó en más de 20,000 muertes, y el terremoto de Nepal en 2015, que ocasionó alrededor de 8,500 muertes relacionadas con deslizamientos.

Los impactos de estos desastres no se limitan a pérdidas humanas, sino que también conllevan a graves consecuencias económicas, afectando infraestructuras, tierras agrícolas y el desarrollo económico de las comunidades. Según el reporte del Banco Mundial [8], los deslizamientos causan pérdidas millonarias; un ejemplo es el deslizamiento en Regent, Sierra Leona, en 2017, que generó aproximadamente 30 millones de dólares en daños a infraestructuras y viviendas. En total, se estima que entre 1.3 y 3.6 millones de personas a nivel mundial viven en áreas de alto riesgo de deslizamientos, lo que también expone a alrededor de 9,000 a 20,000 kilómetros de carreteras y vías férreas.

Teniendo en consideración lo anterior, las lluvias intensas y los sismos son factores detonantes críticos de los deslizamientos a nivel global, debido a que ambos eventos pueden provocar la saturación de los suelos y desestabilizar las laderas, especialmente en áreas con topografía irregular [9], [10], [11], [12], [13]. La susceptibilidad a estos eventos aumenta en áreas con topografía irregular, donde la amplificación de ondas sísmicas debido a la topografía puede causar daños severos. Diversos estudios han documentado cómo las irregularidades topográficas, como cimas y laderas, amplifican las ondas sísmicas, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos y otros daños estructurales en estas áreas [7], [12], [13], [14]. En América del Sur, un ejemplo notable es el terremoto de 1985 en Chile, donde la topografía del terreno contribuyó significativamente a los daños en edificaciones situadas en áreas de montaña [15]. Este fenómeno de movimiento en masa, junto con la alta sismicidad y la presencia de fallas activas en diversas regiones montañosas del mundo, refuerza la importancia de la planificación y gestión del riesgo en estos contextos vulnerables.

Los movimientos en masa ocurren cuando una porción de suelo o roca se desliza, fluye o cae cuesta abajo debido a la gravedad. En áreas montañosas, este tipo de deslizamientos puede verse agravado por la actividad sísmica y las fallas activas, que debilitan el terreno y aumentan la probabilidad de que ocurran deslizamientos. Este fenómeno es especialmente relevante en regiones con alta sismicidad y pendientes pronunciadas, ya que el terreno es más susceptible a desplazarse, lo que hace crucial un adecuado conocimiento del área para prevenir impactos en la comunidad y la infraestructura [12], [13].

El estudio de los deslizamientos de taludes en el mundo ha generado una amplia base de conocimiento. Un estudio de 1996 clasificó estos movimientos en caídas, deslizamientos y flujos, cada uno con mecanismos y características específicos [16]. Hungr et al. (2014) ampliaron esta clasificación, destacando la importancia de comprender la geomecánica para diseñar medidas de mitigación efectivas [17]. En Asia, donde los deslizamientos son frecuentes, Petley (2010) ha mostrado cómo el crecimiento poblacional y el desarrollo en áreas montañosas han incrementado la exposición a estos riesgos [18]. En Europa, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) ha documentado deslizamientos graves, subrayando la necesidad de incluir estos riesgos en la planificación territorial [19].

En América Latina y el Caribe, la alta vulnerabilidad a desastres naturales, incluidos los deslizamientos, se debe tanto a su geografía accidentada como a la variabilidad climática. Según [20], esta región enfrenta altos niveles de riesgo que impactan directamente a sus comunidades y economías.

1.2 PROBLEMÁTICA EN COLOMBIA

Las cordilleras andinas en Colombia constituyen una zona de alta actividad tectónica, con un patrón hidroclimático complejo que incrementa la probabilidad de diversas amenazas naturales. La estructura geológica de esta región es el resultado de la interacción entre la Placa del Caribe y la Placa Sudamericana, junto con la subducción de la Placa de Nazca en la costa occidental del país. Esta región, que abarca aproximadamente 282,540 km² y representa el 33% del territorio nacional, incluye los principales núcleos económicos de Colombia, con una población de alrededor de 34 millones de personas y una densidad poblacional de 110 habitantes por km² [11].

La posición ecuatorial de Colombia le otorga un régimen de lluvias irregular, influido tanto por la circulación atmosférica del Pacífico tropical y el Caribe como por las dinámicas hidroclimáticas de las cuencas del Amazonas y el Orinoco. La geografía andina intensifica las circulaciones locales, lo que provoca tormentas intensas que derivan en inundaciones y deslizamientos [11]. El ciclo de lluvias sigue un patrón bimodal, con temporadas lluviosas de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, intercaladas

con periodos secos. La variabilidad anual se ve afectada por el fenómeno de El Niño, que alterna entre sequías y lluvias intensas. Un informe del Banco Mundial señala que los deslizamientos y las inundaciones son las principales causas de pérdidas económicas y humanas en Colombia. Este informe reportó un promedio anual de 7,200 deslizamientos causados por lluvias, lo que posiciona al país entre los países con mayor incidencia de deslizamientos en América del Sur [8]. Entre 1900 y 2016, se registraron 32,022 deslizamientos, de los cuales el 93% ocurrió en la región andina, densamente poblada, y el 92% estuvo asociado a lluvias en el patrón bimodal anual [11].

El aumento de la población y la expansión urbana en áreas vulnerables han incrementado las condiciones de riesgo en Colombia durante las últimas décadas. Para 2016, el país contaba con 48 millones de habitantes, de los cuales el 75% vivía en zonas urbanas, muchas ubicadas en montañas o valles. Esta distribución ha contribuido a una historia significativa de desastres por deslizamientos [11]. Un ejemplo notable es el desastre del Nevado del Ruiz en 1985, cuando un flujo de lodo, provocado por actividad volcánica y la inestabilidad de los suelos, resultó en la pérdida de aproximadamente 25,000 vidas en Armero y generó pérdidas económicas superiores a los \$339 millones de dólares [11].

Otro ejemplo relevante ocurrió el 26 de octubre de 2016 en la Cantera Las Nieves, en Copacabana, cerca de la autopista Medellín-Bogotá [21]. Allí se produjo un deslizamiento de gran magnitud en una zona ya identificada con alta susceptibilidad a movimientos en masa, atribuido a factores geológicos y geomorfológicos específicos de la región, junto con la influencia de la actividad minera. La cantera, ubicada en una ladera de pendiente pronunciada, sufrió una saturación de suelos debido al flujo de aguas subterráneas de la quebrada Suramericana y sus afluentes. La actividad minera fue un factor determinante en el desencadenamiento del deslizamiento, al provocar deforestación, pérdida de cobertura vegetal y alteración de los suelos, elementos clave para la estabilidad del terreno. La remoción de la vegetación dejó el suelo expuesto y sin la protección natural que proporcionan las raíces, permitiendo una mayor infiltración de agua. Esta situación, agravada por la falta de un manejo adecuado de las aguas subterráneas, debilitó aún más la ladera, incrementando el riesgo de colapso [21].

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha desarrollado mapas detallados de riesgo por movimientos en masa, destacando quince provincias en Colombia con diferentes niveles de susceptibilidad a deslizamientos y otros procesos inestables [22]. Estas provincias se agrupan en cinco categorías de amenaza: Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja, que reflejan la densidad, frecuencia y recurrencia de eventos en el territorio. Además, los terrenos geológicos del país se han clasificado en cinco dominios de amenaza, con las categorías Muy Alta y Alta concentrando casi el 90% de los deslizamientos más

recurrentes y de mayor magnitud [22]. Esta identificación es importante porque estos eventos causan daños a infraestructuras, interrupción de servicios y pérdida de vidas humanas, afectando la economía a local y nacional.

En síntesis, los deslizamientos de tierra representan una de las amenazas naturales más frecuentes y devastadoras en Colombia, con un impacto considerable en las zonas montañosas y en las áreas urbanas de alta densidad poblacional. Las condiciones geográficas del país, caracterizadas por cordilleras abruptas, suelos inestables y una marcada variabilidad climática, crean un entorno propicio para estos fenómenos. La combinación de factores naturales y actividades humanas, tales como la deforestación, el crecimiento urbano desordenado y la construcción de infraestructuras en áreas de alto riesgo, ha incrementado la vulnerabilidad de los taludes, aumentando tanto la frecuencia como la magnitud de los deslizamientos.

1.3 PROBLEMÁTICA EN EL VALLE DE ABURRÁ

Como se mencionó anteriormente, en Colombia, los movimientos en masa y las inundaciones representan algunos de los eventos naturales de mayor riesgo, debido a las características geográficas y fisiográficas del país. Estos eventos, impulsados por factores naturales y antropogénicos, suponen un peligro considerable para las comunidades, especialmente en zonas urbanas y montañosas. Una de las áreas más vulnerables es el Valle de Aburrá, una región montañosa en el departamento de Antioquia.

El Valle de Aburrá, una depresión intramontañosa rodeada por montañas que alcanzan hasta los 3,000 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima variable, una topografía accidentada y una diversidad geológica notable [7]. Estas condiciones geográficas propician procesos geomorfodinámicos que representan un riesgo significativo para la población y la infraestructura local. La combinación de pendientes empinadas y actividad tectónica incrementa la vulnerabilidad sísmica y la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en sus municipios, como se ha documentado en estudios sobre el impacto de la topografía en los movimientos de tierra en los Andes colombianos, con especial atención en el Valle de Aburrá [7], [13].

Los datos indican que la mayoría de los deslizamientos y fallas de taludes en esta región están asociados a pendientes pronunciadas y suelos residuales que cubren las laderas. Pendientes superiores al 30% y depósitos aluviales profundos, que en algunos sectores alcanzan hasta 200 metros, aumentan el riesgo de

fallas. Esto supone una amenaza no solo para las viviendas y la infraestructura local, sino también para la vida de aproximadamente 3.8 millones de habitantes que residen en esta área [7].

La expansión urbana de Medellín y el Valle de Aburrá ha llevado a la ocupación de terrenos de alta pendiente en zonas periféricas. La proporción de áreas de riesgo en Medellín aumentó del 4% en 1994 al 9% en 2018, con asentamientos informales que en 2018 representaban el 80% de las áreas expuestas a deslizamientos [10]. La tragedia de Villatina subraya las graves consecuencias de estos fenómenos en términos de pérdidas humanas y daños a la infraestructura, con impactos económicos, sociales y ambientales significativos [23]. Este proceso de ocupación irregular y sin planificación urbana incrementa la exposición al riesgo y limita la implementación de medidas preventivas y de mitigación [24].

El cambio climático es otro factor que agrava esta problemática. Análisis históricos han demostrado que la mayoría de los deslizamientos ocurren durante la segunda temporada lluviosa del año, correlacionándose con el aumento de la saturación de suelos provocada por las lluvias. Los efectos del fenómeno ENSO también intensifican el problema, pues en los años de La Niña las precipitaciones son más intensas y prolongadas, mientras que la sequía en años de El Niño reduce temporalmente el riesgo, generando una dependencia climática en la estabilidad del suelo [11].

La recuperación tras estos desastres no solo implica costos económicos elevados para la reconstrucción de viviendas e infraestructura, sino que también afecta el tejido social y la estabilidad de las comunidades afectadas [25]. Además, los frecuentes deslizamientos en el Valle de Aburrá obstaculizan el desarrollo urbano sostenible y generan gastos significativos en mitigación y respuesta a emergencias [7].

Dado este contexto, la MTN se propone como una herramienta para identificar y categorizar áreas susceptibles a deslizamientos en la vereda El Vallano. Esta metodología facilita una comprensión detallada de los factores que afectan la estabilidad de los taludes, permitiendo una mejor planificación de medidas preventivas en áreas de alta vulnerabilidad.

2 JUSTIFICACIÓN

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de taludes naturales en la Vereda El Vallano, sector Astilleros del municipio de Envigado mediante la MTN se justifica por las condiciones geográficas, socioeconómicas y ambientales particulares de la región. La Vereda El Vallano, ubicada en un rango altitudinal entre los 1,732 y 2,955 msnm, presenta pendientes pronunciadas y precipitaciones elevadas que oscilan entre 1,842 y 2,065 mm/año [26], factores que incrementan significativamente el riesgo de movimientos en masa. La transformación del uso del suelo, como la transición de actividades agropecuarias tradicionales hacia plantaciones forestales con especies como el pino y el ciprés, ha cambiado significativamente la estructura del terreno, aumentando la susceptibilidad de los taludes a fallas. Adicionalmente, la explotación histórica de materiales de playa, la extracción de madera y el desarrollo de infraestructura rural, como caminos y senderos, han generado una presión adicional sobre los taludes [26].

La importancia de este estudio radica en los riesgos que los deslizamientos representan para la población de la vereda, estimada en 1,734 habitantes, quienes dependen de actividades económicas como el ecoturismo y las fincas agroecológicas [26]. Estos eventos no solo comprometen las condiciones de vida y la integridad de los habitantes, sino que también afectan la conectividad entre los centros poblados y las zonas urbanas cercanas, poniendo en peligro la infraestructura local. Además, el impacto de los deslizamientos no se limita a las comunidades humanas, ya que la región es parte de la microcuenca de la quebrada la Ayurá [26]. Esta quebrada recorre el municipio de Envigado desde su origen en el Cerro Astilleros hasta su desembocadura en el río Medellín constituyendo una fuente constante de riesgo en sus riberas y afectando significativamente a veredas cercanas [27]. El sur de Envigado, incluyendo la vereda el Vallano sector Astilleros, ha sido identificado como una zona de alto riesgo, pero carece de estudios específicos que identifiquen y delimiten las áreas críticas para permitir una gestión efectiva del riesgo. A pesar de que estudios previos han identificado la susceptibilidad a fallas en otras áreas de Envigado, como los taludes cercanos a la quebrada La Seca [28], la falta de un sistema integral de evaluación y alerta limita la capacidad de respuesta ante posibles deslizamientos.

Bajo este contexto, el presente estudio responde a la clasificación de la vereda como una zona especial dentro del Sistema Local de Planeación del municipio de Envigado, lo que implica la necesidad de desarrollar estrategias sostenibles para garantizar su desarrollo integral. La MTN destaca como una

metodología robusta que combina análisis geomorfológicos, climáticos y antrópogénicos, brindando una evaluación integral de la susceptibilidad a deslizamientos y facilitando la priorización de áreas críticas para intervenciones preventivas. Esto proporcionará información valiosa para priorizar intervenciones y mitigar los riesgos asociados a los movimientos en masa, fortaleciendo la resiliencia de la comunidad y asegurando la sostenibilidad ambiental y económica de la región. Por tanto, este trabajo no solo tiene un impacto académico, sino también una relevancia práctica en la gestión del riesgo y la planificación territorial de la Vereda El Vallano.

Complementariamente, la implementación de la MTN en áreas críticas del sur de Envigado, como la Vereda El Vallano, sector Astilleros, se alinea con las políticas nacionales de gestión de riesgos, como lo establece la Ley 1523 de 2012. Este marco regulatorio impulsa estrategias de prevención que permitan minimizar costos asociados a desastres, proteger la infraestructura existente y asegurar la seguridad de las comunidades. Además, la generación de mapas de susceptibilidad mediante esta metodología contribuirá al ordenamiento territorial sostenible, promoviendo la regulación del uso del suelo y evitando desarrollos en zonas de alto riesgo.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Evaluar la susceptibilidad a deslizamientos utilizando la MTN, con el fin de identificar la estabilidad del terreno en áreas identificadas como críticas en la vereda El Vallano sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia.

3.2 ESPECÍFICOS

1. Analizar las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en la vereda El Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia.
2. Identificar los sectores susceptibles a movimiento en masa con la MTN, en la vereda El Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia.
3. Realizar recomendaciones de técnicas de bioingeniería para la estabilización de los taludes naturales identificados con alta susceptibilidad al aplicar la MTN.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 FALLOS EN TALUDES

Los fallos en taludes son procesos geológicos que ocurren cuando el material del suelo o roca pierde su estabilidad y se desliza ladera abajo, afectando significativamente la geomorfología y los ecosistemas circundantes. Estos fallos suelen estar asociados a factores naturales, como la pendiente y la composición del suelo, además de influencias externas como la erosión y los movimientos tectónicos. Las áreas con pendientes pronunciadas son más susceptibles a estos eventos, ya que la gravedad actúa con mayor intensidad sobre el material que compone el talud. Los materiales sueltos o de baja cohesión, como las arcillas, son especialmente vulnerables a los fallos, en contraste con las rocas más densas, que ofrecen mayor resistencia [29].

La saturación del suelo es un factor crítico en los fallos de taludes, ya que el agua disminuye la cohesión entre partículas y aumenta el peso del material en la pendiente, generando condiciones propicias para el deslizamiento. Durante las lluvias intensas, el agua se infiltra en el suelo y aumenta la presión de poros, reduciendo la resistencia efectiva del terreno. Este fenómeno es común en climas tropicales y zonas de alta pluviosidad, donde las precipitaciones actúan como disparadores frecuentes de deslizamientos. Por lo tanto, la precipitación acumulada y la intensidad de las lluvias deben ser consideradas como factores de riesgo para prevenir y mitigar los fallos en taludes [9], [30]

Además de los factores naturales, las actividades humanas como la construcción de infraestructuras, la deforestación y el uso intensivo del suelo contribuyen significativamente a la inestabilidad de los taludes. Al remover la vegetación y modificar el terreno, las actividades antropogénicas reducen la cohesión del suelo y alteran el equilibrio natural del terreno, aumentando la susceptibilidad al deslizamiento. La construcción de carreteras, por ejemplo, implica cortes y modificaciones en las laderas, exponiendo el material interno del talud a la erosión y a los agentes climáticos, lo cual puede llevar al colapso del mismo [31]

4.2 MOVIMIENTOS EN MASA Y SU CLASIFICACIÓN

Los movimientos en masa representan desplazamientos de tierra, rocas o materiales sueltos que ocurren en pendientes debido a la acción de la gravedad. Este fenómeno natural resulta de la interacción de factores intrínsecos del terreno y externos, tales como las actividades humanas y condiciones ambientales. En un país montañoso como Colombia, con una gran diversidad geológica y clima variable, el estudio de estos factores es esencial para la gestión y prevención de riesgos[22]. A continuación, se describen los factores que contribuyen a la inestabilidad del terreno:

4.2.1 FACTORES INHERENTES DEL TERRENO

Los factores inherentes, también llamados internos, se refieren a las características propias del terreno que predisponen a la inestabilidad. Uno de los elementos fundamentales es la composición del material en la pendiente, ya que ciertos tipos de suelo y roca, como arcillas y materiales piroclásticos, muestran menor resistencia al deslizamiento. Además, el estado de estos materiales si están fracturados, fisurados o altamente descompuestos afecta significativamente su cohesión y estabilidad estructural.

Otra característica inherente es la estructura geológica, que incluye la orientación y disposición de capas, fracturas o discontinuidades en el terreno. Estas estructuras pueden crear planos de debilidad donde el agua se infiltra, reduciendo la cohesión entre partículas y facilitando la ruptura del material bajo condiciones de estrés. Además, la inclinación del terreno es un aspecto crítico, ya que las pendientes más pronunciadas generan un equilibrio inestable que favorece la movilización de los materiales sueltos, especialmente cuando existen condiciones de saturación [22], [32].

4.2.2 FACTORES EXTERNOS CONTRIBUYENTES (NATURALES)

Los factores externos naturales, aunque no forman parte de la estructura del terreno, interactúan estrechamente con los factores inherentes y potencian la inestabilidad. Entre estos factores destaca la presencia de agua, ya sea por lluvias intensas o flujos subterráneos. La saturación de agua en el suelo incrementa su peso y disminuye la fricción interna, aumentando así la probabilidad de deslizamientos. En áreas donde las lluvias son estacionales y concentradas, como sucede en épocas de fenómenos climáticos como La Niña, la infiltración de agua en el suelo puede alcanzar niveles críticos que desencadenan movimientos en masa [22], [32].

La erosión en la base de las laderas es otro elemento a considerar. Los cursos de agua, al socavar la base de las pendientes, debilitan su soporte natural, lo que propicia condiciones de inestabilidad. Además, la actividad sísmica es un factor importante en Colombia; los terremotos generan vibraciones que reducen temporalmente la resistencia del terreno, desencadenando movimientos de suelo y roca en pendientes empinadas. Las zonas volcánicas también presentan un riesgo particular, ya que la acumulación de ceniza y otros materiales sueltos en pendientes contribuye a la inestabilidad [22].

4.2.3 FACTORES MODIFICADORES ANTROPOGÉNICOS

La actividad humana, aunque externa, puede modificar las condiciones naturales de las laderas y contribuir a su inestabilidad. La urbanización y construcción de infraestructura en áreas montañosas añaden cargas adicionales al terreno, lo que puede alterar su equilibrio natural. Este tipo de intervención es frecuente en áreas de alta densidad poblacional, donde el crecimiento urbano no siempre considera de manera rigurosa los criterios geotécnicos necesarios [22].

La deforestación también es un factor crítico, ya que la eliminación de la vegetación natural reduce la cohesión que proporcionan las raíces, favoreciendo la erosión superficial e incrementando la infiltración de agua en el terreno, lo cual lo debilita aún más. Las prácticas agrícolas y de pastoreo intensivo afectan de forma similar la estabilidad del suelo, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas, donde la eliminación de la vegetación natural expone el suelo a la erosión y compactación, disminuyendo su capacidad de retención de agua [22].

La susceptibilidad del terreno a estos eventos varía en función de la modificación continua de sus condiciones geotécnicas. Este fenómeno, conocido como "deterioro geotécnico acumulativo", implica un deterioro gradual de las propiedades físicas y mecánicas del suelo por la exposición repetida a factores desencadenantes, como lluvias y sismos. Esto aumenta la probabilidad de deslizamientos de tierra, especialmente en zonas con alteración de la vegetación natural o donde la intervención humana ha modificado la estabilidad del terreno [32].

4.3 GENERALIDADES DE LA MTN

Esta metodología, ideada por el ingeniero Colombo-Húngaro Tomás Shuk, parte de la premisa de que “la naturaleza es el mejor ensayo *in situ*”, y propone un análisis que permite interpretar cuantitativamente las adaptaciones geomorfológicas y mecánicas de los materiales del terreno frente a factores climáticos,

sísmicos y ambientales [1], [5]. La MTN se basa en la correlación entre dos parámetros geométricos de los taludes: la Altura Vertical (H) y la Longitud Horizontal (L), que representan las dimensiones fundamentales del talud. Estos parámetros se relacionan a través de la función de potencia $H = A L^b$, donde A y b son parámetros empíricos específicos para cada tipo de talud. Este enfoque simplifica el análisis y permite una interpretación práctica de la estabilidad sin necesidad de extensas pruebas *in situ*, proporcionando una metodología rentable y eficiente en tiempo y recursos [1], [2]

La MTN se sustenta en el concepto de equilibrio dinámico de los taludes naturales, que establece que cada talud, bajo condiciones naturales, alcanza un estado de estabilidad que puede considerarse como un ensayo masivo *in situ*. Este equilibrio es resultado de la interacción de fuerzas externas e internas, que permiten que el talud se mantenga estable en el tiempo a menos que factores externos, como sismos o cambios en el nivel de agua subterránea, alteren sus condiciones. Shuk plantea que los taludes que alcanzan este equilibrio representan un modelo de referencia útil para la ingeniería geotécnica, al ofrecer un marco para evaluar la estabilidad en condiciones similares sin necesidad de ensayos complejos de campo [1], [33].

La metodología establece varias hipótesis esenciales, como la hipótesis básica de equilibrio, que sugiere que la relación geométrica entre la altura y la longitud de los taludes es una expresión de estabilidad alcanzada por adaptación natural. Además, la hipótesis de presurización y despresurización reconoce que el agua y otros factores de presurización influyen significativamente en la estabilidad del talud, siendo estas condiciones determinantes en zonas de alta pluviosidad o donde existen cambios estacionales en el nivel freático. Estas hipótesis permiten que la MTN incorpore aspectos dinámicos de adaptación de los taludes frente a variaciones ambientales, manteniendo su aplicabilidad en diferentes condiciones geológicas y climáticas [1], [5], [33].

4.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MTN

La MTN es un enfoque innovador en la caracterización de sitios geotécnicos que ofrece una alternativa simple y eficiente frente a los métodos convencionales. La MTN se fundamenta en la observación y análisis de taludes naturales, aprovechando los datos geomecánicos obtenidos a partir de características topográficas y geológicas visibles, sin necesidad de realizar pruebas de campo extensivas ni ensayos de

laboratorio costosos. Esta metodología es especialmente útil en contextos donde el acceso es limitado o donde los recursos financieros y de tiempo son reducidos, y puede aplicarse tanto en geotecnia como en estudios geológicos, de minería y de exploración de recursos [1].

Uno de los aspectos centrales de la MTN es su estructura operativa, que organiza el análisis en tres niveles que permiten una clasificación sistemática y detallada de los taludes en función de su disposición geológica y geomorfológica. Estos niveles operativos son esenciales para la organización de los datos y permiten un análisis jerárquico que facilita la interpretación de patrones de estabilidad y geomecánica en diferentes escalas espaciales [1]. La estructura operativa de la MTN se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Estructura operativa de la MTN

Niveles operativos	Descripción
Familia	Agrupa taludes naturales dentro de una misma delimitación espacial en una porción de una colina o formación homogénea
Población	Incluye un conjunto de familias dentro de una misma formación geológica
Universo	comprende todas las poblaciones de taludes en un área de estudio o proyecto más amplio.

Fuente: Adaptado de [1]

La MTN emplea un sistema simplificado de medición que se basa únicamente en L y H de los taludes, dos parámetros geométricos que se pueden obtener fácilmente a partir de mapas topográficos de alta calidad. La obtención de estas mediciones se realiza mediante el método de la Curva Cumulativa de Intervalos de Contorno Secuencial (SCCCI), el cual garantiza que las medidas de L y H sean consistentes y comparables en toda el área de estudio. Este método implica la recolección de mediciones desde la base hasta la cima de cada delimitación de taludes, facilitando así el análisis de tendencias geométricas en las inclinaciones y alturas [1].

En cuanto al enfoque de recolección de datos, la MTN se adapta a las necesidades específicas de cada estudio mediante tres estrategias de muestreo:

1. **Muestreo sesgado:** se emplea cuando es necesario analizar áreas específicas o críticas.
2. **Muestreo aleatorio:** utilizado en estudios de gran extensión para recolectar datos representativos sin analizar cada talud individual.
3. **Cobertura total:** en la cual se miden todos los taludes de un área determinada para obtener una caracterización exhaustiva.

Estas opciones de muestreo permiten que la MTN se ajuste a los requisitos y limitaciones de cada proyecto, maximizando la eficiencia en términos de tiempo y recursos. Por lo tanto, una de las principales ventajas de la MTN en comparación con los métodos geotécnicos tradicionales es su bajo costo operativo y la rapidez con la que se pueden completar los estudios. En lugar de realizar tareas de campo intensivas, perforaciones y pruebas en laboratorio, la MTN requiere únicamente mapas topográficos de calidad y datos geológicos básicos, lo que reduce los costos de los estudios en un rango que va de 1/1000 a 1/10,000 en relación con los métodos convencionales. Asimismo, los estudios realizados con la MTN se completan en una fracción del tiempo requerido por los métodos tradicionales, convirtiéndose en una herramienta viable para evaluaciones preliminares o estudios en áreas de difícil acceso [1].

Además de su uso autónomo, la MTN también puede emplearse como herramienta complementaria en proyectos geotécnicos donde los métodos convencionales son indispensables. Por ejemplo, la MTN puede aplicarse antes de un estudio geotécnico detallado para identificar áreas problemáticas y orientar un análisis más exhaustivo, o bien en las fases finales del proyecto como complemento, proporcionando una visión general del contexto geomecánico de una región. Esta función complementaria permite optimizar los recursos y mejorar la precisión de los estudios, enriqueciendo el diagnóstico geotécnico con información adicional sin elevar significativamente los costos [1].

4.5 INFORMACIÓN SECUNDARIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MTN

El desarrollo de la MTN inicia con la identificación y selección de los sectores a analizar, donde se recopila información básica de la geomorfología del terreno y las características de los materiales presentes. La selección de los sectores de estudio debe basarse en criterios geotécnicos que prioricen áreas críticas, como aquellas con inclinaciones pronunciadas, antecedentes de deslizamientos u otras condiciones que aumenten la susceptibilidad a fallas. La evaluación comienza con una recolección de datos en campo, que incluye levantamientos topográficos detallados y el mapeo de estructuras geológicas, tales como fracturas, fallas y diaclasas que influyen en la estabilidad del terreno. Además, se realiza una caracterización geotécnica de los materiales, identificando parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la densidad. Estos parámetros son esenciales para calcular el FS, el cual establece la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras, permitiendo una evaluación inicial de la estabilidad del talud [2]

La recopilación de al menos ocho pares de valores L y H es fundamental para obtener un coeficiente de correlación confiable y reducir la varianza en los resultados. La siguiente tabla, ilustra la relación entre el número de mediciones y el porcentaje representativo de la muestra (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre el número de mediciones y el porcentaje representativo de la muestra

Número de Parejas L y H Medidas en una Familia	Porcentaje del Total de la Familia Medidas
3	0
4	<1
5	<5
6	<10
7	<17
8 o > 8	>67

Para análisis a nivel regional o en proyectos lineales de gran extensión, se recomienda emplear topografía con una escala de 1:10.000 y curvas de nivel a cada 10 metros, lo cual permite capturar los detalles morfológicos sin necesidad de obtener planos de alta resolución. En estudios específicos, donde se requiera un análisis más detallado, se pueden emplear intervalos de curvas de nivel más reducidos: de 1 a 2 metros para suelos o rocas muy meteorizadas, de 5 a 10 metros para rocas con diaclasamiento medio a alto, y de 10 a 15 metros para formaciones rocosas más masivas. Este enfoque flexible permite adaptar la metodología de medición de los taludes a las características geológicas y topográficas de la zona evaluada, optimizando los resultados de la evaluación de la estabilidad [2].

Esta flexibilidad en la metodología de MTN facilita una evaluación adaptativa que se ajusta a las características geológicas y geomorfológicas del terreno, proporcionando así una base sólida para la aplicación de estrategias de manejo de taludes, tales como la revegetalización y otras soluciones basadas en la naturaleza para mitigar el riesgo de deslizamientos en áreas propensas [2].

El análisis geomorfológico, centrado en identificar las formas y características de la superficie del talud, considerando pendientes cóncavas, convexas o rectilíneas, y su relación con procesos de erosión y acumulación de sedimentos. La geometría del talud permite prever su comportamiento ante factores que pueden desestabilizarlo. Las pendientes cóncavas, por ejemplo, retienen mayor humedad, mientras que las convexas tienden a dispersarla; este aspecto es determinante en zonas de alta pluviosidad. Además de la forma de la superficie, el análisis geomorfológico segmenta el talud en zonas específicas (pata, parte media y cresta), cada una expuesta a diferentes ritmos y magnitudes de erosión y meteorización que afectan su estabilidad. Esta segmentación permite evaluar los factores de estabilidad en cada sección y obtener un diagnóstico integral del comportamiento del talud [33].

La geomorfología de un talud abarca diversos aspectos clave para su estabilidad y el enfoque de intervención bajo la MTN. La pendiente del terreno es fundamental, ya que una inclinación elevada incrementa la probabilidad de deslizamientos debido a la fuerza de gravedad. En pendientes superiores a 30 grados, la estabilidad disminuye considerablemente y es necesario implementar métodos de estabilización intensivos. La inclinación, combinada con el tipo de material que conforma el talud, determina en gran medida su susceptibilidad a deslizamientos [33].

El tipo de suelo es también crucial para el análisis de resistencia al deslizamiento de taludes. Los suelos arcillosos, por ejemplo, presentan baja permeabilidad, lo cual puede retener agua y reducir la cohesión interna, facilitando movimientos de masa. Por otro lado, los suelos arenosos, aunque menos cohesivos y más propensos a la erosión, permiten una mayor infiltración de agua, lo cual puede reducir la presión de poros en algunas condiciones. La composición del suelo debe evaluarse junto con pruebas geotécnicas para estimar la resistencia y cohesión de los materiales [2]

Las estructuras geológicas, como fallas y fracturas en la roca, también juegan un rol esencial en la estabilidad del talud. Las discontinuidades actúan como planos de debilidad y pueden facilitar deslizamientos en caso de un fallo estructural [2]. Las fracturas permiten la infiltración de agua y otros agentes que disminuyen la cohesión, facilitando movimientos de masa. Por esta razón, es fundamental un mapeo geológico detallado de fracturas y planos de estratificación en el área de estudio. La orientación de los estratos influye en la estabilidad del talud, especialmente si coinciden con la dirección de la pendiente; cuando los estratos están inclinados hacia el exterior del talud, pueden convertirse en superficies de deslizamiento, aumentando la probabilidad de fallo, por lo que deben considerarse técnicas de anclaje o refuerzo para mejorar la estabilidad. El análisis de la orientación y disposición de los estratos proporciona datos esenciales para implementar la MTN.

Teniendo en cuenta lo anterior, la estabilidad del talud está determinada en gran medida por su morfología y los procesos geomorfológicos que lo afectan, por lo cual es esencial dividirlo en sus componentes principales: pata, parte media y cresta. Esta clasificación permite identificar y analizar los procesos que influyen en cada sector, optimizando la evaluación de la estabilidad. El término "segmento" se refiere a las secciones rectilíneas del perfil del talud, mientras que "elemento" alude a cualquier parte del talud, independientemente de su geometría. Estas definiciones son fundamentales para una descripción estructurada y precisa [1], [2], [33].

Los procesos que intervienen en la evolución y degradación de los taludes se clasifican en exógenos y endógenos. Los procesos exógenos, responsables de la degradación, incluyen la meteorización y la erosión por agentes atmosféricos como el agua y el viento. La resistencia del material del talud modula estos procesos, generando variabilidad en la velocidad y magnitud de la degradación. Los movimientos

en masa gravitacionales, que responden a la fuerza de gravedad y a las características del material, producen inestabilidad superficial y profunda [1], [5], [29].

Por otro lado, los procesos endógenos, considerados constructivos, responden a esfuerzos tectónicos y otros factores internos del terreno. Estos generan tensiones residuales y deformaciones en las rocas y suelos, afectando indirectamente la estabilidad de los taludes al modificar sus propiedades y estructura subyacente. La interacción entre estos procesos define la forma final del talud, que puede ser rectilínea, cóncava o convexa, lo cual influye en su estabilidad según las propiedades del material y la inclinación de la pendiente [2], [33].

4.5.3 AGENTES DETONANTES

Los agentes detonantes en taludes se refieren a aquellos factores que contribuyen de manera negativa a la estabilidad del terreno, como el agua, la temperatura, la precipitación, la humedad la actividad sísmica, entre otros. El agua es un agente fundamental, ya que su presencia en el suelo afecta directamente la cohesión entre partículas y aumenta la presión de poros, lo que disminuye la resistencia del material del talud [27], [28]. Durante eventos de lluvia intensa, la infiltración excesiva de agua puede generar una condición de sobrepresión, desencadenando deslizamientos [9], [11], [13]. Además, el agua contribuye al proceso de intemperismo, debilitando la estructura del suelo y favoreciendo la aparición de grietas y fracturas [34].

La temperatura también juega un rol crucial, especialmente en regiones con variaciones climáticas extremas. Cambios térmicos generan expansión y contracción en los materiales del suelo y la roca, lo que eventualmente produce microfisuras y debilita la estructura del talud. Este fenómeno es más pronunciado en áreas montañosas y climas con estaciones marcadas, donde las temperaturas pueden fluctuar considerablemente entre el día y la noche o entre estaciones [3], [18]. Estas fisuras permiten la infiltración de agua y otros agentes que aceleran la descomposición y debilitamiento del terreno.

La radiación solar puede afectar significativamente la estabilidad de los taludes debido a sus efectos tanto en los materiales naturales como en los revestimientos estructurales. La radiación solar contribuye a la fatiga térmica y al deterioro de los revestimientos de taludes, como el concreto lanzado. Los ciclos de

enfriamiento y calentamiento generados por la exposición solar crean tensiones térmicas en los materiales rígidos, lo que provoca microfisuras que, con el tiempo, pueden evolucionar en fracturas y finalmente llevar al desprendimiento del. Además, la radiación solar afecta a la cobertura vegetal de los taludes, que es fundamental para su estabilidad. Cuando la vegetación no recibe la suficiente humedad, se debilita y, en algunos casos, puede marchitarse, exponiendo el talud a la erosión. Esta situación es particularmente crítica durante las temporadas secas, pues al llegar nuevamente la época de lluvias, la falta de cobertura vegetal incrementa el riesgo de erosión superficial y movimientos de masa debido a la mayor exposición a las precipitaciones [35], [36]

Los sismos son otra variable patológica relevante, especialmente en zonas tectónicamente activas. Las vibraciones generadas por un sismo pueden aumentar significativamente las fuerzas de cizallamiento en un talud, llevando al colapso de su estructura. En áreas con antecedentes de sismicidad, es esencial evaluar la resistencia sísmica de los taludes y, en caso de ser necesario, implementar técnicas de estabilización adicionales, como la construcción de muros de contención o la inyección de resinas estabilizantes para aumentar la cohesión del material [12], [13], [15].

Considerando lo anterior, es fundamental contar con estos datos ya que permiten modelar los escenarios de riesgo en función de las condiciones ambientales, dado que cada factor afecta de manera distinta la cohesión y estabilidad del material del talud.

4.6 EFECTIVIDAD DE LA MTN A PARTIR DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

La MTN hace parte de la macrogeotecnia, diferenciándose de la microgeotecnia convencional ya que aborda el análisis de taludes en contextos amplios, como zonas de montaña o áreas con alta variabilidad geológica. Mientras que la microgeotecnia se centra en estudios detallados de pequeñas áreas, la macrogeotecnia, a través de la MTN, permite una visión amplia que es esencial para la planificación a gran escala de proyectos de infraestructura, tal como la construcción de carreteras, embalses y túneles. La complementariedad entre estos dos enfoques facilita una integración de datos que respalda decisiones basadas en un marco geotécnico robusto [33].

Estudios adicionales de geohidrología, geomorfología, geodinámica, geología estructural y física, ingeniería geológica, geotectónica han confirmado la efectividad de la MTN para caracterizar la

estabilidad de taludes en diversas formaciones geológicas. Según investigaciones de campo realizadas en Medellín, la MTN presenta correlaciones cercanas entre sus parámetros calculados y los valores obtenidos en ensayos de laboratorio, lo que resalta su aplicabilidad en zonas con recursos limitados para análisis detallados. Este enfoque ha demostrado su utilidad en la optimización de costos de diseño y construcción, facilitando decisiones sobre ordenamiento territorial y mitigación de riesgos en áreas montañosas [37], [38].

Dentro de los estudios a resaltar a nivel nacional se destaca la investigación realizada por Waldo-Quinto en la cual aplicó de manera estructurada y exhaustiva la MTN en el municipio del Carmen de Atrato [39]. Los resultados del estudio mostraron que el uso de la MTN permite una evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa en función de factores de seguridad relativos (FSr) calculados en distintas temporalidades. Estas categorías, definidas como corto plazo, mediano plazo y largo plazo, reflejan las condiciones de estabilidad de los taludes bajo escenarios temporales variados, proporcionando un marco para identificar áreas con distintos niveles de riesgo. El análisis comparativo en las tres categorías de tiempo mostró que los taludes que eran relativamente estables en el corto plazo presentaban una disminución en el FSr en los horizontes temporales de mediano y largo plazo. Esto sugiere que, aunque algunas áreas pueden parecer seguras en evaluaciones de corto plazo, la exposición prolongada a condiciones climáticas y ambientales, como la erosión y la saturación por lluvias, incrementa el riesgo de deslizamientos [39]. Estos resultados resaltan la efectividad de la MTN en la identificación de zonas vulnerables a deslizamientos de forma cuantitativa y predictiva.

Por otro lado, con el fin de, ampliar la base de datos actual para la validación de la MTN en el Valle de Aburrá, contribuyendo a su consolidación como herramienta geotécnica en el contexto regional, el análisis realizado por Marín-Duque [38] mostró que la MTN permite evaluar la estabilidad de taludes a través de mediciones indirectas, utilizando parámetros geométricos y de presurización derivados de observaciones en campo. Al emplear un sistema de medición de curvas de nivel (SCICN) y una función de correlación geométrica, la MTN facilita la estimación de la altura y longitud de los taludes sin la necesidad de pruebas invasivas. La Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC) y otras envolutas hipotéticas calculadas permiten transformar estos parámetros en tensiones de corte y resistencia, brindando una evaluación aproximada pero funcional de la estabilidad del talud, con diferencias mínimas (2-3%) respecto a los resultados de laboratorio [38]. Estos resultados respaldan la MTN como una alternativa confiable y efectiva en proyectos de ingeniería civil, especialmente para estudios preliminares de estabilidad en terrenos geológicamente complejos. La metodología reduce

considerablemente los costos y tiempos asociados a los estudios geotécnicos tradicionales, al evitar ensayos invasivos y permitir la optimización de recursos. Estos hallazgos sugieren que la MTN se perfila como una herramienta útil en la planificación y diseño de obras, mejorando la gestión de riesgos y la eficiencia en proyectos de infraestructura en zonas montañosas.

La MTN se ha utilizado de manera práctica en diversos proyectos de ingeniería civil, incluyendo cortes y excavaciones en múltiples tipos de obras, zonificación geotécnica cuantitativa, análisis de taludes en embalses, túneles, edificaciones, puentes y otras estructuras. Esto resulta especialmente relevante en zonas montañosas, donde los estudios geotécnicos tradicionales suelen ser limitados o implicar altos costos. Su aplicabilidad en proyectos de minería y en infraestructuras como carreteras y embalses ha sido ampliamente documentada, ya que permite la optimización de recursos mediante el análisis indirecto de estabilidad. En estos casos, los resultados obtenidos de la MTN pueden integrarse en sistemas de información geográfica para la gestión de riesgos, facilitando la toma de decisiones en cuanto a la disposición de taludes, cortes y otras estructuras asociadas a los proyectos [37], [40].

La MTN, también se destaca en el ámbito de la zonificación geotécnica cuantitativa, aportando una solución práctica y económica frente a las metodologías convencionales que suelen ser más costosas y lentas. Esta permite un análisis detallado mediante el uso de parámetros geométricos de taludes naturales sin necesidad de extensos estudios de campo, sondajes o pruebas de laboratorio. En particular, la MTN se aplica exitosamente en regiones donde los recursos geotécnicos son limitados, optimizando el costo y el tiempo de los estudios. Esto la convierte en una herramienta eficaz para realizar estudios de zonificación geotécnica que requieren datos precisos y oportunos [2], [5], [33]. Además, los estudios de caso en áreas como los Andes colombianos han demostrado que esta metodología no solo es eficaz en términos de predicción de estabilidad, sino también en términos de costo-beneficio cuando se compara con métodos convencionales de exploración [5].

5 METODOLOGÍA: DESCRIPCIÓN DE LA MTN PROPUESTA POR SHUK

El diseño metodológico de esta investigación es de carácter descriptivo y aplicado, basado en la aplicación de la MTN de Tomás Shuk [2] para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en áreas críticas en la vereda El Vallano, sector Astilleros, del municipio de Envigado, Antioquia, Colombia. La MTN facilita un análisis detallado de las características geomorfológicas y geológicas del terreno, permitiendo identificar sectores vulnerables a movimientos en masa [2]. Adicionalmente, este enfoque permitió la identificación y caracterización de las condiciones geológicas y topográficas del terreno, así como el análisis de los factores que inciden en su estabilidad. A partir de esta evaluación, se espera contribuir al conocimiento sobre la estabilidad de los taludes naturales en la zona de estudio, identificando áreas con mayor riesgo de deslizamientos y proporcionando una base sólida para futuras investigaciones o intervenciones.

La aplicación de la MTN contribuye al alcance de los Objetivos Específicos 1 y 2. El primero se centró en analizar las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en las áreas críticas de la vereda El Vallano, sector Astilleros, del municipio de Envigado, Antioquia, Colombia. Para ello, se empleó un enfoque integral que permitió identificar las características topográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y climáticas de la zona de estudio, integrando estas variables para evaluar su influencia en la estabilidad del terreno y los factores que aumentan la probabilidad de deslizamientos (Sección 5.1).

Asimismo, el segundo objetivo consistió en identificar los sectores específicos susceptibles a movimientos en masa utilizando la MTN. Esta metodología se aplicó para delimitar y caracterizar las áreas críticas en la vereda El Vallano, sector Astilleros, con base en el análisis detallado de los elementos naturales y los patrones de inestabilidad observados en el terreno (numerales 5.1-5.6). La Figura 1, describe el proceso metodológico para el alcance de objetivo planteados.

FASES DEL ENFOQUE METODOLÓGICO

FASES	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS
FASE 1: Recolección y Análisis de Información Secundaria	1 Analizar las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en las áreas críticas de la vereda el Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia.	<ul style="list-style-type: none"> • Recolección de información topográfica, geológica y geomorfológica. • Recolección de información hidrológica e hidráulica. • Recolección de información climática. 	Análisis e identificación de las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en las áreas críticas de la vereda el Vallano, sector Astilleros.
FASE 2: Aplicación de la MTN	2 Identificar los sectores susceptibles a movimiento en masa con la MTN, en la vereda el Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia.	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones de las familias (Taludes Naturales). • Aplicación de ecuaciones y funciones de la MTN. • Cálculo del Patrón Triangular. • Análisis del Sistema Analítico de la MTN (SAMTN). • Cálculo y análisis del Factor de Seguridad Relativo (FSr). 	Identificación de las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa, definiendo con precisión las zonas de alta probabilidad de deslizamientos en la vereda el Vallano, sector Astilleros.
FASE 3: Revisión de Literatura Sobre Técnicas de Bioingeniería	3 Realizar recomendaciones de técnicas de bioingeniería para la estabilización de los taludes naturales identificados con alta susceptibilidad al aplicar la MTN.	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión y análisis de estudios científicos y casos aplicados en contextos similares sobre técnicas de bioingeniería. 	Elaboración de recomendaciones específicas utilizando técnicas de bioingeniería para la estabilización de taludes con alta susceptibilidad a deslizamientos identificados en la vereda El Vallano.

Fig. 1 Proceso metodológico del caso de estudio

5.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN

5.1.1 TOPOGRAFÍA

La información, se obtuvo a través de una solicitud al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la cual agrupa la información cartográfica del municipio y facilita el acceso a estos recursos.

Esta información permitió describir las características físicas del terreno, al utilizar curvas de nivel con un intervalo de 1 metro. Esta información fue esencial para la representación gráfica y cartográfica de la vereda el Vallano sector Astilleros.

5.1.2 GEOLOGÍA

La información geológica de la zona del Vallano sector Astilleros, específicamente de la cuenca de la quebrada de la Ayurá, se obtuvo mediante un estudio geológico del área. Además, se consultaron fuentes relevantes como el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Envigado y los mapas de estudios de movimientos en masa, que proporcionaron datos complementarios sobre la geodinámica y las características litológicas del sector.

5.2 MEDICIONES DE TALUDES NATURALES A NIVEL FAMILIA

5.2.1 ESTRUCTURA OPERACIONAL DE LA MTN

Los componentes operativos de la MTN incluyen universo, población, subpoblación y familia.

En el presente estudio, se llevaron a cabo mediciones de taludes naturales en el nivel de familia, basándose en la información recopilada sobre topografía y geología. En este nivel, las mediciones de L vs H dan lugar a tres tipos de funciones de correlación, como se muestran en las siguiente ecuaciones:

Ecuación 1

$$H = aL^b \quad (1)$$

Ecuación 2

$$H = a(L_o + L)^b \quad (2)$$

Ecuación 3

$$H = a + bL \quad (3)$$

Donde **a** y **b** representan parámetros funcionales que varían según la función seleccionada. De las anteriores funciones consideradas para la correlación, este estudio utilizó la función potencial simple (1), que genera coeficientes de correlación (L vs H) cercanos a valores ideales. Además, se observó que los perfiles convexos presentan un ajuste superior con esta función. Los métodos de evaluación de taludes naturales se clasifican en cuatro categorías:

- Taludes Enteros (TE)
- Faceta de Taludes (FT)
- Taludes Enteros de Pendientes Máximas (TEPX)
- Secuencial Cumulativo de Intervalos de Curvas De Nivel (SCICN)

Entre estas potenciales, destaca la SCICN, que es el utilizado para los cálculos realizados en este estudio.

5.2.2 SECUENCIAL CUMULATIVO DE INTERVALOS DE CURVAS DE NIVEL (SCICN)

En esta metodología, el sistema de medición se aplicó exclusivamente a nivel de familia. El proceso comenzó con la identificación de las cotas inferiores dentro del límite de una familia específica, y se midió en rangos entre estas cotas y la cota continua superior. A partir de estas mediciones, se calcularon las distancias perpendiculares entre ambas curvas, identificando los valores máximo y mínimo, para luego determinar un promedio de estos dos valores.

El procedimiento continuó con la siguiente curva de nivel, incrementando los intervalos medidos. En esta etapa, se obtuvieron tres valores de L correspondientes a una H, donde para los dos intervalos intermedios la medida fue el doble de la primera. Este método se repitió hasta abarcar todos los espacios comprendidos entre las cotas mínimas y la cota superior dentro de la delimitación de la familia.

Posteriormente, se identificó la Altura Límite Superior (HLD), ubicada sobre la curva de nivel superior de la familia definida, junto con la longitud máxima medida entre las curvas de nivel mínima y máxima. Este valor de HLD resultó esencial para determinar el Patrón Triangular (PT) y para calcular parámetros relacionados con la estabilidad y la geomecánica en la MTN. En ciertos casos, la HLD se obtuvo directamente de la última medición disponible, mientras que en otros se calculó como la diferencia entre el punto más alto de la delimitación de la familia y la curva de nivel mínima. La Figura 2 ilustra el sistema SCICN.

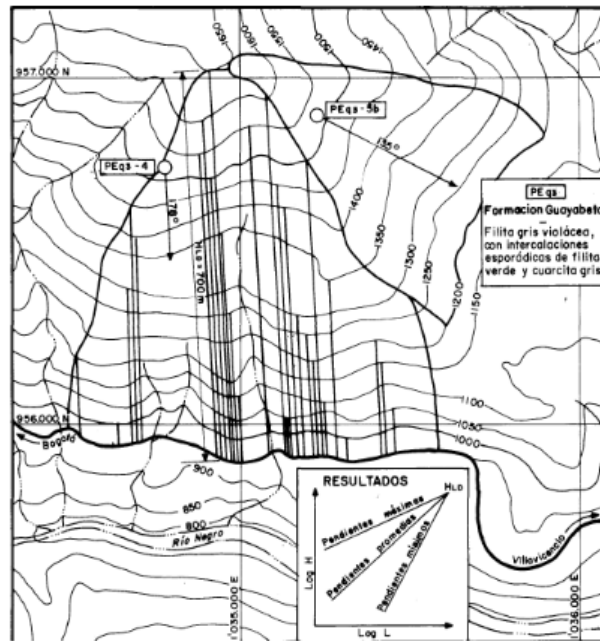


Fig. 2 Medición de taludes a nivel de familia a través del Sistema SCICN

[37]

Este método general se utiliza en perfiles de tipo convexo. Para las familias con un perfil cóncavo, el procedimiento descrito se lleva a cabo iniciando desde la curva de nivel más alta o máxima.

Para la aplicación de esta metodología, se utilizó información secundaria en conjunto con el soporte de un software DWG especializado para realizar las mediciones y análisis necesarios. El proceso se estructuró en los siguientes pasos:

1. **Recolección y análisis de datos topográficos y geológicos:** Se recopiló toda la información topográfica y geológica relevante del área de estudio, garantizando que los datos estuvieran actualizados y fueran precisos para una correcta interpretación del terreno.
2. **Importación de datos en el software DWG:** Los datos recopilados fueron cargados en un programa DWG, permitiendo la visualización y manipulación detallada de la topografía y las características geológicas del área. Esta herramienta facilitó el análisis de las curvas de nivel y otros elementos geospaciales necesarios para la metodología.

3. Generación de curvas de nivel y delimitación de áreas de interés: Con el apoyo del software DWG, se generaron las curvas de nivel del terreno, permitiendo identificar áreas específicas dentro de la delimitación de cada familia topográfica. Para perfiles de tipo convexo, el procedimiento comenzó desde la curva de nivel mínima; mientras que, para perfiles cóncavos, el proceso inició desde la curva de nivel máxima.

Este procedimiento sistemático, con el uso de la herramienta DWG, permitió una interpretación precisa y estandarizada de las características del terreno, facilitando la evaluación de la estabilidad y los parámetros geomecánicos en la metodología aplicada a taludes naturales.

5.2.3 CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES

La metodología para medir las familias de taludes ofrece dos enfoques. El primero es un cubrimiento sesgado, en el cual se consideran únicamente los taludes ubicados en el área de estudio, ya sea en un proyecto específico o mediante un muestreo representativo de la zona. El segundo abarca la totalidad de la zona de estudio, que implica medir todas las familias de taludes naturales que pueden ser evaluadas dentro del área de interés.

Las familias de taludes medibles incluyen los materiales geológicos seleccionados para el análisis en el estudio. Estas familias cumplen con un número determinado de curvas de nivel entre su punto más bajo y su altura máxima (HLD), según lo establecido en la regla general de la metodología.

5.3 ECUACIONES Y FUNCIONES DE CUBRIMIENTO TOTAL

Considerando la definición de cubrimiento de mediciones detallada en el numeral 5.2.3, la presente investigación estimó las mediciones de todas las familias de taludes naturales que fueron medibles en el caso de estudio, priorizando taludes cercanos a la cuenca La Ayurá.

5.3.1 FUNCIONES DE CORRELACIÓN Y SUS PARÁMETROS CUANTITATIVOS

A continuación, se muestran las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo y la determinación de los factores de seguridad.

Hipótesis: Las variables L y H mantienen una relación de proporcionalidad directa.

Ecuación 4.

$$L = f(H), \text{ o } H = f(L) \quad (4)$$

Tipos de funciones de correlación

Ecuación 5

$$H = a_1 L^{b_1} \quad (5)$$

Ecuación 6

$$H = a_2 (L + L_0)^{b_2} \quad (6)$$

Ecuación 7

$$H = a_3 + b_3 L \quad (7)$$

Donde:

L y H corresponden a parámetros geométricos que salen de los planos topográficos.

L_0 y H_0 ; corresponden a parámetros derivados aplicables a la función tipo 2.

a y b son parámetros funcionales: Estos son diferentes para cada uno de los tipos de funciones.

Parámetros Estadísticos

r: coeficiente de correlación: cuantifica la relación funcional y su sentido

r^2 : coeficiente de determinación: es la relación entre la variabilidad explicada y la variabilidad total.

S_L : Desviación estándar de la distribución marginal de L.

S_H : Desviación estándar de la distribución marginal de H.

$S_{L,H}$: Desviación estándar de L en H, o desviación estándar de L condicional a H.

5.4 PATRÓN TRIANGULAR

5.4.1 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA

Los datos obtenidos en las mediciones revelan tres tendencias principales en las pendientes. Las dos tendencias externas (superior e inferior) configuran lo que se conoce como Patrón Triangular (PT). Esta área se caracteriza a nivel de familia, también se observa de manera consistente en niveles de medición superiores, lo que resalta su relevancia en el análisis de pendientes.

Una vez recopilados los cálculos de los taludes naturales a nivel familia, incluyendo las longitudes máximas, mínimas y promedio (L), así como los rangos de altura (H), considerados como parámetros geométricos, se realizó el cálculo de los parámetros funcionales aplicando la ecuación de la función potencial simple. Este paso es fundamental para identificar el comportamiento de las pendientes y sus relaciones estructurales, facilitando una comprensión más precisa del perfil geomorfológico de cada talud.

5.4.2 PARÁMETROS FUNCIONALES a y b

En esta etapa se evalúan los parámetros geométricos correspondiente a cada familia. La relación causal entre la longitud (L) y la altura (H), se representa mediante la ecuación: $H = aL^b$.

Ecuación 8

$$\log H = \log a + b \cdot \log L \quad (8)$$

A partir de la ecuación (8), se deduce que el término $\log a$ actúa como la constante en la regresión lineal entre $\log H$ y $\log L$, mientras que b representa la pendiente de dicha regresión.

Una vez obtenidos los cálculos logarítmicos de los parámetros de los taludes a nivel familia, como la L máx. y L mín y la H , se realizó la correlación lineal. Esto permitió identificar los valores de a y b como parámetros funcionales.

Los valores de a y b se obtuvieron promediando las correlaciones lineales: a se derivó del promedio logarítmico, mientras que b mediante el promedio aritmético de los datos. El coeficiente de correlación r , próximo a 1, indica una alta correlación en los datos obtenidos.

5.4.3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Para cada familia de taludes, es necesario identificar la Longitud Límite Superior (LLD) y la Altura Límite Superior (HLD), las cuales representan, respectivamente, la longitud máxima en la cresta y la altura máxima obtenida en las mediciones.

Dependiendo del polígono de cada familia de taludes naturales, el valor parámetro funcional b varía de la siguiente manera:

- Perfil convexo: $b < 1$
- Perfil cóncavo: $b > 1$

De acuerdo con la base empírica y teórica de la MTN, el valor de b debe ser < 1 . Para familias con perfiles cóncavos el procedimiento de medición SCICN debe invertirse respecto al utilizado para perfiles convexos, realizándose de arriba hacia abajo [37], como se muestra en la ecuación 9.

Ecuación 9

$$b_{\text{corregido}} = 1/b \quad (9)$$

5.4.4 DETERMINACIÓN DE LA FAMILIA DE TALUDES NATURALES

Con los parámetros de la función potencial simple ya obtenidos y analizados, el tipo de perfil se determina la familia delimitada para identificar cuáles cumplen los criterios de aceptación, cuáles se consideran rocas, cuáles presentan degradación y cuáles no cumplen con los criterios de la MTN.

Según Shuk [2], la MTN se aplica a familias de taludes naturales en las que el tangente límite inferior de la función de correlación entre L y H ($\tan \beta L_f$) es menor que 1, lo cual corresponde a inclinaciones del talud en un rango de 10° y 45° . Además, el parámetro adimensional de presurización (Pa) debe ser menor que el valor máximo permitido para presurización (Pa_{max}). Adicional a esto, se calcula el valor que caracteriza el material: si X_{LH} es <1.0 , el material es clasificado como roca degradada, mientras que valores de $X_{LH} >1$ indican roca íntegra. Estos parámetros y criterios se explican con mayor profundidad en el capítulo de ETEC; que fue aplicado en el presente trabajo para definir las familias aceptadas para realizar los cálculos subsiguientes.

El cálculo de la longitud límite superior (L_{LF}) y la altura límite superior (H_{LF}) en una función potencial simple que relaciona L y H, se realiza mediante el siguiente procedimiento:

Primero se calcula L_{LF}

Ecuación 10

$$L_{LF} = \left[\frac{H_{LD}}{a(L_{LD}^{(1/b)})} \right]^{\frac{b}{b^2+1}} \quad (10)$$

Posteriormente, se calcula H_{LF} utilizando la ecuación de función potencial simple aplicada a los valores de altura y longitud límite superior.

Ecuación 11

$$H_{LF} = a(L_{LF}^b) \quad (11)$$

Se calcula el a en función de H_{LF} y L_{LF} y $b_{corregido}$. De la función potencial simple se obtiene:

Ecuación 12

$$a = \frac{H_{LF}}{(L_{LF})^{b_{\text{corregido}}}} \quad (12)$$

Tal como se indicó anteriormente, para que las mediciones de los taludes sean aceptadas, deben cumplir dos condiciones: (i) el valor del tangente límite inferior de la función de correlación entre L y H debe ser menor que 1 ($\tan \beta_{LF} < 1$), y (ii) el parámetro adimensional de presurización (Pa) no debe exceder el límite máximo establecido (Pa_{max}).

Condición 1.

En esta condición se determina el tangente límite inferior ($\tan \beta_{LF} < 1$) correspondiente a la función de correlación L y H.

Ecuación 13

$$\tan \beta_{LF} = \frac{H_{LF}}{L_{LF}} \quad (13)$$

Condición 2.

Para esta condición, el cálculo del parámetro adimensional de presurización Pa , requiere la definición previa de tres factores adimensionales, los cuales se establecen de manera secuencial como sigue:

Ecuación 14

$$F_1 = \frac{a}{(H_{LF})^{1-b}} \quad (14)$$

Ecuación 15

$$F_2 = \frac{F_1^{F_1}}{b^b} \quad (15)$$

Ecuación 16

$$F_3 = (F_2)^{1-b} \quad (16)$$

Posteriormente, se determina el parámetro adimensional correspondiente a resistencia máxima al corte S_a :

Ecuación 17

$$S_a = \frac{F_1(b^b)}{F_3} \quad (17)$$

Luego, se calcula el parámetro adimensional de presurización Pa

Ecuación 18

$$Pa = b - S_a \quad (18)$$

Después, se determina el parámetro adimensional de presurización máxima $Pa_{máx}$

Ecuación 19

$$Pa_{máx} = \frac{b+1}{b+2} \quad (19)$$

Finalmente, al evaluar la familia, se selecciona el parámetro X_{LH} que representa el límite entre las condiciones de roca intacta y roca degradada. Este parámetro será explicado con mayor detalle más adelante en el numeral 5.5.1.

Ecuación 20

$$X_{LH} = a^{\frac{1}{1-b}} \quad (20)$$

5.4.5 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN

En este patrón se observa en una amplia gama de composiciones litológicas, que incluyen materiales de distintas edades, orígenes y texturas, desde rocas resistentes hasta suelos blandos. Este patrón emerge únicamente cuando los datos obtenidos de las mediciones se grafican en una escala logarítmica.

Para ello, fue fundamental recopilar todas las mediciones de combinaciones de L vs H para las familias que cumplieron con los criterios establecidos, es decir, los valores de H_{LD} y L_{LD} registrados en una escala logarítmica, con el fin de caracterizar el PT en la población analizada. Este PT constituye un modelo determinístico, basado en relaciones de causalidad físico-geomecánicas e influido por las características físicas de la masa de materiales rocosos [2]. Varias de estas propiedades se presentan en la Figura 3.

Se determinó el PT de la zona, identificando las tendencias de las pendientes, en función de los pares de mediciones obtenidas. Este análisis permitió caracterizar las variaciones observadas en las pendientes a partir de las combinaciones de las mediciones realizadas.

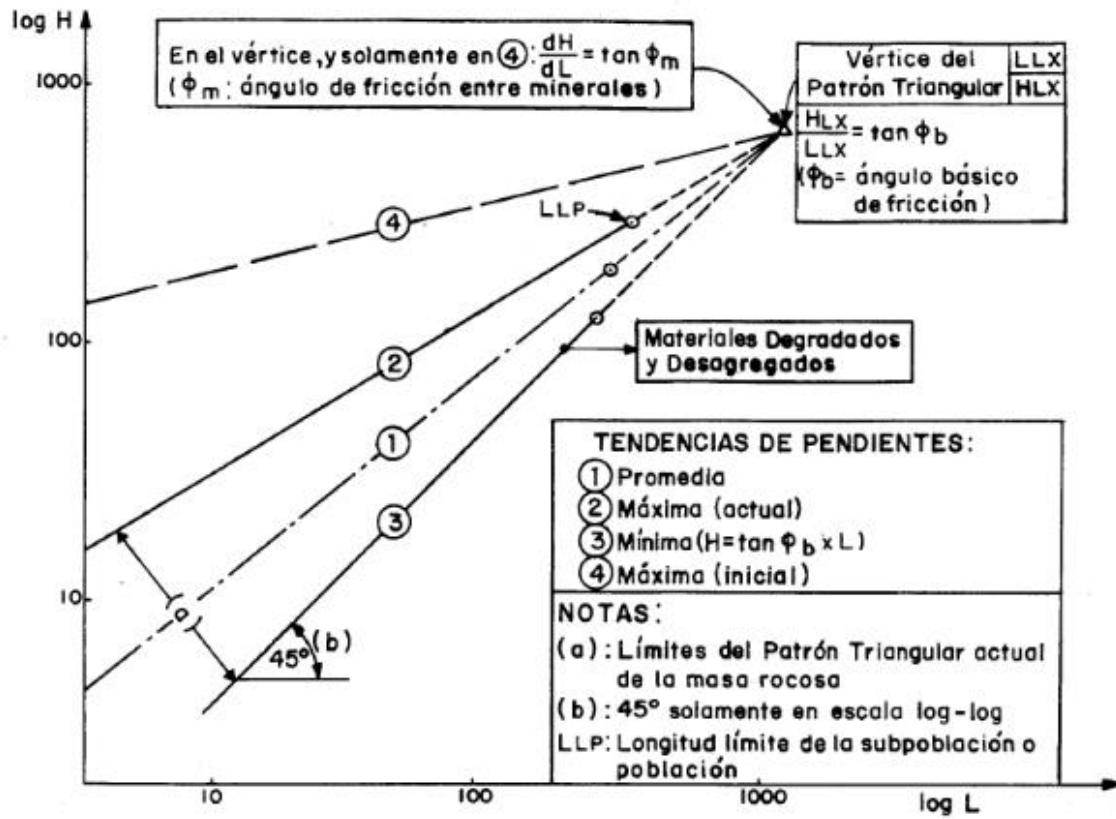


Fig. 3 Características del PT.

Tomado de Shuk [37].

5.4.6 LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PATRÓN TRIANGULAR

Tendencia actual de pendientes máximas:

Se identificó la tendencia actual de las pendientes máximas determinando la función potencial a nivel de subpoblación, población o universo. Esto se realizó correlacionando los puntos con los valores más altos de H_{LD} , los cuales reflejan la tendencia predominante entre la mayoría de los puntos graficados - parejas H_{LD} y L_{LD} en una escala logarítmica. Para ello, se seleccionaron al menos tres puntos, y su expresión potencial simple fue obtenida por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 21

$$H = a_a(L^{b_a}) \quad (21)$$

Donde: Usualmente b_a : (0.5 – 0.9), y a_a : > 1.0

Tendencia inicial (o de origen) de pendientes máximas:

Se estimaron los parámetros de caracterización de la masa a partir de los resultados derivados de la tendencia inicial de las pendientes máximas. Estos parámetros solo pudieron calcularse basándose en dicha tendencia, la cual se expresó mediante una formulación matemática específica que representa las variaciones observadas en las pendientes.

Ecuación 22

$$H = a_x(L^{b_x}) \quad (22)$$

Donde: $b_x < 0.5$ (usualmente) = $\frac{\tan \varphi_m}{\tan \varphi_b}$, y $a_x = \frac{H_{LX}}{L_{LX}^{b_x}}$ (considerablemente >1.0).

A partir de la tendencia observada en las pendientes máximas, se definió la función potencial simple que permitió calcular los parámetros geométricos H y L , además de los parámetros funcionales a_a y b_a . Las mediciones proporcionaron los valores de H_{LP} y L_{LP} , que, junto con un punto adicional de H frente a L en

escala log-log, reflejaron la tendencia predominante entre la mayoría de los datos graficados. Con estos datos, se delineó una pendiente cuya regresión en escala logarítmica permitió establecer la función potencial, facilitando la estimación de los parámetros funcionales a y b .

5.4.7 ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN

Según lo recomendado por Shuk [2], se consideró que el ángulo básico de fricción (φ_b) es constante para las distintas posibles tendencias dentro del PT, ya sea máxima, promedio o mínima, y se iguala al ángulo de fricción residual efectivo en condiciones de masa. En rocas, el valor de φ_b varía entre 25° y 37°. Este valor puede diferir ligeramente entre un 3 y un 5% del ángulo de fricción residual, el cual se determina por ensayos de corte directo sugeridos.

Para estimar el ángulo básico de fricción y determinar el límite inferior del PT, se utilizó un proceso iterativo. Este proceso comenzó con un valor inicial asumido del $\tan \varphi_b = 0.6$, correspondiente a un rango de φ entre 25° y 37° en rocas. En cada ciclo, y con base en los parámetros funcionales obtenidos en el apartado 5.4.6, se estimaron los parámetros del vértice $(L_{xn})_n$ y $(H_{xn})_n$, de la siguiente manera:

Ecuación 23

$$(L_{xn})_n = \left[\frac{a}{\tan \varphi_b} \right]^{\left[\frac{1}{1-b} \right]} \quad (23)$$

Ecuación 24

$$(H_{LX})_n = a(L_{LX})_n^b \quad (24)$$

Una vez estimado el vértice, se realizaron los cálculos necesarios para completar el ciclo de iteración dado (n):

Ecuación 25

$$(\tan \varphi_n)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n} \quad (25)$$

Ecuación 26

$$(b)_n = (\tan \varphi_b)_n \quad (26)$$

Ecuación 27

$$(a)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n^{(\tan \varphi_b)_n}} \quad (27)$$

Ecuación 28

$$(L_{LF})_n = L_{LP} \quad (28)$$

El valor de $(L_{LF})_n$ representa la longitud límite superior de la población, previamente determinada a partir de las mediciones y la tendencia observada en las pendientes máximas. Por otro lado, $(H_{LF})_n$ se calcula como una potencia derivada de los parámetros correspondientes al ciclo de iteración n .

Ecuación 29

$$(H_{LF})_n = (a)_n (L_{LP})^{(b)_n} \quad (29)$$

Ecuación 30

$$(\tan \beta_{LF})_n = \frac{(H_{LF})_n}{(L_{LF})_n} \quad (30)$$

Y si $(\tan \beta_{LF})_n^{(b)_n}$ se representa por " T " entonces, se consideró la ecuación (30).

Ecuación 31

$$(S_a)_n = (T^{(1-T+((b)_n T))}) (b_n^{2b_n - b_n^2}) \quad (31)$$

Si $(S_a)_n \neq (\tan \varphi_b)_n$, se procedió al siguiente ciclo de iteración $(n+1)$, utilizando el $(\tan \varphi_b)_n$ obtenido en el ciclo previo.

5.4.8 ÁNGULO DE FRICCIÓN ENTRE MINERALES

El parámetro funcional b correspondiente a la tendencia inicial de las pendientes máximas se definió a partir de la tangente del ángulo de fricción, en combinación con el valor de $\tan \phi_b$. Como se muestra en la Figura 4, la relación entre $\tan \phi_m$ y $\tan \phi_b$ es específica y se mantiene aplicable a cualquier tipo de roca, independientemente de su génesis litológica[2]. Esta relación también presenta un grado de correlación (r) considerado 'casi perfecto'.

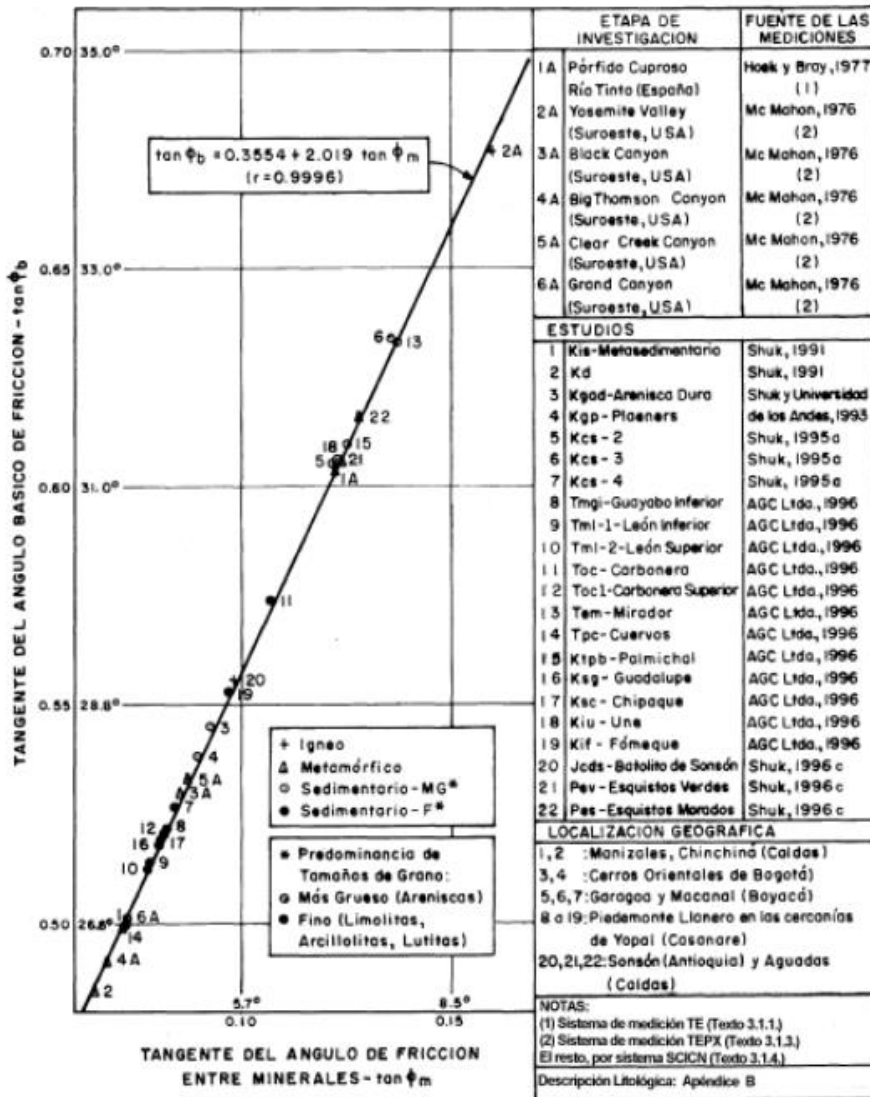


Fig. 4 Relación entre $(\tan \phi_m)$ y $(\tan \phi_b)$.

Tomado de Shuk [1].

5.4.9 LÍMITE INFERIOR DEL PATRÓN TRIANGULAR

Para las rocas, este límite está asociado a la tendencia de las pendientes mínimas observadas en los niveles de subpoblación y población. Generalmente, se representa como una línea con una inclinación de 45° en una escala log-log, y su expresión se define como:

Ecuación 32

$$H = (\tan \varphi_b)(L) \quad (32)$$

En la metodología empleada, se realizó un muestreo exhaustivo de los taludes mediante un enfoque de "cubrimiento total", lo que garantizó una evaluación integral de las áreas de estudio y permitió representar con precisión los puntos clave. La determinación de la función potencial simple del límite inferior y sus parámetros se logró mediante la correlación de los puntos localizados a la derecha del promedio, estableciendo una tendencia que debía cruzar el PT, lo cual contribuyó a validar el procedimiento empleado. En situaciones donde se detectó una cantidad significativa de materiales degradados o desagregados, se definió una ecuación de escalamiento de altura diseñada específicamente para modelar con mayor exactitud las condiciones reales de los taludes observados:

Ecuación 33

$$H = a_i L^{b_i} \quad (33)$$
$$a_i < 1.0 \text{ y } b_i > 1.0$$

La Figura 5, ilustra que el límite inferior del PT actúa como una línea divisoria entre las rocas y los materiales degradados o desagregados. A nivel de familia, los materiales desagregados se identifican mediante el parámetro $X_{LH} < 1.0$, como se describe en la ecuación (1). Este parámetro corresponde a la intersección entre una línea con pendiente de 45° ($L = H$) y a la tendencia potencial simple que describe las pendientes promedio de una familia.

En el caso de subpoblaciones o poblaciones compuesta predominantemente por rocas, el valor de X_{LH} suele ser superior a 1.0. Sin embargo, en ciertos escenarios, algunas familias dentro del PT de una roca

específica pueden presentar un valor de $X_{LH} < 1.0$. Esto ocurre debido al control morfológico ejercido por la roca subyacente sobre el material desagregado, generando una geoforma similar.

El punto (H_{LD}, L_{LD}) se ubica en la intersección del vértice, permitiendo derivar los parámetros funcionales de la función potencial simple asociada a este límite inferior.

Los parámetros de la función, $(a_i; b_i)$, reflejan un comportamiento análogo a la tendencia observada en el límite inferior a nivel del universo, tal como se detalla en la ecuación (33).

5.4.10 MATERIALES DEGRADADOS Y DESAGREGADOS

Los materiales anteriormente descritos, abarcan rocas fracturadas, conglomerados y conjunto de fragmentos de roca con suelo. Estos pueden originarse de secuencias de materiales derivados de la misma roca madre o de materiales trasladados desde regiones externas al área de estudio.

En la Figura 5 se identifican tres factores principales que explican estos procesos, los cuales son la desagregación, degradación y variabilidad. Estos factores, de naturaleza compuesta, están determinados por la antigüedad de los materiales, los procesos evolutivos sufridos y el grado de variabilidad presente. Dichos elementos influyen tanto en la posición relativa como en la amplitud del PT actual en relación con el inicial.

En la Figura 5A, se aprecia un leve descenso en la tendencia de las pendientes máximas actuales respecto a las iniciales, indicando degradación y variabilidad casi imperceptibles, sin signos de desagregación. La Figura 5B evidencia un nivel moderado de degradación sin desagregación, pero con mayor variabilidad en comparación con la Figura 5A. Por otro lado, las Figuras 5C-E muestran una desviación progresiva en la tendencia actual de las pendientes máximas frente a las iniciales, reflejando grados crecientes de degradación. La Figura 5E representa un estado extremo, donde predominan la degradación y la desagregación, aunque con una variabilidad reducida.

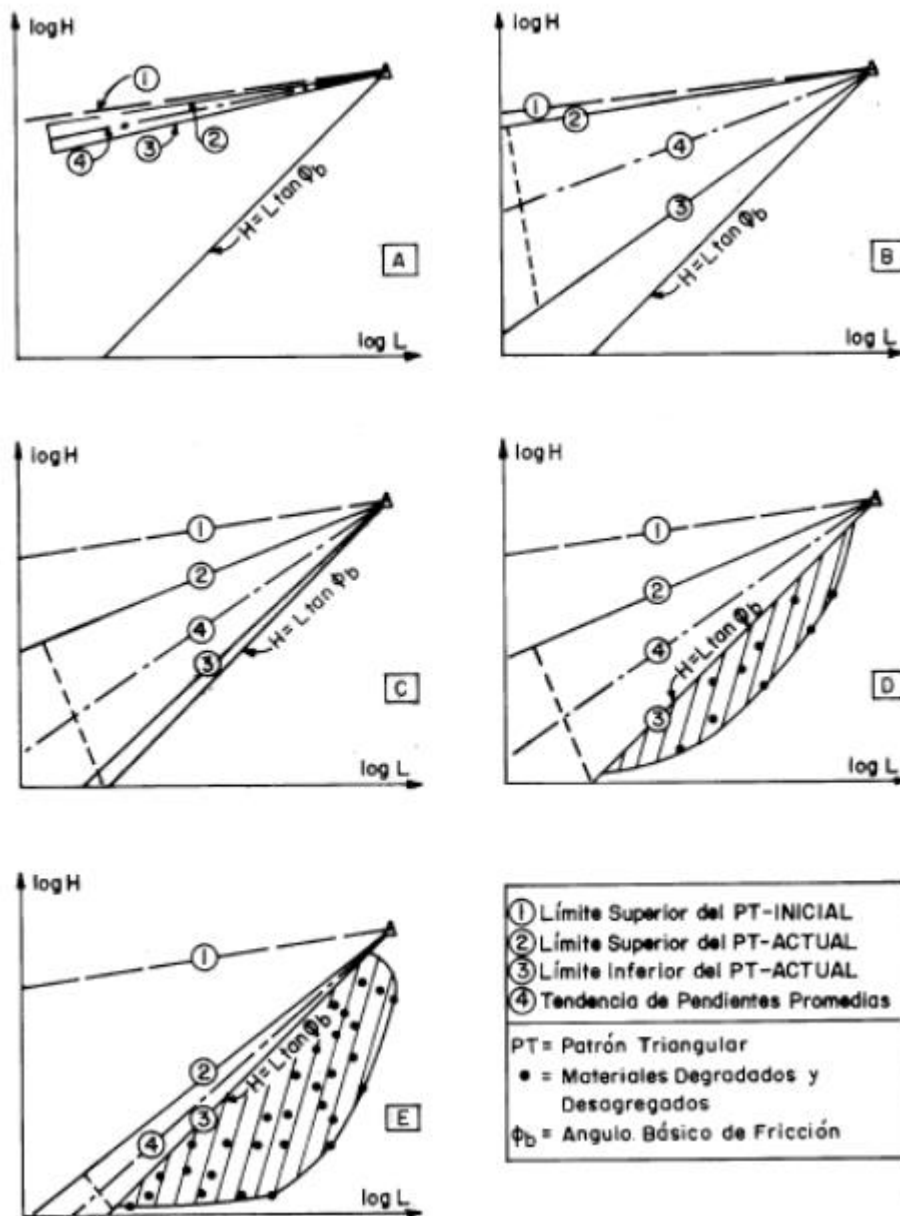


Fig. 5 Representación del PT y atributos de variabilidad, degradación y desagregación.

Tomado de Shuk [2].

5.4.11 VÉRTICE DEL PT

El vértice, se define como el punto donde convergen los límites superior e inferior del PT, localizado en (H_{LX}, L_{LX}) . El parámetro H_{LX} que determina la altura del vértice, suele corresponder al espesor estratigráfico característico de la formación analizada.

5.4.12 TENDENCIA DE PENDIENTES PROMEDIAS

Esta tendencia desempeña un papel clave en el análisis del PT, ya que permite realizar estimaciones geomecánicas y de estabilidad. En un muestreo que abarque toda la población, la función potencial simple asociada debe interceptar el vértice (H_{LX}, L_{LX}) del PT y atravesar el punto H_{LD}, L_{LD} , correspondiente al promedio logarítmico de las familias incluidas, en la sección del PT asociada a la roca.

Para derivar la función promedio utilizada en la estimación del FSr, (detallada posteriormente en la sección 6.5), se emplean las siguientes ecuaciones:

Ecuación 34

$$a_p = \log - 1 \frac{(\log a_i) + (\log a_a)}{2} \quad (34)$$

Ecuación 35

$$b_p = \frac{b_i + b_a}{2} \quad (35)$$

5.5 SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN)

El SAMTN integra el análisis conjunto de la Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC) y varias envolutas conocidas como "hipotéticas". Este enfoque se fundamenta en un conjunto de relaciones matemáticas derivadas de manipulaciones sistemáticas, consistentes pero de naturaleza arbitraria, que presentan una conexión no directa con las propiedades geológicas reales de los materiales. Solo mediante el uso de herramientas basadas en estas envolutas es posible aproximarse gradualmente a dichas propiedades.

5.5.1 ENVOLUTA TRANSFORMADA DE ESFUERZOS DE CORTE (ETEC)

La función potencial simple puede reformularse en términos de esfuerzos, dando lugar a la ETEC. Esta transformación usa un factor dimensional (Fd), cuyo valor es 1.0 en el sistema de unidades MKS. La ETEC se describe matemáticamente mediante la siguiente expresión:

Ecuación 36

$$\tau = a \cdot \sigma_v^b (Fd) \quad (36)$$

Donde:

a y b son los parámetros funcionales obtenidos de las mediciones sobre planos topográficos.

Fd : factor de $\left[\frac{M}{L^3}\right]^{1-b}$

σ_v : Esfuerzo vertical.

τ : Esfuerzo de corte.

A su vez, la expresión del factor dimensional (Fd) es:

Ecuación 37

$$Fd = (\gamma_b)^{1-b} b^b \quad (37)$$

Donde:

γ_b : peso unitario subíndice b , para $Fd=1$

b^b : expresión adimensional doble potencial del parámetro funcional b .

Desarrollo Matemático de la ETEC

Este desarrollo, comienza con la definición de tres factores adimensionales, planteados en secuencia y descritos en las ecuaciones (10), (11) y (13).

Estos factores adimensionales de la ETEC han sido diseñados para que su cálculo se base exclusivamente en los parámetros funcionales iniciales y en el parámetro de la función (H_{LF}). Todos estos valores provienen directamente de las mediciones realizadas en los taludes y representan relaciones entre cuatro pesos unitarios diferentes, aunque solo se utilizan dos de ellos (γ_a, γ_b) en el proceso.

$$L_{LF} = \left[\frac{H_{LD}}{a(L_{LD}^{(1/b)})} \right]^{b^{2+1}} \quad (10)$$

Se calculan los valores correspondientes a los parámetros ETEC con las siguientes ecuaciones:

$$H_{LF} = a(L_{LF})^b \quad (11)$$

$$\tan \beta_{LF} = \frac{H_{LF}}{L_{LF}} \quad (13)$$

Ecuación 38

$$S_a = \frac{\tau_L}{\sigma_{VL}} \quad (38)$$

$$S_a = \frac{F_1(b^b)}{F_3} \quad (17)$$

Ecuación 39

$$S_{ab} = \frac{\tau_{LB}}{\sigma_{VLB}} \quad (39)$$

Ecuación 40

$$S_{ab} = F_1(b^b) \quad (40)$$

$$P_a = b - S_a \quad (18)$$

Ecuación 41

$$\sigma_{VL} = \gamma_a \cdot H_{LF} \quad (41)$$

Ecuación 42

$$\sigma_{VL} = \left(\frac{a}{S_a}\right)^{\frac{1}{1-b}} \gamma_w \quad (42)$$

Ecuación 43

$$\sigma_{VLB} = \gamma_b H_{LF} \quad (43)$$

Ecuación 44

$$\sigma_{VLB} = \left(\frac{a}{S_{ab}}\right)^{\frac{1}{1-b}} \gamma_w \quad (44)$$

Ecuación 45

$$\tau_L = S_a \sigma_{VL} \quad (45)$$

Ecuación 46

$$\tau_{LB} = S_{ab} \sigma_{VLB} \quad (46)$$

Ecuación 47

$$\gamma_a = \frac{\sigma_{VL}}{H_{LF}} \quad (47)$$

Ecuación 48

$$\gamma_b = \frac{\sigma_{VLB}}{H_{LF}} \quad (48)$$

$$X_{LH} = (a)^{\frac{1}{1-b}} \quad (20)$$

Las ecuaciones anteriormente enunciadas para el desarrollo matemático de la ETEC se tomaron de la MTN descrita por Shuk [37].

Características de la ETEC

La ETEC, al ser la envoluta inicial dentro del SAMTN, es de gran importancia ya que constituye el fundamento para establecer los parámetros de las curvas hipotéticas que se examinarán posteriormente. De acuerdo con Shuk [37], cada ETEC presenta puntos específicos que definen propiedades clave:

1. El punto A se encuentra en la intersección de la curva que describe el esfuerzo de corte límite máximo τ_L con una línea generada a partir del producto entre el esfuerzo vertical límite superior σ_{VL} y un parámetro adimensional denominado S_a , que define la resistencia máxima al corte.
2. El punto T, con coordenadas (τ_T, σ_{VT}) , se encuentra siempre en cualquier envoluta potencial transformada de la función L vs H. Este punto posee exactamente las mismas coordenadas que los parámetros de caracterización (H_{LF}, L_{LF}) , multiplicadas por el peso unitario del agua γ_w . En términos físicos, el punto T representa el esfuerzo normal máximo y el esfuerzo de corte tangencial que actúan sobre la ETEC en un plano cuya inclinación coincide con la tangente del límite inferior de la función ($\tan \beta_{LF}$) y cuya longitud es igual a la altura límite superior (H_{LF}) .
3. El punto T corresponde al lugar donde se cruzan la envolvente inicial y cualquier envolvente potencial derivada de los esfuerzos cortantes basados en la misma combinación de datos $(H_{LF}$ y $L_{LF})$.

4. Una línea inclinada a 45° , que tiene como origen el punto de coordenadas $(0,0)$, corta la envolvente exactamente en el punto señalado en la Figura 6. Las proyecciones de este punto sobre los ejes horizontal y vertical están determinadas por la ecuación asociada a X_{LH} , coincidiendo con las distancias que describe la función potencial L frente a H. Adicionalmente, esta línea indica un peso unitario constante de $1.0 \text{ Ton} / \text{m}^3$, equivalente al peso del agua, en toda su longitud.
5. El parámetro γ_b , se utiliza para representar el peso unitario en cualquier ubicación dentro de la ETEC.

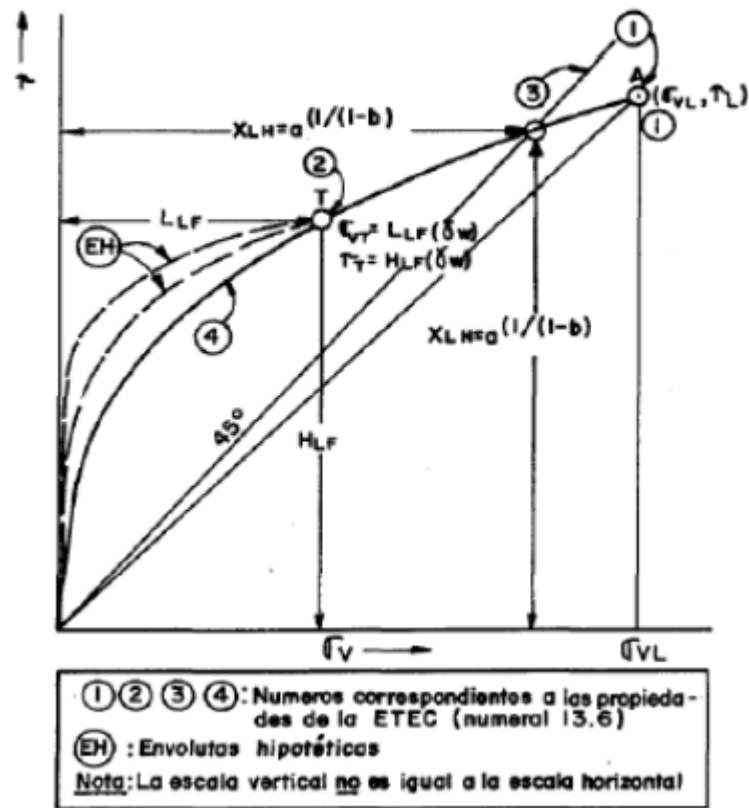


Fig. 6 Propiedades de la ETEC y envolventes hipotéticas del SAMTN.

Tomado de Shuk [2]

5.5.2 ENVOLVENTES HIPOTÉTICAS

Las llamadas envolventes hipotéticas se generan artificialmente a partir de escenarios teóricos, empleando un modelo matemático que integra parámetros fundamentales de la ETEC. Entre estos parámetros se encuentran aquellos relacionados con la presurización, los pesos unitarios y la resistencia

al corte. Estas envolventes tienen como objetivo simular condiciones comparables a las que se suelen observar en ensayos típicos realizados en laboratorios geotécnicos convencionales. De acuerdo con Shuk, la mayoría de estas envolventes hipotéticas pueden describirse mediante una fórmula potencial generalizada simple [2], expresada de la siguiente manera:

Ecuación 49

$$H_n = a_n L_n^{b_n} \quad (49)$$

Organización matricial de las envolventes hipotéticas

El arreglo matricial se compone de filas y columnas, con una nomenclatura consistente que identifica la ubicación de cada envoluta en la matriz. Las columnas, etiquetadas alfabéticamente a partir de la letra "A", están vinculadas a los parámetros funcionales derivados de la ETEC, como a , b , y otras funciones relacionadas. Las filas, por otro lado, corresponden a condiciones específicas de presurización, incluyendo escenarios como presurización positiva, negativa o de equilibrio (Figura 7).

Esta organización en el SAMTN es una representación estructurada que organiza las envolutas hipotéticas derivadas de la ETEC. Este esquema facilita el análisis de las propiedades geomecánicas de taludes naturales bajo distintas condiciones de presurización y resistencia, representando un marco analítico esencial para la metodología.

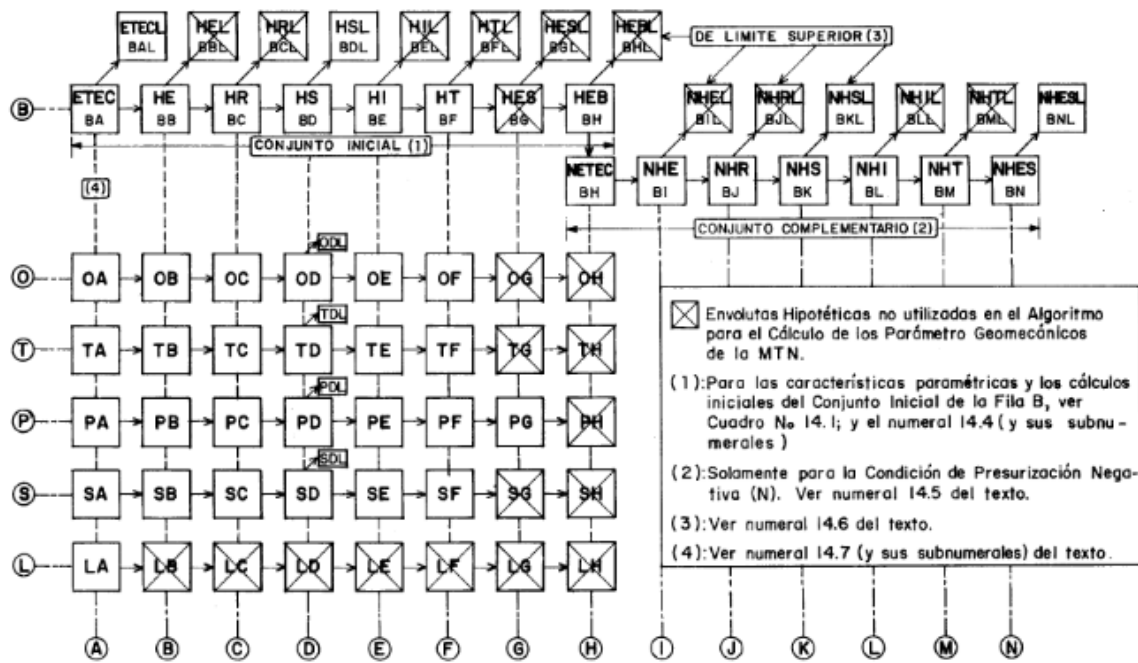


Fig. 7 Organización Matricial de la ETEC y del SAMTN.

Tomado de Shuk [2].

El procedimiento implica determinar los valores de los parámetros $L_{LNn}, H_{LNn}, \gamma_{an}, \gamma_{bn}$ relacionados a las condiciones hipotéticas de esfuerzos y presurización. Esto se logra aplicando la función potencial simple (ver ecuación 49) y siguiendo las especificaciones descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros iniciales de las envolventes hipotéticas de matricial del SAMTN

SUBINDICE ⁽²⁾	DESIGNACION	PARAMETRO ⁽³⁾ BASICOS	CALCULOS INICIALES ⁽³⁾
BĀ	ETĒC (Capítulo 13)	a, b	(Para el cálculo de todos los parámetros de la ETEC: Ecuaciones números 13.1 a 13.17 - numeral 13.3)
BB	HE De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s _a (14.4.1*)	(b) _{BB} = (s _a) _{BB} (p _a) _{BB} = 0	(B) (A) $a = (H_{LF})_n / (L_{LF})_n^{(b)_n}$
BC	HR De Referencia (14.4.2*)	(b) _{BC} = p _a	(A) (B): Iteraciones sucesivas de (b) _n y (F ₁) _n , hasta que: f [(b) _n , (F ₁) _n] = Ecuación No.13.23 (numeral 13.5) = 1.0, con base en (F ₁) _n = [(tanβ LF) _n] ^{(b)_n}
BD	HS Con Base en s _a (14.4.3*)	(b) _{BD} = s _a	(A) (C): Iteraciones sucesivas de (b) _{BD} y tanβ _{LF} hasta $(b)_{BD}^{(b)_{BD}} = \tan\beta_{LF}$
BE	HI De igualdad de Pesos Unitarios (14.4.4*)	(γ _a) _{BE} = γ b _{BE}	(C) (A) (D): Iteraciones sucesivas hasta que: Ecuación 13.23 (numeral 13.5) = b, y con el valor de (F ₁) _{BH} conocido:
BF	HT Con Base en tanβ _{LF} (14.4.5*)	(b) _{BF} = tanβ _{LF}	(A) $(a)_{BH} = [(F_1)_{BH}(L_{LF})_n^{1-b}]^{1/b}$ y: $(H_{LF})_{BH} = (a)_{BH}(L_{LF})_n^b$
BG	HES De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s _a (14.4.6*)	(b) _{BG} = (s _a) _{BG} (p _a) _{BG} = 0	(B) (A) Notas: n: subíndice generalizado para designar el subíndice de cualquier envoltura hipotética pertinente (Columna 1).
BH	HEB De equilibrio en b (14.4.7*)	(b) _{BH} = (s _a) _{BH} = b (p _a) _{BH} = 0	(D) F ₁ : Factor adimensional (Ecuación No.13.2, numeral 13.3)

Fuente: Tomado de la metodología de Shuk [2].

Envoluta Hipotética de Equilibrio (HE)-BB

Esta envoluta tiene como propósito principal simular condiciones geomecánicas específicas relacionadas con el equilibrio de materiales geológicos bajo ciertas configuraciones paramétricas. Esta envoluta se caracteriza por ser una representación aproximada del proceso de adaptación gradual de una masa geológica hacia un estado de equilibrio.

La envoluta HE está diseñada para modelar un estado de equilibrio en el cual los parámetros funcionales b y S_a de la ETEC alcanzan valores equivalentes a través de un proceso de aproximación gradual. El análisis de esta envoluta procede de la siguiente manera:

$$(P_a)_{BB} = 0$$

$$(L_{LF})_{BB} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BB} = (H_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BB} = (S_a)_{BB}$$

La ETEC está representada por el subíndice BA , tal como se muestra en la Tabla 3. A través de un proceso iterativo y de manipulación algebraica, se obtiene lo siguiente:

Ecuación 50

$$1 = (T^{1-T^b+b.T^b})(b^{2b-b^2-1}) \quad (50)$$

Donde $T = \tan \beta_{LF}$ es un valor conocido. Con esta relación, el valor de $(b)_{BB}$ se obtiene mediante iteraciones sucesivas. Usando la ecuación (11), se despeja el valor de $(a)_{BB}$.

Ecuación 51.

$$(a)_{BB} = \frac{(H_{LF})_{BB}}{[(L_{LF})_{BB}]^{(b)_{BB}}} \quad (51)$$

Envoluta Hipotética de referencia (HR) – BC

Esta envoluta fue diseñada para simular condiciones ideales que facilitan el estudio de la transición entre estados de presurización. Su importancia radica en ofrecer un marco conceptual que permite explorar configuraciones geométricas bajo parámetros funcionales controlados.

A continuación, se enumeran los parámetros clave asociados a esta curva hipotética de referencia:

$$\begin{aligned} (L_{LF})_{BC} &= (L_{LF})_{BA} \\ (H_{LF})_{BA} &= (L_{LF})_{BA} \\ (b)_{BC} &= (p_a)_{BA} \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación (11) se despeja el valor de $(a)_{BC}$:

Ecuación 52

$$(a)_{BC} = \frac{(H_{LF})_{BC}}{[(L_{LF})_{BC}]^{(b)_{BC}}} \quad (52)$$

Envoluta Hipotética con base en S_a (HS)– BD

La envoluta HS simula condiciones geomecánicas donde la resistencia del material es el factor determinante en la configuración geométrica. Este enfoque se centra en la interacción entre los parámetros funcionales y los límites de resistencia, ofreciendo una herramienta útil para explorar escenarios más realistas que otros modelos hipotéticos. El propósito de esta envoluta es modelar un estado en el que el parámetro funcional b es igual al parámetro S_a de la ETEC, lo que se expresa matemáticamente como: $(b)_{BD} = S_a$

A diferencia de la Envoluta Hipotética de Referencia (HR), el parámetro que define la configuración geométrica en este caso está completamente determinado por la resistencia, sin la influencia de la presurización.

$$(L_{LF})_{BD} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BD} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BD} = (S_a)_{BA}$$

Por medio de la ecuación (11) se despeja el valor de $(a)_{BD}$:

Ecuación 53

$$(a)_{BD} = \frac{(H_{LF})_{BD}}{[(L_{LF})_{BE}]^{(b)_{BD}}} \quad (53)$$

Envoluta Hipotética de igualdad de pesos unitarios (HI) – BE

Esta envoluta simula una condición específica en la que los pesos unitarios de los materiales geológicos alcanzan un estado de igualdad. Este modelo permite analizar cómo la variación de los parámetros funcionales influye en las configuraciones geométricas bajo un enfoque de equilibrio. El propósito de la envoluta HI es representar una condición en la que los pesos unitarios de los materiales, son equivalentes. Matemáticamente, esta igualdad se expresa como: $\gamma_a = \gamma_b$.

La aplicabilidad de esta envoluta está limitada a escenarios idealizados, y debe complementarse con modelos que incorporen mayor complejidad para abordar situaciones geomecánicas más dinámicas y variadas.

$$\begin{aligned}(L_{LF})_{BE} &= (L_{LF})_{BA} \\ (H_{LF})_{BE} &= (L_{LF})_{BA} \\ \gamma_a &= \gamma_b\end{aligned}$$

Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$0 = b^{\frac{1}{b}-T}$$

En este contexto, $T = \tan \beta_{LF}$, representa un valor derivado de los parámetros iniciales HH_{LF} y L_{LF} , los cuales definen límites clave en el modelo. A partir de esta relación, se establece un proceso iterativo para determinar el valor de $(b)_{BE}$ ajustándolo progresivamente hasta alcanzar la convergencia requerida. Posteriormente, con el valor de $(b)_{BE}$ obtenido, se procede al cálculo de $(a)_{BE}$ mediante una fórmula específica (ver ecuación 11), asegurando que ambos parámetros reflejen adecuadamente las condiciones iniciales y geométricas del sistema.

Ecuación 54

$$(a)_{BE} = \frac{(H_{LF})_{BE}}{[(L_{LF})_{BE}]^{(b)_{BE}}} \quad (54)$$

Envoluta Hipotética con base en $\tan \beta$ (HT) – BF

La envoluta HT simula una condición geomecánica donde la configuración geométrica de una familia de taludes está determinada exclusivamente por la resistencia, sin que la presurización tenga influencia en el sistema. Este modelo se basa en el parámetro funcional bb , que adopta el valor del $\tan \beta_{LF}$, derivado de los límites funcionales de la ETEC. El propósito de esta envoluta es explorar un escenario en el que la resistencia del material, representada por $\tan \beta_{LF}$, define completamente la geometría de la familia de taludes. Esto se expresa como:

$$\begin{aligned}(L_{LF})_{BF} &= (L_{LF})_{BA} \\ (H_{LF})_{BF} &= (L_{LF})_{BA} \\ (b)_{BF} &= \tan \beta_{LF}\end{aligned}$$

A partir de la ecuación (11) se despeja el valor de $(a)_{BF}$:

Ecuación 55

$$(a)_{BF} = \frac{(H_{LF})_{BF}}{[(L_{LF})_{BF}]^{(b)_{BF}}} \quad (55)$$

Envoluta Hipotética de equilibrio de aproximación gradual en S_a (HES) – BG

La HES fue diseñado para simular un proceso de equilibrio en el que el parámetro funcional b se aproxima al valor de S_a de manera gradual. Este enfoque permite analizar la evolución del material geológico hacia un estado de equilibrio bajo condiciones específicas de resistencia y configuración geométrica. El propósito de esta es modelar un estado de equilibrio donde los parámetros b y S_a convergen mediante un proceso iterativo.

Aunque esta envoluta es similar a la descrita en la HE, se diferencia por lo siguiente:

$$\begin{aligned} (L_{LF})_{BG} &= (\sigma_{VL})_{BA} \\ (H_{LF})_{BG} &= (\tau_{LF})_{BA} \\ (b)_{BG} &= (S_a)_{BG} \\ (P_a)_{BD} &= 0 \end{aligned}$$

Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$1 = (T^{1-T^b+b.T^b})(b^{2b-b^2-1})$$

En el contexto de la Envoluta Hipotética de Equilibrio de Aproximación Gradual en S_a (HES-BG), $T = (\tan \beta_{LF})_{BG}$ es un valor conocido que depende de los límites funcionales iniciales. A partir de esta relación, se calcula iterativamente el parámetro funcional $(b)_{BG}$, ajustándolo sucesivamente hasta que se cumplan las condiciones de equilibrio. Posteriormente, utilizando la ecuación 11, se despeja el valor de $(a)_{BG}$, completando así la caracterización paramétrica de la envoluta. Este procedimiento asegura que los parámetros reflejen las condiciones iniciales y la configuración geométrica del sistema.

Ecuación 56

$$(a)_{BG} = \frac{(H_{LF})_{BG}}{[(L_{LF})_{BG}]^{(b)_{BG}}} \quad (56)$$

Envoluta Hipotética de equilibrio b (HEB) – BH

Esta envoluta simula un estado geomecánico donde el parámetro funcional b converge al valor de S_a de la ETEC, alcanzando equilibrio sin variaciones geométricas significativas. Durante este proceso, la presurización se disipa completamente, mientras que la configuración geométrica de la masa permanece constante. La HEB se distingue de otras envolutas, como la HE, ya que aquí b se mantiene fijo en todo momento.

Este modelo es útil para analizar la estabilidad de taludes en condiciones ideales, donde la forma geométrica y la resistencia del material son los factores dominantes, permitiendo evaluar procesos de adaptación y equilibrio en materiales geológicos.

$$(b)_{BH} = (b)_{BA}$$

$$(S_a)_{BH} = (S_a)_{BA}$$

$$(L_{LF})_{BH} = (L_{LF})_{BA}$$

El valor de $\tan \beta_{LF}$ se aproxima a 1.0 Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$1 = (T^{1-T^b+b.T^b})(b^{2b-b^2-1})$$

En este contexto, $T = (\tan \beta_{LF})_{BH}$ representa un valor específico obtenido mediante un proceso iterativo que ajusta progresivamente los parámetros hasta alcanzar convergencia. Una vez determinado $(\tan \beta_{LF})_{BH}$, se utiliza la ecuación 11 para calcular el valor correspondiente de $(a)_{BH}$, completando así la parametrización necesaria para la envoluta.

Donde $T = (\tan \beta_{LF})_{BH}$ De esta igualdad se halla $(\tan \beta_{LF})_{BH}$ por iteraciones sucesivas. A partir de la ecuación (11) se despeja el valor de $(a)_{BH}$:

Ecuación 57

$$(a)_{BH} = \frac{(H_{LF})_{BH}}{[(L_{LF})_{BH}]^{(b)_{BH}}} \quad (57)$$

5.5.3 CONDICIONES DE PRESURIZACIÓN

La presurización y despresurización abarcan todos los efectos relacionados con la presión ejercida por el agua sobre los materiales geológicos, ya sea como una fuerza directa o actuando como un medio de transmisión.

La presurización positiva implica situaciones que comprometen la estabilidad de la masa, tales como presiones de filtración, acumulación de presión por encima del nivel freático o la superficie del terreno, y otros factores como eventos catastróficos previos, condiciones artesianas, bloqueos en la liberación de presión, deformaciones tectónicas menores o acumulación de gases a presión.

Por el contrario, la presurización negativa crea condiciones que pueden favorecer la estabilidad mediante presiones de succión. Sin embargo, esta aparente favorabilidad puede ser engañosa bajo ciertas circunstancias.

Se identifican las siguientes categorías dentro de las condiciones de presurización: casi equilibrio (CE), presurización negativa (N), presurización positiva (P), presurización positiva en exceso disipada (PED) y presurización positiva en exceso activa (PEX). Cada una de estas condiciones requiere cálculos específicos para determinar los parámetros geomecánicos relacionados con la presurización.

$$HN: -X_{LH} ETEC$$

$$HP: \left(\frac{-HN}{a} \right)^{\left(\frac{1}{b} \right)}$$

$$HNT: HN + HP$$

$$\%HP: \left(\frac{HP}{H_{LF}} \right) * 100$$

$$\%HNT: \left(\frac{HNT}{H_{LF}} \right) * 100$$

Donde:

HN: Cabeza neta negativa

HP: Cabeza neta positiva

%HP: Cabeza neta positiva al 100%

%HPT: Cabeza neta al 100%

HNT: Cabeza neta

Presurización negativa N

La presurización negativa se caracteriza por presentar el valor más alto de cohesión traccional en comparación con otras condiciones de presurización. La cohesión se reduce progresivamente en el siguiente orden: presurización negativa (N), presurización en equilibrio (CE-P) y presurización positiva en exceso (PE). Este tipo de presurización indica que la familia analizada está ubicada en áreas donde ocurren procesos geotécnicos relacionados con fenómenos de solevantamiento.

Las condiciones que favorecen la aparición de esta presurización incluyen factores específicos del entorno y los procesos geomecánicos asociados.

$$\begin{aligned} b &< S_a \\ S_a &< \tan \beta_{LF} \\ (P_a)_r &< 0 \end{aligned}$$

Presurización positiva P

Este tipo de presurización señala la existencia de presiones de filtración.

Las condiciones necesarias para que se presente este tipo de presurización son:

$$\begin{aligned} b &> S_a \\ S_a &< \tan \beta_{LF} \\ (P_a)_r &< 0 \end{aligned}$$

Presurización positiva Cuasi – Equilibrio CE

Esta condición representa un estado de equilibrio entre las fuerzas de presurización y resistencia, siendo la forma de presurización menos común en la naturaleza. Surge en el instante preciso de transición entre una condición de presurización negativa y positiva, o en el cambio inverso.

$$b \approx S_a$$
$$S_a < \tan \beta_{LF} < 1.0$$
$$(P_a)_r \approx 0$$

Presurización Positiva en Exceso (PE)

Este fenómeno se relaciona con materiales ubicados en zonas afectadas por eventos extremos, como desastres naturales o condiciones de artesianismo. Se distinguen dos escenarios: uno donde la presión acumulada excede los límites críticos y otro donde dicha presión ha sido liberada. El proceso se divide en las siguientes fases:

1. **Fase inicial de equilibrio previo:** Representa el momento en el que los materiales aún se encuentran en un estado de equilibrio, pero comienzan a manifestarse los primeros indicios de acumulación de presurización.
2. **Fase de aumento de presurización positiva:** Durante esta etapa, la presión dentro del material crece sin experimentar alivio alguno. Este incremento, conocido como "bloqueo del alivio de presurización", reduce la resistencia del material. Si la presión acumulada supera la resistencia efectiva, puede desencadenar un colapso o evento crítico.
3. **Fase de liberación de presurización positiva:** Después de un evento crítico, se inicia el proceso de disipación de la presión acumulada. Este proceso puede variar en duración, desde periodos relativamente breves hasta prolongados, y es detectado mediante análisis geotécnicos. Factores como sismos, cambios en los niveles freáticos, erosión en la base de los taludes, debilidades estructurales o represamientos súbitos pueden desencadenar este fenómeno.

Este modelo permite comprender las distintas etapas de la presurización positiva en exceso y su efecto sobre la estabilidad geomecánica.

Presurización en exceso disipada (PED)

Para este tipo de presurización se cumple con las condiciones 1, 2 y 3 de presurización PE.

$$\begin{aligned} b &> S_a \\ S_a &> \tan \beta_{LF} \\ (P_a)_r &< 0 \end{aligned}$$

Presurización en exceso activa (PEX)

Para este tipo de presurización se satisfacen las condiciones 1, y 2 asociadas a la presurización PE. La PEX se diferencia de la PED debido a que está definida por el valor de P_a en la envoluta HR, y debe cumplir con los siguientes criterios:

$$\begin{aligned} b &> S_a \\ S_a &> \tan \beta_{LF} \\ (P_a)_r &> 0 \end{aligned}$$

Límite máximo del valor de parámetro adimensional de presurización

Según Shuk [37], el valor máximo permitido para P_a en la ETEC se encuentra limitado por un cálculo específico definido mediante una ecuación que establece dicho umbral. Este límite asegura que los valores de P_a permanezcan dentro de un rango considerado como funcionalmente estable, evitando resultados que puedan comprometer la consistencia del análisis geomecánico. Este parámetro de presurización se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$(P_a)_1 = \frac{(b+1)}{(b+2)} \quad (19)$$

Este valor define el límite máximo permitido para que la familia de taludes pueda clasificarse dentro de parámetros aceptables. Superar este umbral implicaría condiciones geomecánicas inestables, comprometiendo la integridad del sistema y su capacidad de ser analizado bajo los criterios establecidos en el modelo.

5.5.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Las condiciones hipotéticas de las envolutas y la ETEC sirven como base para calcular los parámetros geomecánicos de densidad, fase y resistencia [2].

Parámetros de densidad y fase

Los parámetros geomecánicos de densidad y fase comprenden un conjunto de 31 variables relacionadas con las propiedades físicas de los materiales geológicos. Estas propiedades, que coinciden ampliamente con las contempladas en la microgeotecnia, permiten caracterizar las cuatro fases presentes en una masa geológica: sólidos, agua, vacíos del elemento constitutivo y fracturas en la masa. Su clasificación se divide en tres categorías principales: masa de materiales geológicos, suelo derivado y caracterización de la masa, cada una abordando diferentes aspectos de análisis y descripción de las propiedades físicas.

En la masa de materiales geológicos, se incluyen 23 parámetros, como el peso específico, peso unitario seco, porosidad primaria, contenido de humedad y grado de saturación, entre otros. La categoría de suelo derivado introduce seis parámetros que hipotéticamente permiten estimar propiedades del suelo generado a partir de una masa rocosa, según ciertas relaciones establecidas en la metodología MTN, aunque su algoritmo de cálculo está en revisión. Por último, la caracterización de la masa se centra en dos parámetros diseñados para evaluar el deterioro y desagregación de masas rocosas, ofreciendo una herramienta para medir el impacto de procesos degradativos en su estructura geológica.

Cálculo de propiedades geomecánicas

El cálculo de los parámetros de resistencia se inicia determinando el origen de los esfuerzos verticales $Eoc\sigma$ y el esfuerzo libre $\tan \varphi_r$.

Esfuerzos verticales $Eoc\sigma$

Los esfuerzos verticales representan un ajuste en el origen de coordenadas, necesario para determinar los valores de los parámetros geotécnicos que se abordarán en esta sección. Estos cálculos se basan en los resultados obtenidos de la ETEC.

Ecuación 58

$$\sigma_{vom} = L_{LF} \left(\frac{\gamma_{Tmasa} - \gamma_a}{\gamma_a} \right) \quad (58)$$

Ecuación 59

$$\sigma_{voe} = L_{LF} \left(\frac{\gamma_{Tmasa} - \gamma_a}{\gamma_a} \right) \quad (59)$$

Esfuerzo libre tan φ_r

El esfuerzo libre tan φ_r se calculó utilizando la relación lineal entre los parámetros P_a y tan φ_r de las envolutas ETEC, HE, HR, HS, y HI.

Ángulo de fricción residual φ_r

La constante a asociada al valor de $\tan \varphi_{ra}$, que representa el ángulo de fricción residual bajo condiciones específicas del elemento. En las rocas, este ángulo refleja un estado en el que la resistencia del material ha disminuido al nivel residual debido al debilitamiento progresivo. Esto ocurre cuando tanto la resistencia a la tracción del material cementante, que conecta las caras de la roca, como la resistencia intrínseca de la roca alcanzan su límite máximo de esfuerzo, como se observa en la Figura 8. En este estado, la cohesión es nula ($C = 0$) [41].

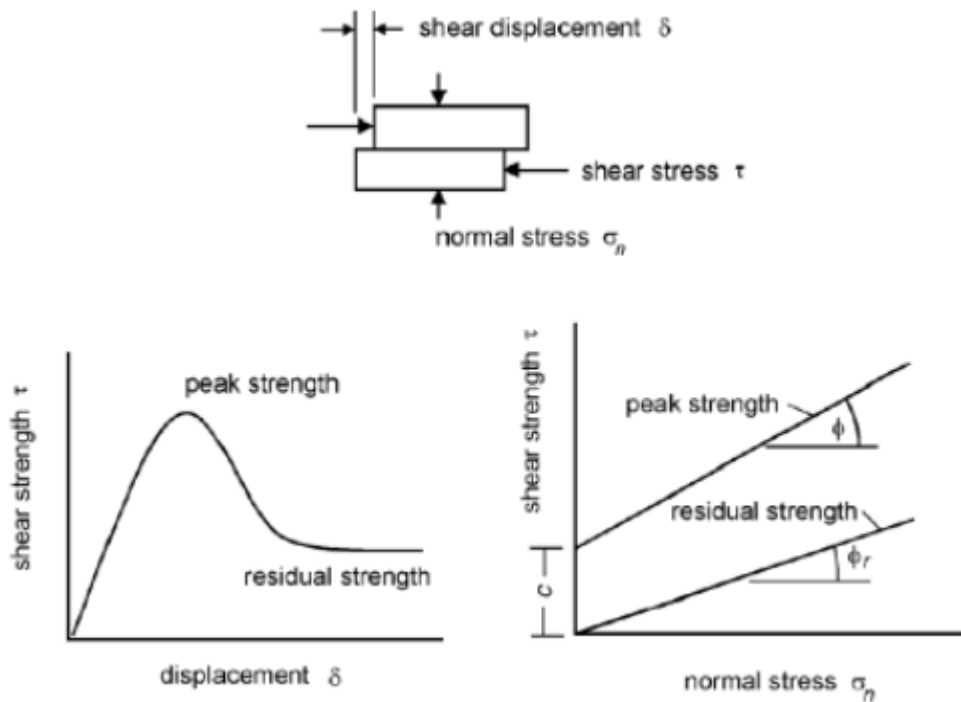


Fig. 8 Ensayo de cizallamiento de discontinuidades.

Tomado de Shuk [2].

Su valor se deduce del valor de la constante de la relación lineal de los parámetros P_a y $\tan \varphi_r$ de las envolutas ETEC, HE, HR, HS, y HI.

Ecuación 60

$$\tan \varphi_{rm} = \frac{\tan \varphi_{re}(L_{LF} - \sigma_{voe})}{(\sigma_{VL} - \sigma_{vom})} \quad (60)$$

Cohesión traccional C_t

La cohesión traccional se define como la fuerza que mantiene unidas las partículas dentro de la estructura de la masa sin intervención de presión de confinamiento. Según Shuk este tipo de cohesión conserva entre un 10% y un 20% de su valor incluso bajo condiciones de presurización positiva máxima, manteniendo esta proporción cuando la presurización es cero [2]. Esto permite establecer cuatro categorías temporales, que serán abordadas en la siguiente sección dedicada al factor de seguridad.

El cálculo de la cohesión traccional involucra las variables σ_{vo} , σ_{VL} , τ_L y S_a como se muestra en la Figura 9. La diferenciación entre las condiciones de masa y de laboratorio se efectúa por medio de un traslado del origen de coordenadas σ_{vo} .

La Figura 9 presenta un caso típico de una masa con presurización positiva, donde los parámetros de resistencia obtenidos en laboratorio son mayores que los observados en la masa real. En contraste, bajo condiciones de presurización negativa, los valores de resistencia de laboratorio tienden a ser menores que los de la masa.

Por medio de relaciones de triángulos se determinan la cohesión traccional c_t

Ecuación 61

$$\tau_L = S_a * \sigma_{VL} \text{ como: } C_{tm} = S_a * \sigma_{Vom} \text{ (61)}$$

Ecuación 62

$$\tau_L = S_a * \sigma_{VL} \text{ como: } C_{tm} = S_a * \sigma_{Voe} \text{ (62)}$$

Cohesión por imbricación estructural o entrabamiento C_i

En este tipo de cohesión, bajo condiciones de presurización positiva, su valor generalmente varía de medio a bajo. A medida que la presurización positiva aumenta, la cohesión tiende a reducirse hasta alcanzar valores cercanos a cero.

Ecuación 63

$$C_{im} = (a * \sigma_{vom}^b) - C_{tm} \quad (63)$$

Ecuación 64

$$C_{ie} = (a * \sigma_{voe}^b) - C_{te} \quad (64)$$

Ángulo de fricción pico φ_p

La condición del ángulo de fricción pico representa un estado en el que la roca aún no ha alcanzado su fase de ablandamiento, preservando así todas sus características estructurales.

Ecuación 65.

$$\tan \varphi_{pm} = \frac{(H_{LF} - C_{tm})}{(L_{LF} - \sigma_{vom})} \quad (65)$$

Ecuación 66.

$$\tan \varphi_{pe} = \frac{(H_{LF} - C_{te})}{(L_{LF} - \sigma_{voe})} \quad (66)$$

Altura crítica H_o

La altura crítica representa la altura máxima vertical para un talud con un factor de seguridad igual a 1 [2].

Ecuación 67.

$$H_{om} = \frac{\sigma_{vom}}{\gamma_{Tm} Pa} \quad (67)$$

Ecuación 68.

$$H_{oe} = \frac{\sigma_{Voe}}{\gamma_{Te} Pa} \quad (68)$$

Porosidad Ru

La porosidad es el volumen de espacios vacíos en el volumen total de la roca

Ecuación 69.

$$Ru_{max} = \frac{\frac{\%HPP}{\gamma_{seco}}}{100} \quad (69)$$

La porosidad promedia se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 70.

$$Ru_{max} = \frac{\frac{\%HNT}{\gamma_{seco}}}{100} \quad (70)$$

Parámetros efectivos

En la geotecnia convencional, los parámetros efectivos se obtienen mediante ensayos de corte en condiciones drenadas, siendo esta la condición más crítica para el diseño de obras civiles. Estos parámetros incluyen el ángulo de fricción residual, el ángulo de fricción pico y la cohesión, y se calculan considerando que el esfuerzo vertical ha sido ajustado en función de la porosidad.

Ecuación 71.

$$\frac{(\tan \varphi_{pm})}{(1-Ru_{pr})} \quad (71)$$

Ecuación 72.

$$\frac{(\tan \varphi_{rm})}{(1-Ru_{pr})} \quad (72)$$

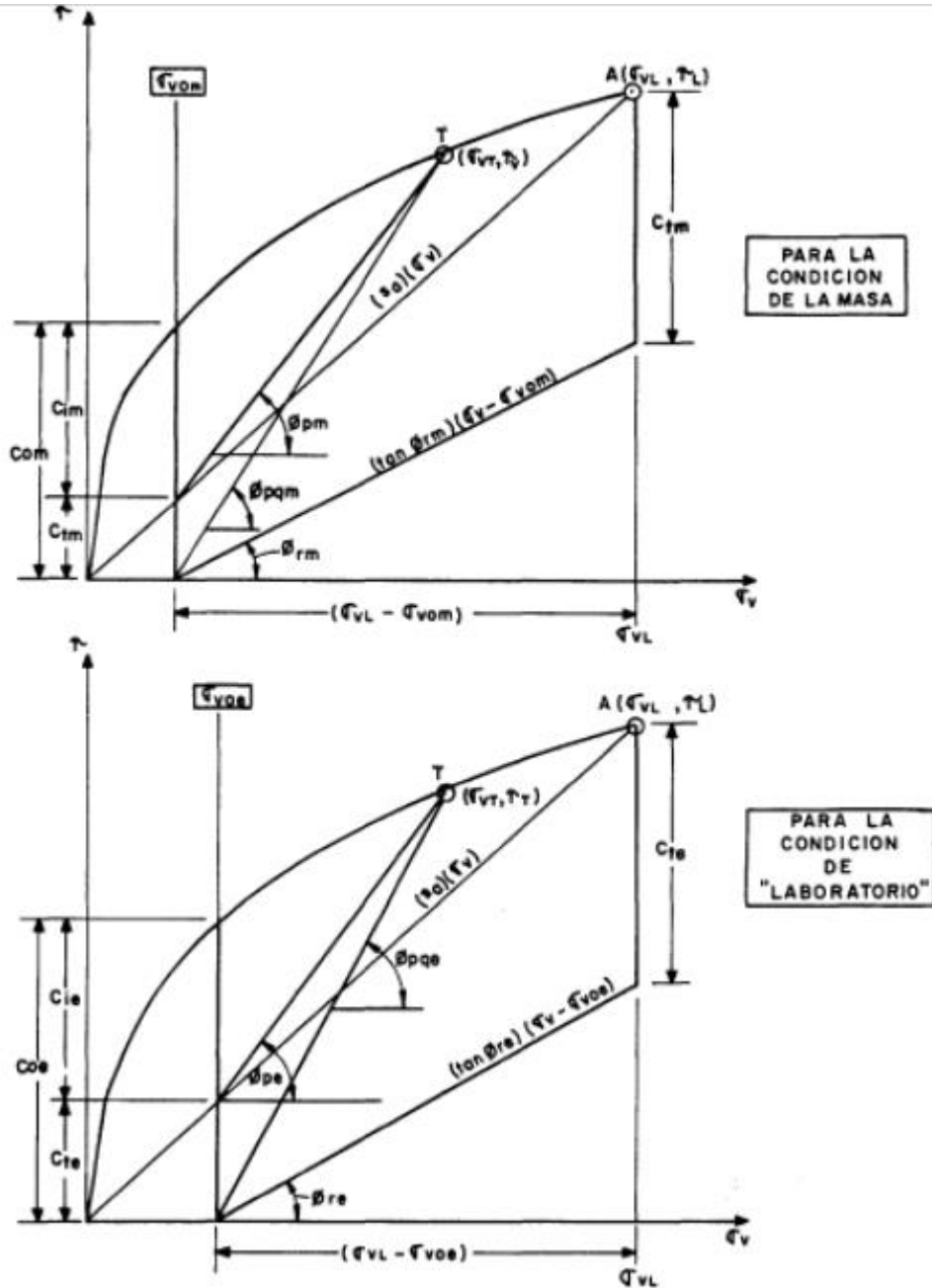


Fig. 9 Relaciones entre Parámetros Geomecánicos de Resistencia en Masa y Laboratorio.

Tomado de Shuk [2]

5.6 FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FSr)

En el presente estudio de caso se planteó como objetivo específico 2 *identificar los sectores susceptibles a movimiento en masa en la vereda el Vallano*. Por lo tanto, este parámetro es clave para determinar los FSr asociados al deslizamiento por temporalidad, según: largo plazo, mediano plazo y corto plazo, aplicados a la zona previamente delimitada en el municipio de Envigado. Esta evaluación de estabilidad se llevó a cabo exclusivamente utilizando la metodología MTN.

Según Shuk, el término "relativo" hace referencia al hecho de que esta estimación se basa en la comparación entre dos parámetros del mismo tipo: uno correspondiente al nivel de familia y otro que representa el promedio de un nivel superior de referencia (subpoblación, población o universo). Este enfoque no considera la geometría específica de la familia ni el plano crítico de falla asociado [2]. Además, Shuk explica que las familias de taludes naturales mantienen un equilibrio entre los esfuerzos endógenos y exógenos aplicados por la naturaleza [2].

Para calcular el FSr, se utiliza una relación entre dos alturas: el numerador representa la altura del objeto de análisis H_{LD} , mientras que el denominador corresponde a la altura calculada a partir de la función potencial simple $H = aL^b$. Esta relación se ajusta, por lo general, a la tendencia de las pendientes promedio observadas en los niveles de referencia superiores (población o universo) [2].

La Figura 10 clasifica el tiempo en cuatro categorías en función de tres tipos de cohesión: la cohesión traccional de la masa (C_{tm}) para el mediano plazo (MP), la cohesión total de la masa (C_{om}) para el corto plazo (CP), y la cohesión traccional en condiciones de laboratorio (C_{te}) para el muy corto plazo (MCP).

La duración de la temporalidad de (LP, MP y CP) puede estimarse mediante un análisis que incluye factores como los períodos de retorno de lluvias intensas, la actividad sísmica y otros elementos climáticos. Según Shuk [2], para la cordillera oriental, caracterizada por alta lluviosidad y actividad sísmica, los tiempos estimados de estabilidad de taludes son: LP entre 40 y 50 años, MP entre 16 y 35 años, y CP entre 4 y 8 años. Estos valores deben ajustarse según las condiciones ambientales específicas de la zona de estudio. No obstante, los factores de seguridad relativos al deslizamiento (FSr) evaluados en este informe se restringen a procesos gravitacionales, es decir, para verificar taludes susceptibles al deslizamiento exclusivamente bajo la acción de la gravedad.

Los cálculos del FSr varían entre dos categorías de análisis: talud de diseño y estudios regionales.

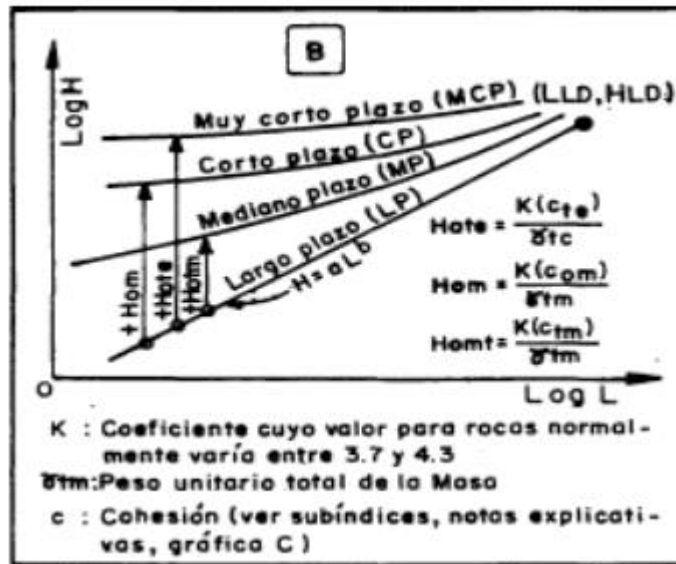


Fig. 10 Curvas de Estabilidad Límite (FS = 1).

Tomado de Shuk [2]

5.6.1 TALUD DE DISEÑO

El análisis de los parámetros de estabilidad para esta categoría se basa en la estimación de una altura conocida y, mediante las relaciones matemáticas ilustradas en la Figura 11, se determina dicha altura para alcanzar un factor de seguridad (FS) superior a 1.0. Este factor de seguridad es comparable con el obtenido a través de métodos tradicionales de estabilidad de taludes.

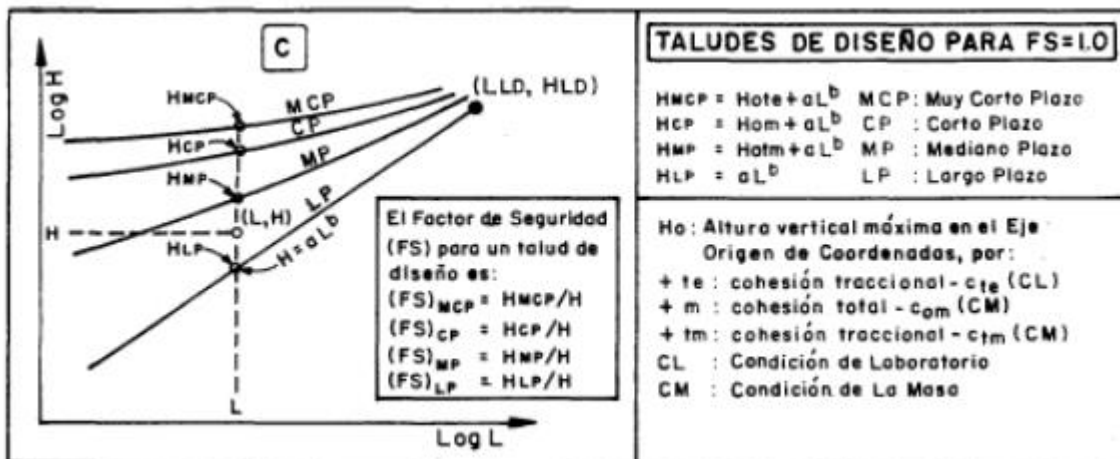


Fig. 11 Factor de seguridad relativo (Fsr) en taludes de diseño según el tiempo.

Tomado de Shuk [2].

5.6.2 ESTUDIOS REGIONALES

El propósito de estos estudios es localizar geográficamente las áreas con mayor vulnerabilidad a deslizamientos. En este enfoque, el criterio de estabilidad establece que, para taludes naturales, un incremento en la altura está relacionado con un aumento en el factor de seguridad, lo que implica una mayor resistencia (Figura 12).

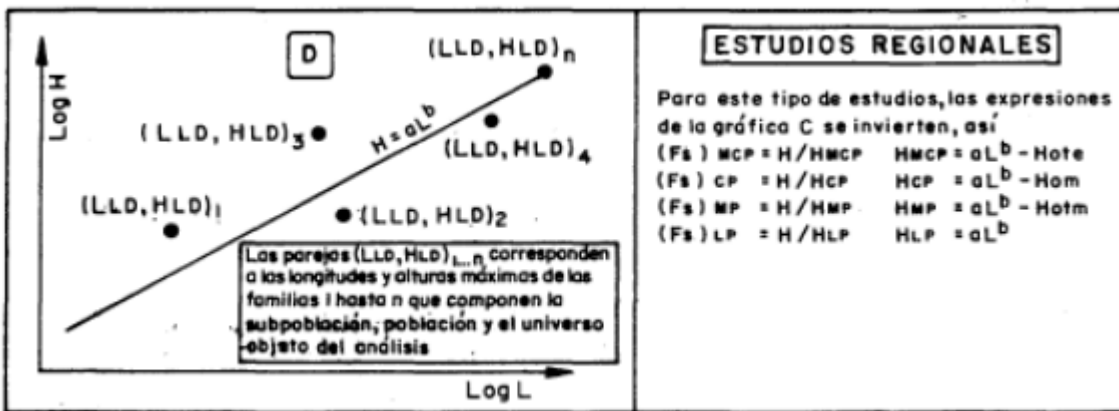


Fig. 12 Factor de Seguridad Relativo (Fsr) en Estudios Regionales Según el Tiempo.

Tomado de Shuk [2]

5.7 ENFOQUE METODOLÓGICO PARA RECOMENDACIONES DE BIOINGENIERÍA EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES NATURALES

Para alcanzar el objetivo específico 3 “*realizar recomendaciones de técnicas de bioingeniería para la estabilización de los taludes naturales identificados con alta susceptibilidad al aplicar la MTN*”, se adoptó un enfoque metodológico basado en la recopilación y análisis de información secundaria. Inicialmente, se realizó una revisión de literatura científica y técnica sobre técnicas de bioingeniería aplicadas a la estabilización de taludes, priorizando estudios realizados en contextos topográficos, geológicos y climáticos comparables al área de interés.

La revisión bibliográfica fue complementada con la consulta de informes técnicos, y manuales de buenas prácticas en bioingeniería, lo que permitió seleccionar técnicas que combinaran soluciones estructurales y vegetativas con un enfoque sostenible. Se evaluaron métodos como el uso de especies vegetales nativas con alta capacidad de retención de suelo, la instalación de estructuras temporales de protección contra la erosión, y la implementación de sistemas integrados de bioingeniería que refuercen la estabilidad del terreno.

La identificación de taludes susceptibles a deslizamientos se realizó mediante la MTN de acuerdo a las etapas previamente descritas. Con base a esta identificación, se realizaron recomendaciones específicas de bioingeniería que se ajustan a los parámetros identificados, como la pendiente, el tipo de suelo y el grado de susceptibilidad. Las recomendaciones propuestas detallan las técnicas de bioingeniería sugeridas, sus condiciones de aplicación y las ventajas de cada una en términos de efectividad y sostenibilidad. Este documento proporciona un procedimiento práctico para la implementación de estrategias de estabilización que no solo mejoren la estabilidad de los taludes, sino que también contribuyan a la conservación ambiental y al manejo sostenible del área de estudio.

5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos se integraron en un modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante la MTN. El análisis permitió no solo identificar áreas de alta susceptibilidad, sino también comprender las interacciones entre los factores topográficos, geológicos y climáticos que inciden en la inestabilidad del terreno. Estos resultados fundamentaron las recomendaciones sobre bioingeniería.

6 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA MTN PARA EL CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describen los resultados de la MTN implementada en el presente estudio, cada una enfocada en la recopilación y análisis de datos necesarios para evaluar la estabilidad de los taludes en la vereda El Vallano sector Astilleros, Municipio de Envigado, Antioquia-Colombia.

Es importante destacar que los resultados presentados a continuación corresponden específicamente a la familia de talud número 2, empleada como caso práctico para aplicar la metodología propuesta por Shuk [2] en el caso de estudio. Para obtener información detallada sobre las demás familias de taludes, se recomienda consultar los Anexos.

6.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN

Los resultados obtenidos en esta sección se fundamentan en los procedimientos descritos en el numeral 5.1 de la metodología, específicamente en las subsecciones 5.1.1 y 5.1.2, donde se detalla la información secundaria necesaria para la ejecución de la MTN.

Esta sección aborda específicamente los resultados para el alcance del objetivo específico 1, que consistió en *“analizar las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en las áreas críticas de la vereda el Vallano del Municipio de Envigado, Antioquia, Colombia”*.

De este modo, se presenta un análisis detallado de los factores geomorfológicos, climáticos e hidrológicos que impactan la estabilidad de los taludes, así como los datos requeridos para evaluar la interacción entre estas condiciones y las características propias del terreno en las áreas identificadas como críticas. Esto permite una comprensión integral de las variables que contribuyen a la susceptibilidad a movimientos en masa en el contexto estudiado.

6.1.1 TOPOGRAFÍA DE LA VEREDA EL VALLANO

La primera etapa del estudio se centró en un análisis detallado de la topografía, en la cual se describen las características físicas del terreno (ver numeral 5.1.1). Con esta información se obtuvo la representación gráfica y cartográfica de la vereda El Vallano sector Astilleros, ubicada en la zona rural del Municipio de Envigado, Antioquia (Figura 13).

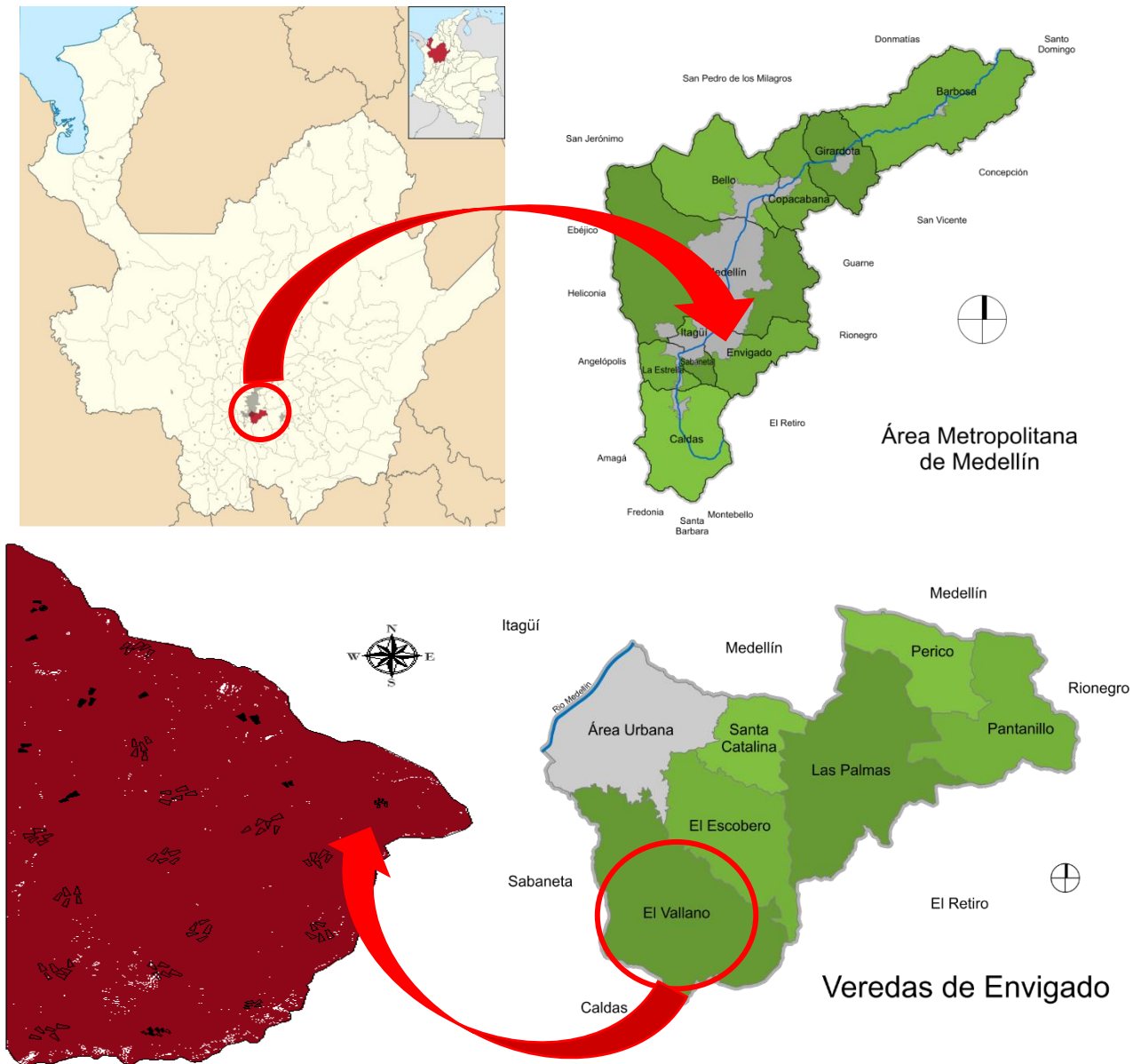


Fig. 13 Localización de la vereda El Vallano, sector Astilleros, Municipio de Envigado, Antioquia (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) con curvas de nivel cada metro.

Tomado de Sajo R [42].

El Valle de Aburrá es un valle intramontañoso profundo y relativamente estrecho, que atraviesa un sistema de superficies de erosión o altiplanos y conforma los rasgos geomorfológicos más destacados de la parte norte de la cordillera Central. Este valle abarca un área de 1152 km² y se extiende a lo largo de 65 km [43]. Arias, lo define morfológicamente como una depresión con orientación sur-norte y fondo plano, ubicada en la parte alta de la cordillera Central, limitada por flancos laterales inclinados en roca, cubiertos en su base por flujos de lodo [44].

La altitud del fondo del valle varía entre 1000 y 3000 msnm en dirección a su origen, alcanzando sectores de hasta 3200 msnm, lo cual representa el rasgo morfológico más destacado en el norte de la cordillera Central colombiana. La ladera oriental del valle de Aburrá, donde se sitúa la zona de estudio, presenta tres zonas geomorfológicamente diferenciadas: un nivel de altiplano en la parte superior, un escarpe erosivo que caracteriza la pendiente y un segmento de valle en el fondo. Entre las geoformas principales se encuentran un escarpe principal, seguido de una serie de lomos que descienden hacia el valle, superficies medias y suaves de depositación con diversos niveles de incisión. En la parte baja, destacan varios abanicos aluviales, sistemas de terrazas del río Medellín y geoformas suaves de depósitos aluviales y aluviotorrenciales (Figura 14).

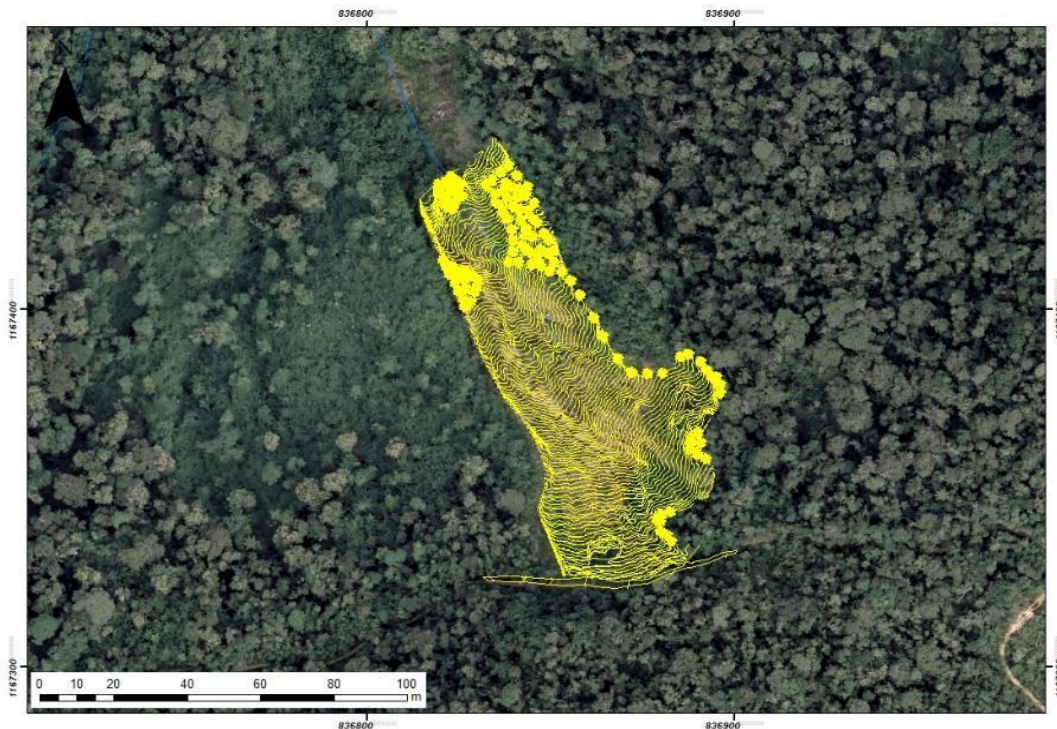


Fig. 14 Topografía del sector.

6.1.2 GEOLOGÍA DE LA VEREDA EL VALLANO

Los resultados referentes a la geología están fundamentados en la información detallada en la sección 5.1.2 de la metodología. A continuación, se describe los resultados obtenidos.

El municipio de Envigado se localiza en el flanco occidental de la Cordillera Central de los Andes Colombianos, compuesta por un basamento polimetamórfico pre-Mesozoico que incluye rocas oceánicas y continentales, con edades que varían desde el Precámbrico hasta el Cretáceo. Este basamento ha experimentado al menos cuatro eventos metamórficos, formando una faja de alto grado de metamorfismo en la zona central, incluyendo las anfibolitas de Medellín y las granulitas de El Retiro, rodeadas de cinturones con metamorfismo de grado menor (esquistos y gneises), (Figura 15).

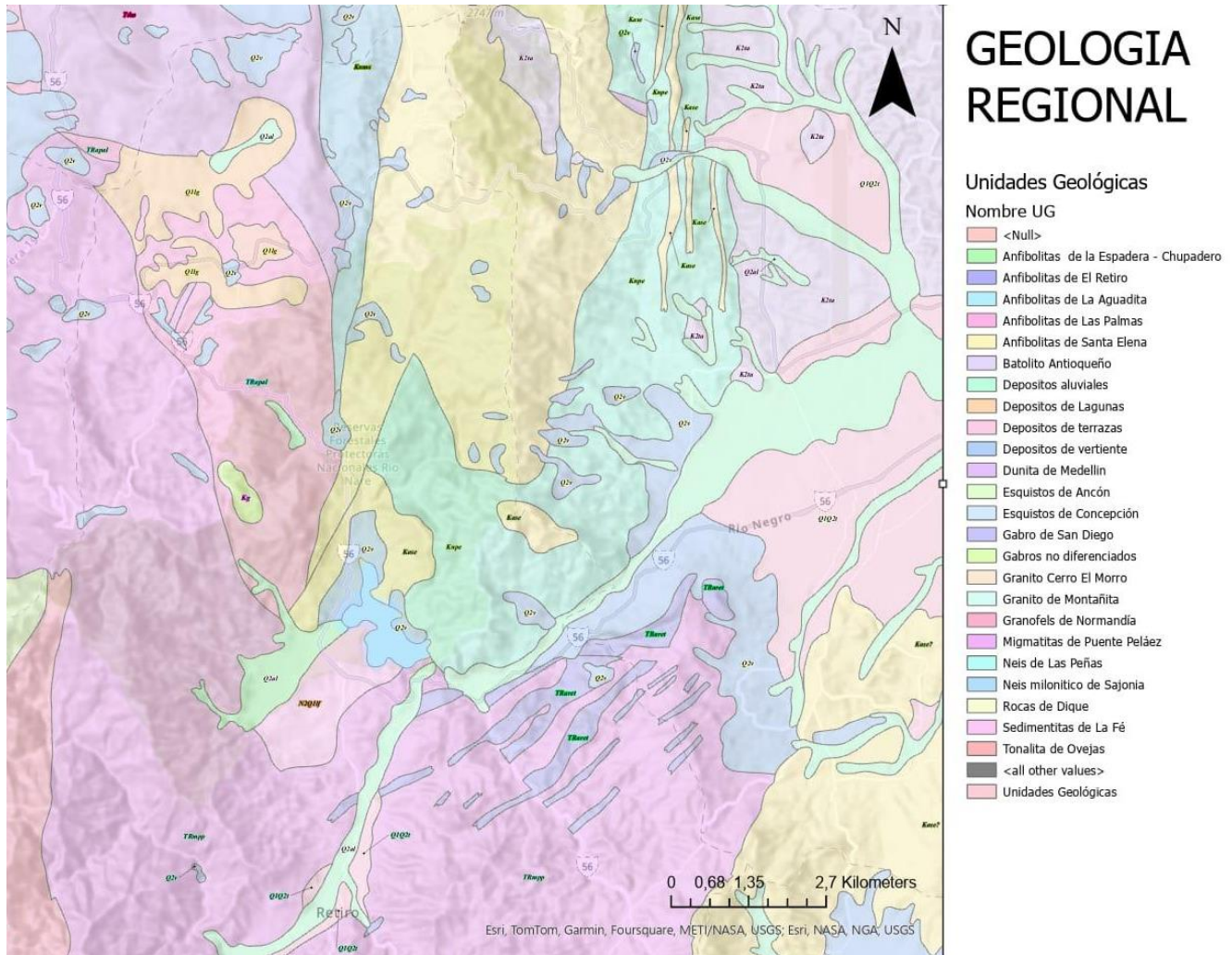


Fig. 15 Plancha de geología local.

Tomado de Gómez-Tapias et al., [45]

El flanco este de la cordillera se compone principalmente de rocas ígneas y metamórficas, extendiéndose hacia el Valle Medio del Magdalena y cubiertas por rocas sedimentarias de edades jurásicas a terciarias.

Las rocas metamórficas han sido objeto de estudio desde principios del siglo XX, clasificándose como parte del Grupo Ayurá-Montebello. En 1973, Echeverría-Ramírez, distinguió entre la Zona Montebello (rocas de bajo grado) y la Zona Ayurá (rocas de alto grado) [46].

La cordillera se elevó durante el Mioceno en un proceso conocido como Orogenia Andina, generando geoformas jóvenes y erosión intensa. En la región se encuentran tanto rocas metamórficas e ígneas como depósitos recientes.

Las rocas metamórficas son una de las principales unidades geológicas en el municipio de Envigado, y se encuentran principalmente en el costado oriental del Valle de Aburrá. Entre ellas destacan:

1. **Esquistos Negros:** Pertenecen al Complejo Cajamarca.
2. **Anfibolitas:** Se encuentran en tres cuerpos, principalmente en el sector oriental y en la vía Las Palmas-El Retiro.
3. **Migmatitas:** Pertenece al Grupo El Retiro.
4. **Gneises Miloníticos:** Forman parte de la unidad Gneis de Sajonia.

Migmatitas y Gneises: Esta unidad se halla a lo largo de la vía Las Palmas y en la quebrada La Miel. Presenta texturas anatexicas debido a intrusiones de cuerpos porfídicos, lo que ha alterado localmente su textura. Los suelos son residuales, amarillos y rojizos, con un espesor de aproximadamente tres metros, mostrando un bandeamiento heredado de la roca parental.

Esquistos: Comprenden rocas metamórficas de grado medio, como esquistos cuarzo sericiticos y verdes, caracterizados por su composición mineral. Los esquistos negros predominan en micas oscuras, mientras que los verdes contienen clorita y epidota. En la cuenca de la quebrada La Ayurá, predominan los horizontes IV, V y VI, con suelos limosos ricos en mica.

Anfibolitas: Estas rocas de color verde oscuro presentan texturas variables y se encuentran en tres cuerpos principales. Los perfiles de meteorización son moderadamente gruesos, destacando los horizontes VI, V, IV y II, y muestran contactos con gneises y dunitas en la parte oriental.

Geología Local Vereda El Vallano sector Astilleros, Municipio de Envigado Antioquia-Colombia

La zona de estudio se sitúa en la zona rural del municipio de Envigado, al suroriente del valle de Aburrá, y se caracteriza por su geología compleja, principalmente compuesta de rocas metamórficas, específicamente gneis. Estas rocas presentan texturas en bandas debido a procesos de metamorfismo provocados por altas presiones y temperaturas, lo que genera la orientación de los cristales y la formación de nuevos minerales.

Las rocas identificadas incluyen gneis cuarzo-feldespático, gneis biotítico anfibólico y gneis micáceo, con la moscovita como mineral transversal predominante. Algunas rocas presentan características mono mineral debido a la presencia de feldespato y moscovita, aunque no se encontraron afloramientos rocosos directos de estos bloques.

La cobertura de estas rocas incluye depósitos de vertiente, suelos residuales y saprolitos, resultantes de procesos de meteorización física y química. La meteorización física no altera la mineralogía de las rocas, mientras que la química puede transformar minerales originales en nuevos. En el área, se encuentran saprolitos y suelos residuales, clasificados según el grado de meteorización.

El saprolito conserva características texturales de las rocas originales, mientras que el suelo residual presenta transformaciones significativas, destacándose minerales como biotita y anfíboles que aportan coloraciones oscuras a la superficie. La profundidad de las rocas no alteradas se estima en menos de 9 metros, con algunas áreas mostrando afloramientos.

Geomorfología General Municipio de Envigado Departamento de Antioquia-Colombia

El valle de Aburrá es una depresión intra montaña estrecha, ubicada en la parte alta de la Cordillera Central de Colombia. Su fondo es relativamente plano y se extiende en dirección sur-norte, con límites laterales empinados formados por rocas y flujos de lodos en la parte baja. Las altitudes del fondo del valle varían entre 1,000 y 3,200 msnm, siendo este último el rasgo morfológico más notable en la región.

En la ladera oriental del valle, donde se encuentra la zona de estudio, se identifican tres áreas geomorfológicas clave:

1. **Altiplano Superior:** La parte más elevada de la ladera.
2. **Escarpe Erosivo:** Un borde que delimita la ladera.
3. **Segmento de Valle:** El fondo del valle, donde se desarrollan diversas geoformas.

Entre las principales características geomorfológicas se encuentran un escarpe principal, lomas que descienden hacia el valle, y superficies de deposición con distintos niveles de incisión. En la parte baja, son destacables los abanicos aluviales y aluviotorrenciales, junto con sistemas de terrazas del río Medellín y geoformas suaves de depósitos aluviales.

Geomorfología Local Vereda El Vallano sector Astilleros, Municipio de Envigado Departamento de Antioquia-Colombia

La zona en estudio se sitúa en una ladera de pendiente fuerte, caracterizada por una morfología que presenta semi cuchillas alargadas con una dirección preferencial de sur a norte. Entre estas semi cuchillas se encuentran zonas planas o suavizadas a media ladera, que tienen baja pendiente y forman parte del sendero ecológico. Además, la región pertenece a la cuenca de la quebrada La Ayurá.

6.1.3 HIDROLOGÍA E HIDRAÚLICA DE LA VEREDA EL VALLANO

En el caso de estudio se identifica varias fuentes hidrológicas específicamente la cuencas de la quebrada La Molina y ayura, en donde se evidencia un deslizamiento tipo cárcava que coincide con el drenaje natural de flujo intermitente, es decir, solo aparece cuando hay eventos de precipitación en el sector y procesos intensos de condensación, por la condición de bosque y la altura sobre el nivel del mar.

De igual forma, de acuerdo a la información geográfica obtenida se puede apreciar que la sección transversal de la quebrada La Molina, es estrecha y poco profunda, con variaciones importantes en la pendiente, la existencia de algunos meandros no sinusoidales, y con radios de curvatura medianamente pronunciados, así:

6.1.4 GEOMORFOLOGÍA DE LA VEREDA EL VALLANO

La zona de estudio se encuentra en una ladera de pendiente pronunciada, con una morfología caracterizada por semi cuchillas alargadas en dirección sur-norte. Entre estas semi cuchillas se observan áreas planas o suavizadas a media ladera, con pendientes bajas, las cuales forman parte del sendero ecológico. La zona pertenece a la cuenca de la quebrada La Ayurá.

En esta área, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) llevó a cabo un proceso de intervención con técnicas de Bioingeniería. Se construyó un sistema de terrazas de contención en guadua con drenaje adecuado, logrando así un refuerzo mecánico del suelo, suavización del terreno y reducción de la erosión mediante la instalación de terrazas jardineras con hidrosiembra o revegetalización. Actualmente, este sector presenta una pendiente menos escarpada, cubierta por vegetación que ayuda a disminuir el potencial erosivo provocado por las lluvias.

6.1.5 CLIMA DE LA VEREDA EL VALLANO

Temperatura

Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 17 °C a 25 °C, con una temperatura media anual de 20°C. La temporada de menos lluvias dura de 3 a 4 meses entre mayo y agosto con una temperatura máxima promedio diario de 25 °C. El mes más frío del año en Envigado es octubre, con una temperatura mínima promedio de 16 °C (Figura 16).

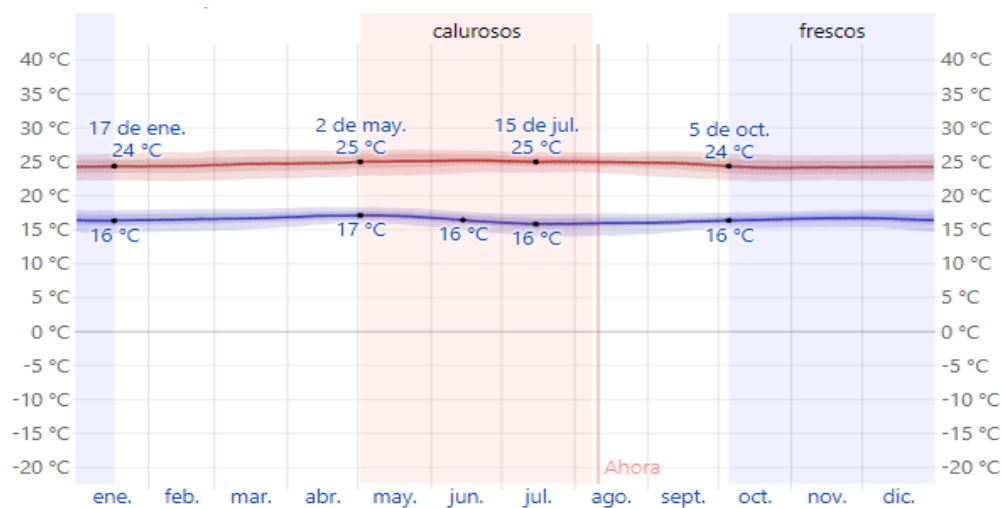


Fig. 16 Temperatura máxima y mínima promedio desde 2015 hasta la actualidad.

Tomado de Weather Spark [47].

Radiación solar

La incidencia de energía solar de onda corta en Envigado presenta poca variación a lo largo del año. El periodo con mayor luminosidad tiene una duración aproximada de 2 meses, entre junio y agosto, cuando la energía solar promedio diaria por metro cuadrado supera los 4,8 kWh. Julio destaca como el mes más luminoso, con un promedio de 5,1 kWh. En contraste, el periodo con menor luminosidad se extiende entre octubre y diciembre, también con una duración de 2 meses, durante el cual la energía solar promedio diaria por metro cuadrado es inferior a 3,8 kWh. El mes más opaco es noviembre, con un promedio de 3,6 kWh (Figura 17).

Por otro lado, el ángulo de salida del sol es de aproximadamente 87° Este y el ángulo de puesta del sol es de aproximadamente 272° Oeste, teniendo los picos más altos de radiación solar a las 9am y 2pm, así como su punto más alto (cenit) a las 12m, medido en Watios por metro cuadrado (Figura 17).

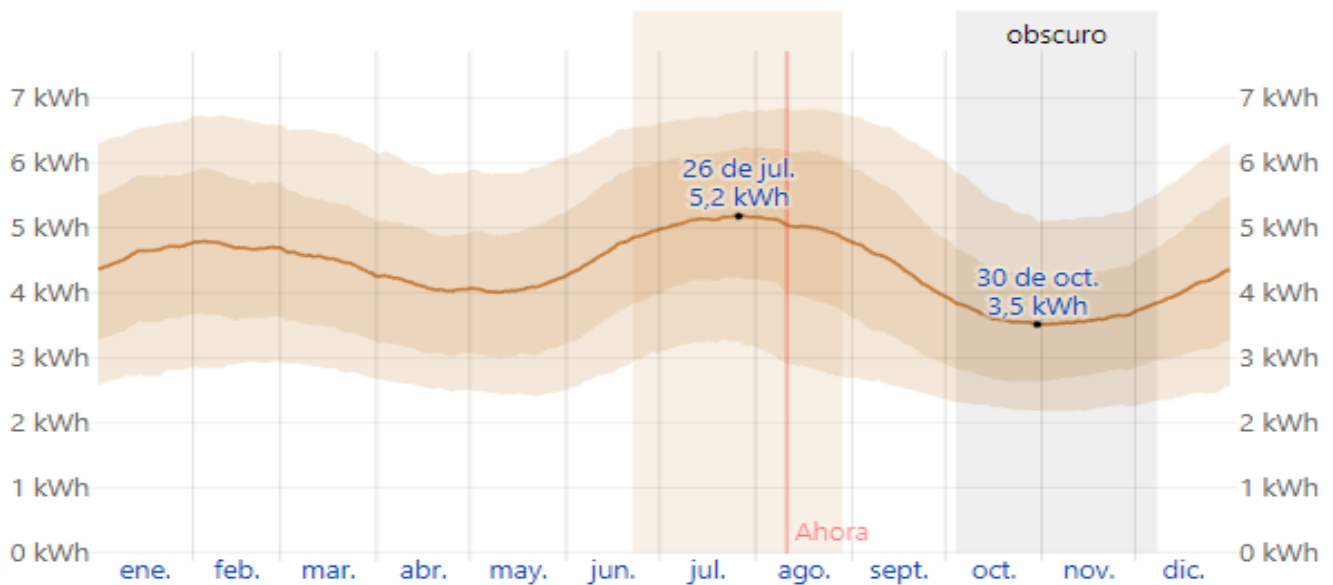
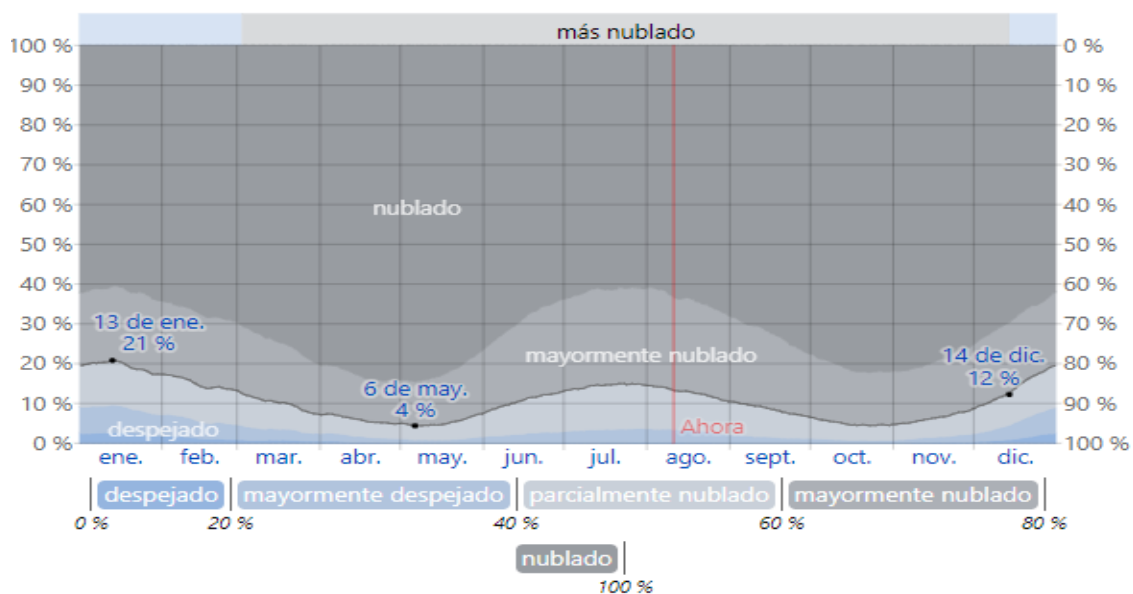


Fig. 17 . Energía solar de onda corta incidente diario promedio desde el 2015 hasta la actualidad.

Tomado de Weather Spark [47].

Nubes En el municipio de Envigado, la cobertura de nubes en el cielo presenta poca variación a lo largo del año. con mayor claridad, donde las condiciones de cielo despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado ocurren aproximadamente en un 19 % del tiempo. Por otro lado, los meses más nublados se nublados o mayormente nublados en promedio el 95 % del tiempo (Figura 18).

Fig. 18 Categorías de nubosidad promedio desde el 2015 hasta la actualidad.



Tomado de Weather Spark [47].

Precipitación

La temporada de lluvias en Envigado se extiende aproximadamente entre marzo y diciembre, abarcando 8-9 meses con una probabilidad superior al 70 % de que se registre precipitación en alguno de esos días. Octubre es el mes más lluvioso, con un promedio de 26.4 días de lluvia con al menos 1 milímetro de precipitación (Figura 19).

La temporada seca, por otro lado, dura cerca de 3 meses, de diciembre a marzo. Enero es el mes con menos días de lluvia, con un promedio de 17.4 días de precipitación que alcanzan al menos 1 milímetro.

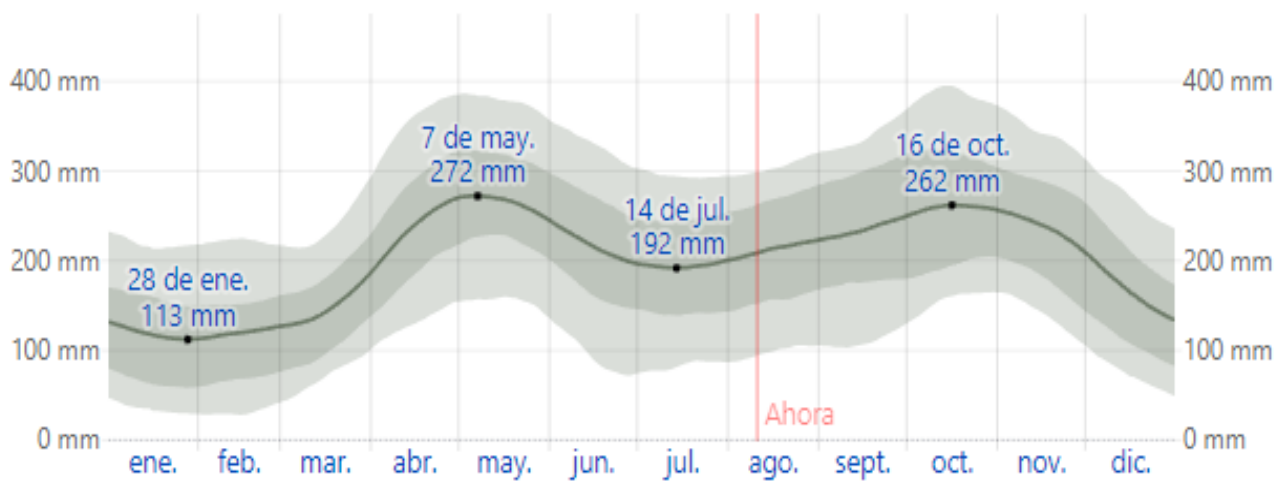


Fig. 19 Promedio mensual de lluvia desde el 2015 hasta la actualidad.

Tomado de Weather Spark [47].

Humedad

El nivel de humedad basado en el punto de rocío medido no varía considerablemente durante el año y permanece prácticamente constante en 0 % (Figura 20).

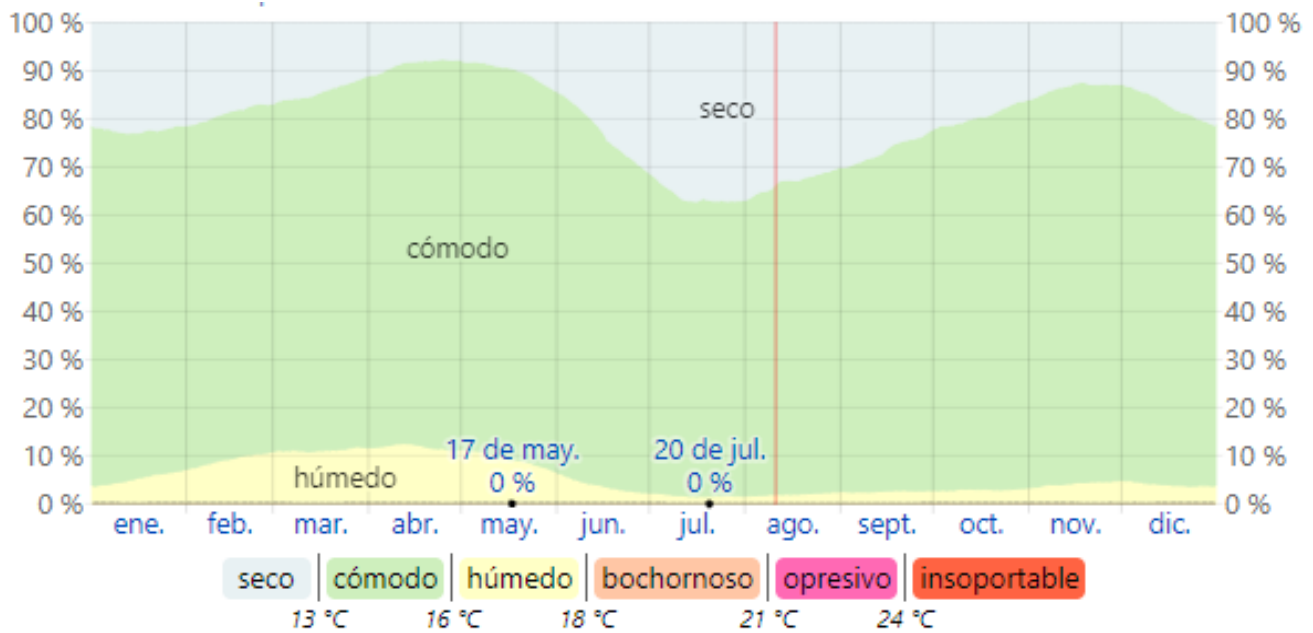


Fig. 20 Niveles promedio de comodidad de la humedad desde el 2015 hasta la actualidad, categorizado por el punto de rocío.

Tomado de Weather Spark [47].

Vientos

Esta sección analiza el vector promedio de viento por hora (velocidad y dirección) a una altura de 10 metros sobre el suelo en el área amplia. Cabe destacar que el viento en una localización específica está fuertemente influenciado por la topografía local y otros factores. Además, la velocidad y dirección del viento pueden mostrar variaciones significativas en cada momento en comparación con los promedios horarios (Figura 21).

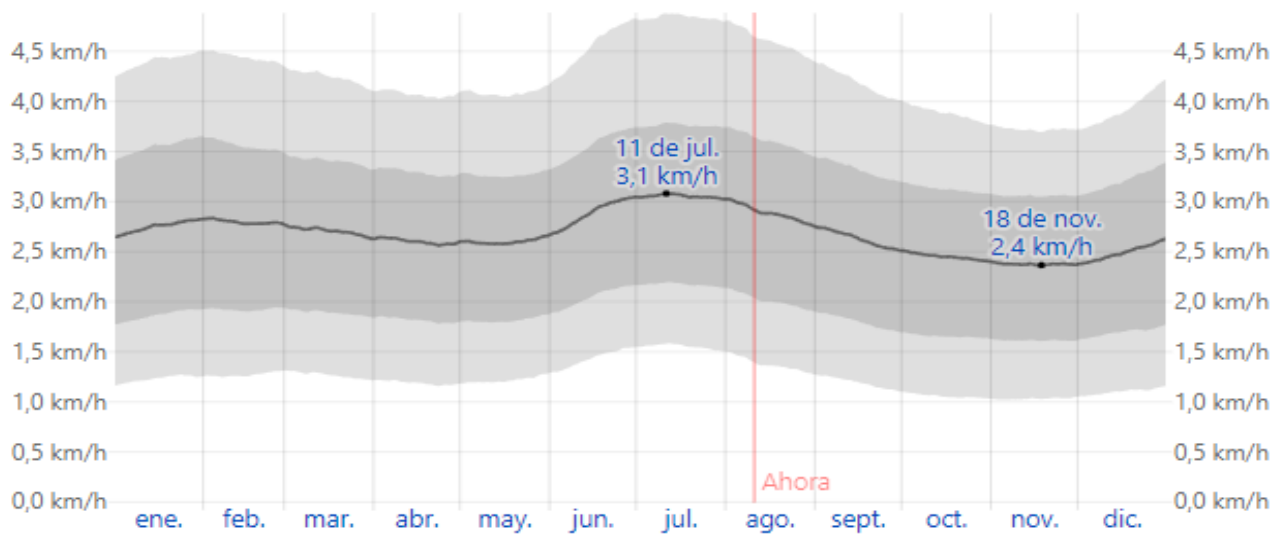


Fig. 21 Velocidad promedio del viento desde el 2015 hasta la actualidad.

Tomado de Weather Spark [47].

El vector viento (velocidad y dirección) promedio por hora medido a 10 metros sobre el suelo no varía considerablemente durante el año y permanece en un margen de más o menos de 2,7 kilómetros por hora, siendo el valor mínimo 0,4 km/h y el valor máximo 3,1 km/h. La dirección predominante promedio por hora del viento varía durante el año, el viento con más frecuencia viene del oeste durante octubre y noviembre y se dirige con más frecuencia del este entre noviembre y octubre (Figura 22).

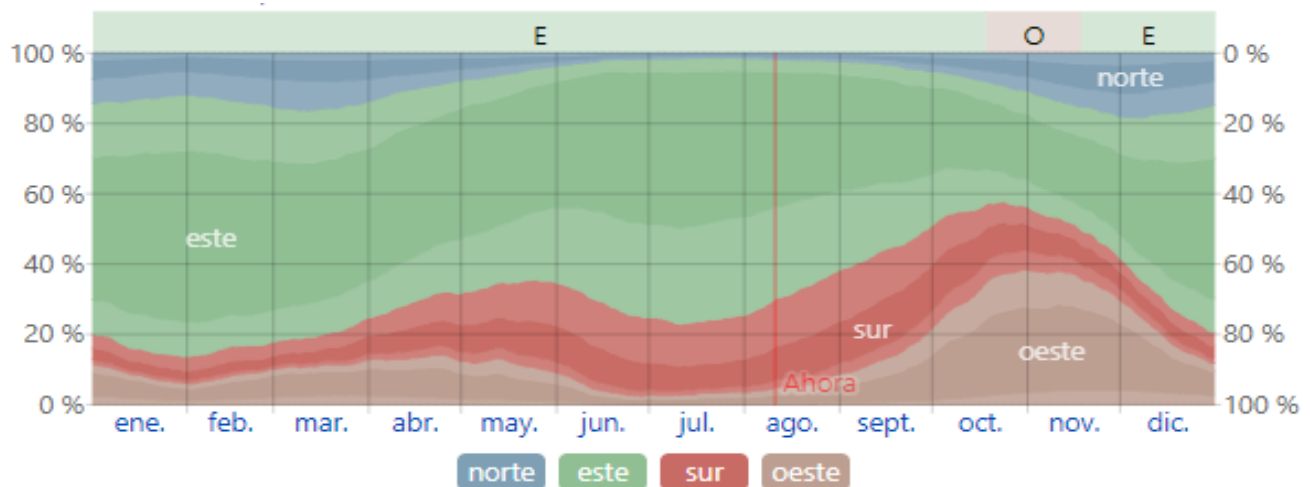


Fig. 22 Dirección promedio del viento desde el 2015 hasta la actualidad.

Tomado de Weather Spark [47].

6.1.6 DIAGNÓSTICO DE LA VEREDA EL VALLANO

De acuerdo con el análisis de la información, se identificó como relevante un deslizamiento superficial en forma de flujo con alto contenido de detritos, ubicado junto a un evento similar ocurrido en 2017. Este deslizamiento parece haber sido provocado por el aporte incontrolado de humedad derivado de la escorrentía proveniente de un canal natural, formado debido a la erosión superficial del suelo hacia la corona de la ladera, por encima del sendero ecológico, como se muestra en la Figura 23. Este flujo de agua saturó el suelo, caracterizado por ser altamente erosionable debido a su elevado contenido de partículas gruesas y granulares, lo que facilitó el desplazamiento superficial del material y dejó al descubierto la roca.



Fig. 23 Trayecto del drenaje.

6.2 MEDICIONES DE LAS FAMILIAS (TALUDES NATURALES) EN LA VEREDA EL VALLANO

La sección anterior (6.1) y la presente, hasta el numeral 6.5 presentan los resultados que abordan el alcance del objetivo específico 2: identificar los sectores susceptibles a movimientos en masa mediante la aplicación de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) en la vereda El Vallano, sector Astilleros, del municipio de Envigado, Antioquia, Colombia.

6.2.1 RESULTADOS DE SCICN

En esta sección se presentan los resultados de la metodología aplicada, conforme a lo descrito en el numeral 5.2.2.

El polígono de estudio incluyó las áreas críticas con alta susceptibilidad a deslizamientos, delimitadas mediante datos topográficos y geomorfológicos para asegurar la inclusión de las zonas más vulnerables a fallas potenciales. Este proceso permitió identificar y delimitar 120 polígonos, realizando mediciones de distancia con el programa DWG y estableciendo intervalos que permitieron generar un PT a nivel de familia. Dicho patrón facilitó la agrupación de taludes (población) con características geométricas similares, lo cual fue fundamental para el análisis de su estabilidad (Figura 24) y (Tablas 4- 7).

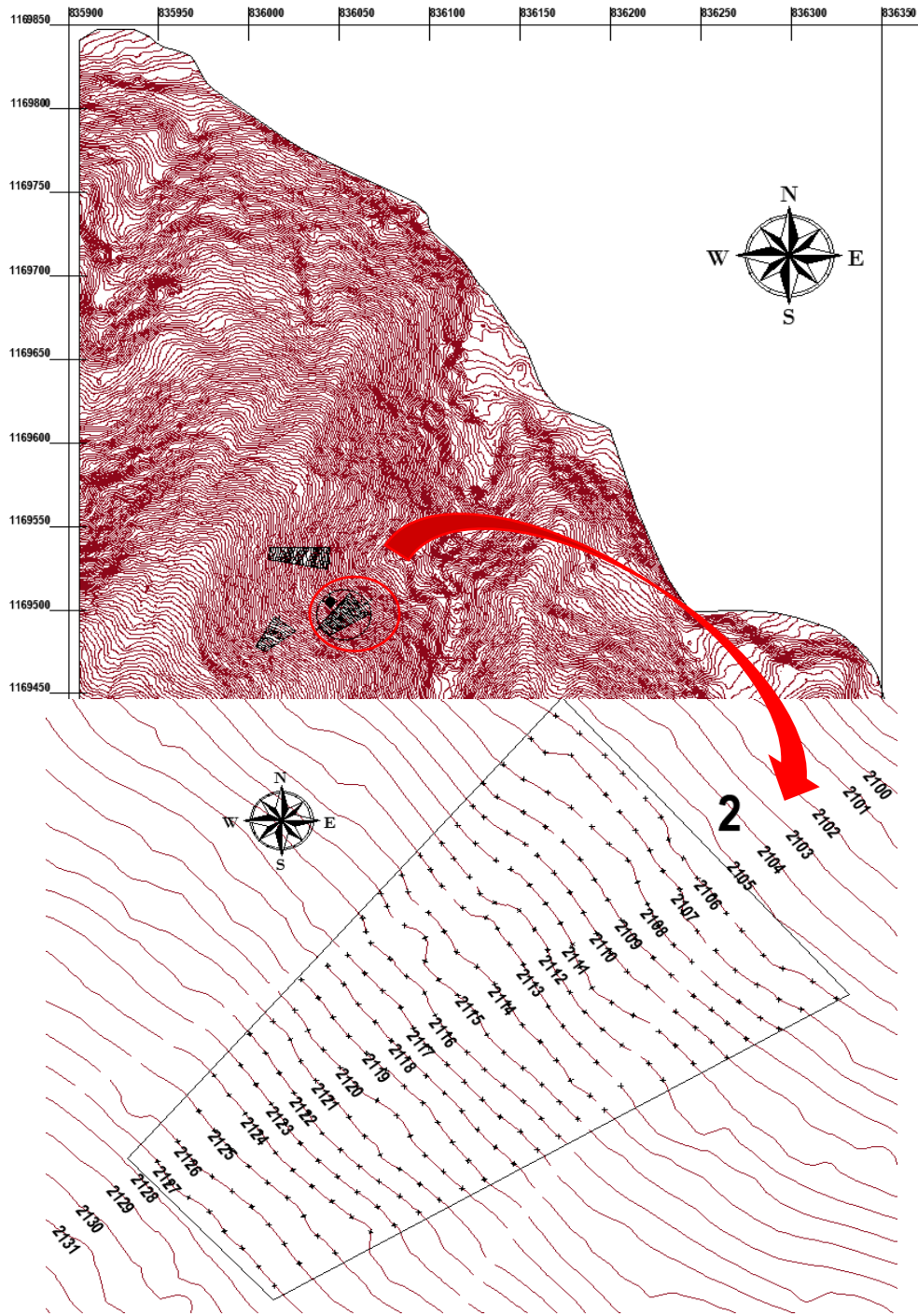


Fig. 24 Delimitación de los polígonos y extracción de coordenadas talud 2 marcación de cotas vereda El vallano sector Astilleros Municipio de envigado Antioquia Colombia.

6.2.2 CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES

Las Tablas 4 y 5 detallan los resultados de las mediciones realizadas de acuerdo con la MTN. Como ejemplo representativo, se incluye el análisis del Talud 2, siguiendo los parámetros descritos en el apartado 5.2.3.

Tabla 4. Puntos del polígono calculados en el talud 2 de la vereda el Vallano, Municipio de Envigado Antioquia Colombia

PUNTOS DEL POLIGONO A CALCULAR		
COTA (m)	COORDENADAS CARTESIANAS	
Z	X	Y
2106	836055.5733	1169509.226
2106	836056.485	1169508.492
2106	836057.465	1169507.576
2106	836058.1632	1169506.813
2106	836059.0247	1169505.788
2106	836059.6347	1169504.996
2106	836059.9196	1169504.059
2106	836060.4915	1169503.278
2106	836061.0336	1169502.446
2106	836061.6867	1169501.704
2106	836062.1506	1169500.975
2106	836062.7489	1169500.245
2106	836063.5769	1169499.223
2106	836064.3227	1169498.678
2106	836065.4793	1169498.127
2106	836066.3929	1169497.416

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Puntos del polígono a calcular talud 2 vereda El Vallano Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia Colombia

INTERVALO FAMILIA 2			
2106 A 2107			
X2-X1 (m)	Y2-Y1 (m)	X²+Y²	Distancia (m)
-0.958	-0.9618	1.843	1.358
-1.3273	-0.794	2.392	1.547
-0.6086	-0.8796	1.144	1.070
-0.6636	-0.8816	1.218	1.103
-0.9948	-0.5678	1.312	1.145
-0.9838	-0.5596	1.281	1.132
-0.7232	-0.4588	0.734	0.856
-0.7849	-0.5333	0.900	0.949
-0.6856	-0.461	0.683	0.826
-1.2269	-0.675	1.961	1.400
-1.1262	-0.7424	1.819	1.349
-1.0069	-0.8227	1.691	1.300
-1.0826	-0.6208	1.557	1.248
-0.9754	-0.6874	1.424	1.193
-1.2996	-0.7475	2.248	1.499
-1.3568	-0.447	2.041	1.429

Fuente: (Elaboración propia)

Las mediciones obtenidas de los demás taludes se pueden revisar en los Anexos.

Finalmente, se exportó el archivo con los resultados de las mediciones en formato .xlsx, bajo el nombre “asignado”. Este archivo permitió visualizar diversos parámetros, incluyendo las mediciones de las distancias y sus respectivos intervalos, como se detalla en la Tabla 6, lo que facilitó los cálculos posteriores.

Tabla 6. Mediciones de las distancias con su respectivo intervalo talud 2 vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia Colombia

DELTA H ACUMULADO (m)	LONGITUD MAXIMA ACUMULADA (m)	LONGITUD MINIMA ACUMULADA (m)	LONGITUD PROMEDIO (m)	LONGITUD PROMEDIO ARITMÉTICO (m)
1	1.547	0.826	1.213	1.186
2	3.349	2.052	1.441	2.701
3	4.865	3.012	1.204	3.938
4	6.020	3.973	1.065	4.997
5	7.659	4.965	1.257	6.312
6	9.226	5.829	1.190	7.527
7	10.663	6.534	1.066	8.598
8	12.499	7.615	1.484	10.057
9	14.071	8.403	1.231	11.237
10	15.680	9.186	1.156	12.433
11	16.827	10.115	1.025	13.471
12	17.999	11.007	1.002	14.503
13	19.298	11.943	1.104	15.621
14	20.603	12.887	1.136	16.745
15	22.114	13.659	1.115	17.886
16	23.346	14.597	1.032	18.972
17	24.440	15.536	0.994	19.988
18	25.557	16.497	1.053	21.027
19	27.176	17.568	1.321	22.372
20	28.704	18.747	1.358	23.726
21	30.180	19.893	1.310	25.037
Todos	30.180	0.826	1.179	13.254

Fuente: Elaboración propia

6.3 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA EN LA VEREDA EL VALLANO

Siguiendo la metodología descrita en el punto 5.4, que abarca los numerales 5.4.1 al 5.4.12, se realizaron mediciones detalladas de las familias de taludes naturales. Estas incluyeron la determinación de las longitudes (L) máximas, mínimas y promedio, así como los intervalos de altura (H), definidos como parámetros geométricos. A partir de estos datos, se calcularon los parámetros funcionales a y b , esenciales para el análisis de la estabilidad del terreno.

6.3.1 PARÁMETROS FUNCIONALES a y b

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis del PT a nivel de familia, aplicado al caso de estudio, conforme a lo descrito en el apartado 5.4.2. La tabla 7, muestra los resultados del cálculo logarítmico de las mediciones obtenidas en el talud 2.

Tabla 7. Cálculo logarítmico de las mediciones obtenidas talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Patrón Triangular a Nivel de Familia		
Log H	Log L Máx.	Log L Min
0	0.189395229	-0.082926923
0.30103	0.524898516	0.312278786
0.477121	0.687055399	0.478896563
0.60206	0.779580215	0.599151103
0.69897	0.88417123	0.695943598
0.778151	0.965005019	0.76557854
0.845098	1.027863861	0.815152514
0.90309	1.096873667	0.881653426
0.954243	1.148314705	0.924425052
1	1.195343474	0.96311369
1.041393	1.226000342	1.004982982
1.079181	1.255240406	1.04167864
1.113943	1.28551586	1.077118649
1.146128	1.313931694	1.110150948
1.176091	1.344663992	1.135422899
1.20412	1.368207816	1.164273853
1.230449	1.388105844	1.191344875
1.255273	1.407504797	1.217417346
1.278754	1.434186598	1.244718283
1.30103	1.457946316	1.272930377
1.322219	1.479725126	1.29869939

Fuente: Elaboración propia

Posterior al cálculo logarítmico, se realizó una correlación lineal para determinar los parámetros funcionales a y b . En la tabla 8 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros funcionales a y b del caso de estudio, en concordancia con la metodología descrita en el apartado 5.4.2.

Tabla 8. Correlación lineal para estimación de los parámetros a y b talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Estimación del parámetro a y b			
	Min	Max	Prom
a:	1.054144143	0.595799316	0.824971729
b:	1.0061	1.0415	1.0238
r:	0.998442296	0.999376667	

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Los resultados de los parámetros geométricos se obtuvieron mediante la aplicación de la metodología descrita en el apartado 5.4.3.

De acuerdo con la estructura de las familias de taludes naturales, el parámetro funcional b presenta valores específicos: un perfil convexo se identifica cuando $b < 1$, mientras que un perfil cóncavo se caracteriza por $b > 1$. Así, al evaluar la familia del talud 2, se determinó que tiene un perfil cóncavo (Tabla 9). Dado que la familia presenta un perfil cóncavo se corrigió el parámetro b (0.9768).

Tabla 9. Resumen de la evaluación de la familia talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

F₁	F₂	F₃	Sa	Pa	Pa_{max}
0.730	0.838	0.990	0.699	0.247	0.661

Parámetros geométricos	
Parámetro a	Parámetro b
0.825	1.02380
L _{LD}	H _{LD}
30.2	21.0
Tipo de perfil tan β _{LF} < 1	Perfil cóncavo
b _{corregido}	0.9768
L _{LF}	26.617
HLF	23.742
a _{corregido}	0.963

Fuente: Elaboración propia

6.3.3 EVALUACIÓN DE LA FAMILIA DE TALUDES NATURALES

Para la evaluación de la familia de taludes naturales, se siguió el procedimiento descrito en el numeral 5.4.4.

Para que la medición de los taludes sea aceptada, deben cumplirse dos condiciones: el tangente límite inferior de la función de correlación entre L y H debe ser menor a 1 (tan β_{LF} < 1), y el parámetro adimensional de presurización (Pa) debe ser inferior al parámetro adimensional de presurización máxima (Pa < Pa_{máx}). Considerando esto, y de acuerdo con los resultados descritos en la Tabla 10, los valores obtenidos cumplen con ambas condiciones, por lo que el polígono de la familia es aceptable en el contexto de la MTN.

Tabla 10. Condiciones para aceptar la MTN talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Condiciones para aceptar el polígono de la familia en MTN	
$\tan \beta_{LF} < 1$	0.892
$Pa < Pa_{m\acute{a}x}$	0.101
X_{LH}	0.1948553
Tipo de roca	Roca degradada

Fuente: Elaboración propia

6.3.4 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.4.5, se estableció el PT a nivel de población. Como se mencionó en el numeral 6.2.1, el caso de estudio delimitó un total de 120 polígonos, de los cuales, tras la evaluación individual presentada en la sección 6.3.3, se aceptaron 98 familias que cumplieron con los criterios establecidos.

Para determinar el PT en estas familias aceptadas, se empleó una representación en escala logarítmica. Este enfoque permitió configurar el PT en el contexto de la población en estudio como un modelo determinístico, basado en relaciones de causalidad físico-geomecánicas y regido por las propiedades físicas específicas de la masa de materiales rocosos [2].

6.3.5 LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PT

Para el análisis del límite superior actual e inicial del PT, se siguió la metodología descrita en el numeral 5.4.6.

Los resultados presentados en la Tabla 11 corresponden a las mediciones realizadas de la longitud límite superior (LLDLLD) y la altura límite superior (HLDHLD) para todas las familias de taludes naturales

del Talud 2, localizado en la Vereda El Vallano, Sector Astilleros, Municipio de Envigado, Antioquia. Por otro lado, la Tabla 12 recoge las tendencias actuales de las mediciones máximas observadas en la población de taludes de la misma Vereda.

Como se muestra en las Tablas 11 y 12 y en las Figuras 25 y 26, los valores medidos de H_{LP} y L_{LP} equivalen a 27.00 y 58.21, respectivamente. Con este conjunto de datos y otro punto adicional, H vs L en escala log-log, se obtuvieron valores de 26.00 y 29.54, respectivamente. Estos resultados reflejan la tendencia predominante en la mayoría de los puntos representados gráficamente (Figura 14), donde se genera una pendiente cuya regresión potencial en escala logarítmica representa la función potencial. A partir de esta función, es posible determinar los parámetros funcionales a y b . En la Figura 26 se aprecia que: $aa = 21.536$ y $ba = 0.0556$.

Tabla 11. Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales talud 2 Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Tendencia Pendientes Máximas	
HLD	LLD
21.00	30.18040935
27.00	58.21303282
27.00	58.21303282
Promedio	
HLD	LLD
22.20	45.51
Tendencia Pendiente mínima	
17	47.7650049

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Mediciones de tendencias actual de mediciones máximas de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Familias seleccionadas	
HLD	LLD
21.00	30.1804093
27.00	58.2130328
Factor de conversión función lineal	
Log HLD	Log LLD

1.322219295	1.479725126	
1.431363764	1.765020226	
Regresión lineal		
Parámetros	Log HLD	Log LLD
Pendiente	0.38256693	0.7561254

Fuente: Elaboración propia

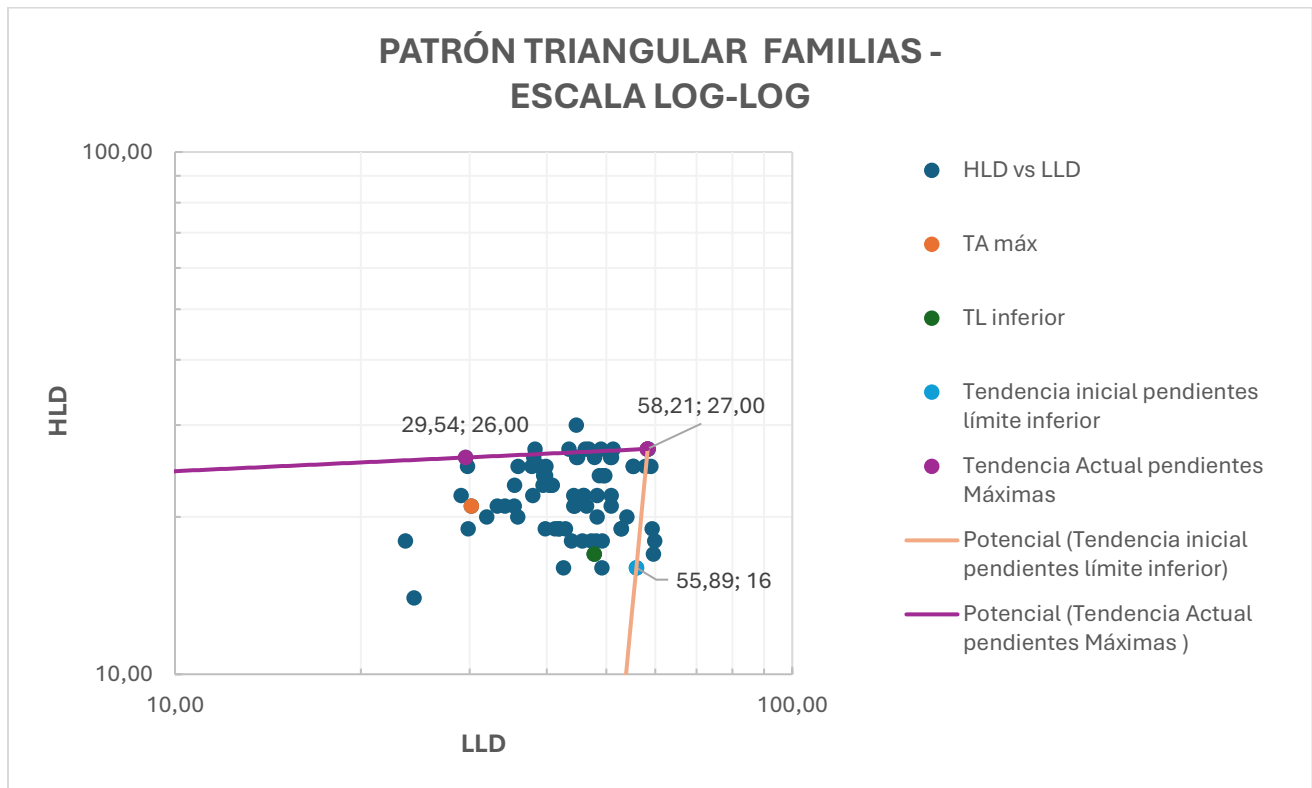


Fig. 25 Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales.

Fuente: Elaboración propia

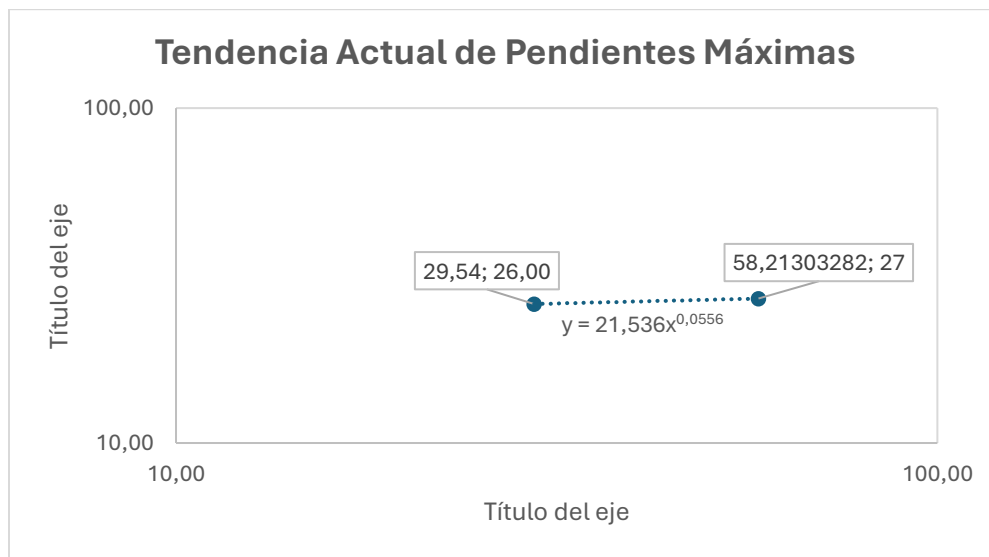


Fig. 26 Mediciones de tendencias actual de mediciones máximas de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia

6.3.6 LIMITE INFERIOR DEL PT

Para el análisis del límite inferior del PT, se siguió la metodología descrita en el numeral 5.4.9.

La Tabla 13, muestra los resultados de las mediciones del límite inferior del PT de la población de la vereda El Vallano. En la Figura 27 se observa un punto en el extremo derecho de los resultados, correspondiente a (L_{LD}, H_{LD}) $H_{LD} = 16m$, $L_{LD} = 55.89m$. Este punto intercepta el vértice, permitiendo determinar los parámetros funcionales de la función potencial simple para este límite inferior. Los parámetros funcionales de la función son $ai = 0.4630$ y $bi = 1$, lo cual refleja un comportamiento similar a la tendencia del límite inferior obtenido para el nivel de universo (Tabla 15).

Tabla 13. Mediciones de límite inferior del PT de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Familias seleccionadas		
HLD	LLD	
17	47.7650049	
27.0276468	58.3689713	
Factor de conversión función lineal		
Log HLD	Log LLD	
1.230448921	1.679109826	
1.431808235	1.766182039	
Regresión lineal		
Parámetros	Log HLD	LogLLD
Pendiente	2.312555377	-2.65258554

Fuente: Elaboración propia

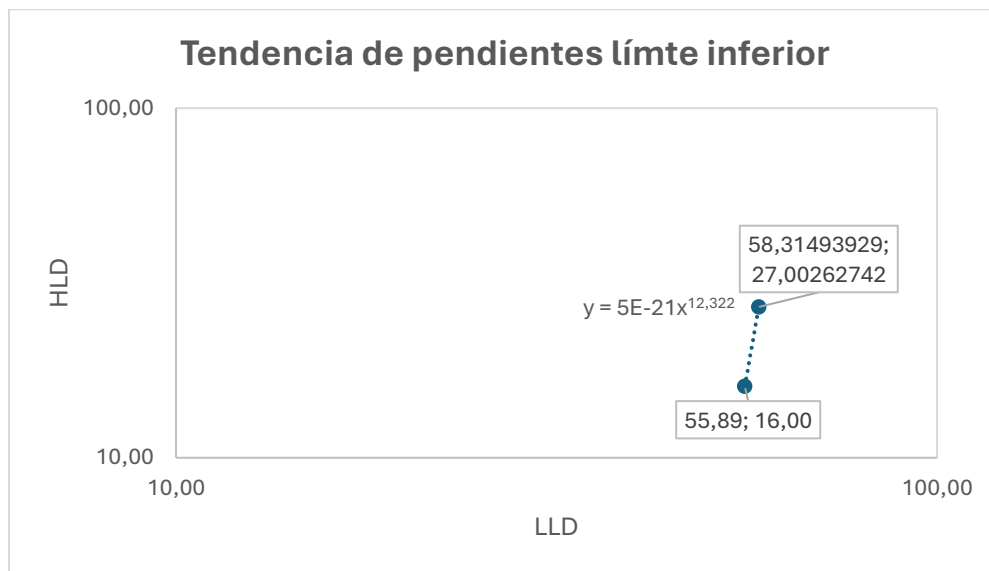


Fig. 27 Mediciones de tendencia de límite inferior de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.7 ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN

La determinación del ángulo básico de fricción se realizó siguiendo la metodología especificada en el numeral 5.4.7.

Según lo reportado en la Tabla 14, el ángulo básico de fricción obtenido fue de $\varphi_b = 25^\circ$, lo cual es coherente con los valores típicos de rocas metamórficas presentes en el área de estudio, como gneis cuarzo-feldespático, gneis biotítico anfibólico y gneis micáceo. En esta región, específicamente en la vereda El Vallano, sector Astilleros, municipio de Envigado, Antioquia, Colombia, el mineral predominante es la moscovita, lo que respalda que el ángulo básico de fricción tienda a ser $\varphi_b \geq 25^\circ$, valor considerado adecuado para las condiciones locales.

Como se detalla en el numeral 5.4.7, los valores del ángulo básico de fricción pueden oscilar entre 25° para lutitas y 37° para granitos y areniscas compactas. Por otro lado, el parámetro $H_{LD} = 27.038 \text{ m}$, correspondiente a la función básica de tendencia promedio calculada a nivel poblacional, se empleó como base para determinar los factores de seguridad relativos asociados a diferentes horizontes temporales.

Tabla 14. Resumen de los datos y cálculo de las iteraciones y cálculo de Angulo de Fricción Básico de la población de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

Resumen de los parámetros	
LLP	58.2130328
HLP	27.038
(LLX)n	58.3689713
(HLX)n	27.0276468
tan ϕ_b	0.4630482
bn	0.4630482
an	4.11131572
(LLf)n	58.2130328
(HLf)n	26.9941875
Tan BLf	0.46371381
T	0.70057991
Sa n	0.46304689
tan ϕ_m	0.05331758
	1
	0.4336506
ÁBF (ϕ_b)	24.8463491

6.3.8 TENDIENCIA DE PENDIENTE PROMEDIAS

De acuerdo con lo descrito en el numeral 5.4.12, se realizó el análisis de la tendencia de pendiente promedias. La Tabla 15 resume los parámetros funcionales correspondientes a las tendencias de pendiente máxima (superior), mínima (inferior) y promedio del PT.

Tabla 15. Resumen de Parámetros Funcionales Asociados a las Tendencias de Pendientes en el PT

POBLACIÓN	
aa Pendientes máximas actuales	21.5361487
ba pendientes máximas actuales	0.05563433
ai pendientes mínimas	0.46304689
bi pendientes mínimas	1
ap	3.15788644
bp	0.52781717
LLP	58.2130328
HLP	26.9776728

Fuente: Elaboración propia

La elaboración del PT permite analizar las propiedades de degradación, desagregación y variabilidad de los geomateriales pertenecientes a una misma formación. Desde el punto de vista poblacional, este procedimiento, que sirve como base para determinar los valores promedio de los parámetros funcionales a y b del conjunto estudiado, facilita el cálculo del ángulo básico de fricción y del ángulo entre los minerales característicos de la población analizada (Figura 28).

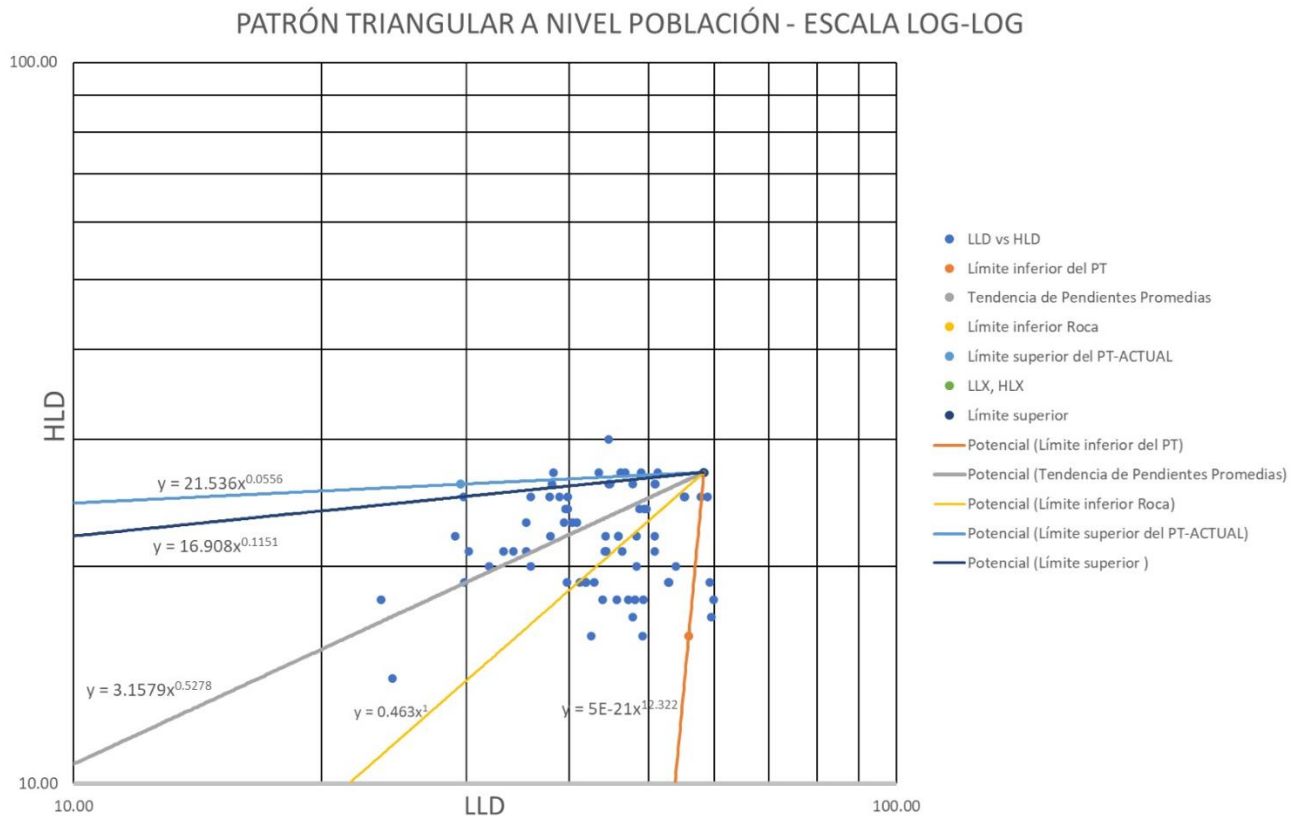


Fig. 28 . Patrón Triangular de la Población. Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia

La inclinación promedio de la pendiente en el PT de la población es fundamental para calcular el FSr. Este factor no solo se vincula con la función de potencial simple, adecuada para condiciones de largo plazo, sino que también incorpora parámetros geomecánicos para evaluar el FSr en horizontes de

mediano y corto plazo. Los parámetros geomecánicos necesarios para esta evaluación se obtienen del Sistema Analítico de la Metodología de Taludes Naturales (SAMTN).

6.4 SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN)

Para introducir los resultados, es importante recordar que el SAMTN permite abordar la evaluación de la estabilidad de los taludes mediante el análisis de la ETEC y envolutas hipotéticas. Este sistema, aunque se fundamenta en relaciones matemáticas sistemáticas y manipuladas de forma arbitraria, proporciona una aproximación progresiva a las propiedades reales de los materiales geológicos [2]. En esta fase del análisis, se desarrollaron soluciones de envolutas para evaluar las condiciones de presurización en el terreno, lo cual permitió comprender cómo la presión del agua intersticial podría afectar la estabilidad de los taludes en el área de estudio.

Con base en esta metodología, los resultados presentados reflejan cómo los parámetros funcionales y geomecánicos, obtenidos a través del SAMTN, permiten identificar las tendencias y condiciones de estabilidad en los taludes evaluados en la Vereda El Vallano, del sector Astilleros del municipio de Envigado, Antioquia.

Los resultados detallados a continuación fueron obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el numeral 5.5, que incluye los apartados 5.5.1 al 5.5.4.

6.4.1 PARÁMETROS GEOMECAÑICOS

Los parámetros geomecánicos fueron obtenidos siguiendo lo establecido en el numeral 5.5.4 de la metodología.

Para evaluar las propiedades geomecánicas, se utilizó la opción de programador en una hoja de cálculo electrónica, lo que permitió implementar una macro diseñada para resolver las condiciones de frontera relacionadas con las envolventes especificadas en la Tabla 3. Esta hoja se estructuró en tres secciones principales: la primera contenía los parámetros funcionales corregidos (a y b) junto con los geométricos (HLF y LLF), determinados durante la evaluación de familias de taludes naturales mediante la metodología SCICN (descrita en el numeral 5.5.2). Con estos datos, cuyos resultados se presentan en el

apartado 6.2, se calcularon los parámetros necesarios para la ETEC y cada envolvente, como se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16. Solución de envolutas Hoja cálculo de propiedades geotécnicas Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

<i>b</i> corregido	0.9768		
L _{LF}	26.6196		
H _{LF}	23.7398		
<i>a</i> corregido	0.9624		
ENVOLUTA - FAMILIA 2			
Anue	Bnue	HLF	LLF
0.962	0.9768	23.740	26.620

Parámetro	ENVOLUTAS FILA B									
	BA - ETEC	BB - HE	BC - HR	BD - HS	BE - HI	BF - HT	BG - HES	BH - HEB	HLS	
a	0.962413465	2.7758895214	17.0250225731	1.3419961085	1.2305532789	1.2719149846	3.7815517783	1.0791459827	1.5047882541	
b	0.976785157	0.6539953482	0.1013116926	0.8754734645	0.9018913690	0.8918172406	0.6412498864	0.9767851571	0.8754734645	
L _{LF}	26.61959223	26.6195922313	26.6195922313	26.6195922313	26.6195922313	26.6195922313	59.0506530574	23.7398112909	26.6195922313	
H _{LF}	23.7398112909	23.7398112909	23.7398112909	23.7398112909	23.7398112909	23.7398112909	51.6972798113	26.6192472570	26.6195922313	
F1	0.89419081	0.927856141	0.988467429	0.904623443	0.901891369	0.902932236	0.918255043	0.99998704058329	1	
F2	0.92583473	1.231515927	1.246690851	1.026877786	1	1.009860653	1.22951719	1.02319523	1.123478413	
F3	0.988212674	1.07471342	1.21915041	1.003212118	1	1.001072815	1.076941963	1.000532465	1.014604189	
Sa	0.8754734645	0.6539953482	0.6429345473	0.8026206643	0.8216904106	0.8144129082	0.6412498864	0.9767851571	0.8772807847	
Sab	0.873908708	0.702857578	0.783833917	0.805198776	0.821690411	0.815286622	0.690588912	0.5	0.890092759	
Tan(φ _{LF})	0.8918172406	0.8918172406	0.8918172406	0.8918172406	0.8918172406	0.8918172406	0.8754734645	0.9999867326	1.0000000000	
Tan φ _r	0.871113843	0.583244327	0.090351514	0.780762329	0.804322272	0.795337991	0.56139726	0.976772198	0.875473464	
Pa	0.1013116926	0.0000000000	-0.5416228547	0.0728528002	0.0802009584	0.0774043324	0.0000000000	0.0000000000	-0.0018073202	
σ _{VLB}	59.05065306	65.23880608	38.31165062	62.04655333	61.33871781	61.61528388	140.6476309	73.17593019	76.17667487	
τ _{LB}	51.69727981	42.6658757	24.63188374	49.79984585	50.40143622	50.18028254	90.19027733	71.47716246	66.82833311	
σ _{VL}	63.78098721	52.97439086	30.7306744	60.4690497	61.33871781	61.00760824	114.3925697	71.51707518	67.80430669	
τ _L	55.73876013	37.23345204	24.08774488	48.68960482	50.40143622	49.73868686	78.99824025	35.75853759	60.3521224	
γ _a	2.4874103814	2.7480760179	1.6138144548	2.6136076893	2.5837912971	2.5954411823	2.720602210	2.7489857050	2.8616770013	
γ _b	2.6866678269	2.2314579596	1.2944784615	2.5471579768	2.5837912970	2.5698438582	2.2127386618	2.6866678269	2.5471579768	
X _{UH}	0.191995046	19.12017904	23.43536484	10.61440987	8.286555858	9.237841908	40.75957043	26.6047362	26.61959223	

Fuente: Elaboración propia

Según lo explicado en el numeral 5.5.3, la otra sección evaluó las condiciones de presurización presentes en el talud 2, (Tabla 17).

Tabla 17. Condiciones de presurización Hoja cálculo de propiedades geotécnicas Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

PEX POSITIVA EN EXCESO ACTIVA	
$b > s_a$	VERDADERO
$s_a > \tan(\beta_{LF})$	FALSO
$(P_a)r > 0$	FALSO

PED POSITIVA EN EXCESO DICIPADA	
$b > s_a$	VERDADERO
$s_a > \tan(\beta_{LF})$	FALSO
$(P_a)r < 0$	VERDADERO

CE CASI EQUILIBRIO	
$b = s_a$	FALSO
$s_a < \tan(\beta_{LF})$	VERDADERO
$(P_a)r < 0$	VERDADERO

P POSITIVA	
$b > s_a$	VERDADERO
$s_a < \tan(\beta_{LF})$	VERDADERO
$(P_a)r < 0$	VERDADERO

N NEGATIVA	
$b < s_a$	FALSO
$s_a < \tan(\beta_{LF})$	FALSO
$(P_a)r < 0$	VERDADERO

CONDICIONES DE PRESURIZACION							
	N	CE	P	PED	PEX		P POSITIVA
GSE	0	0	2.748985705	0	0	2.748985705	GSE
GSS	0	0	2.771471525	0	0	2.771471525	GSS
GATC	0	0	2.857655592	0	0	2.857655592	GATC
GATM	0	0	2.511831474	0	0	2.511831474	GATM
GATS	0	0	-0.65589521	0	0	-0.65589521	GATS
GADM	0	0	2.391232571	0	0	2.391232571	GADM
GADS	0	0	2.703723261	0	0	2.703723261	GADS

Fuente: Elaboración propia

Por último, la tercera sección resume los resultados de los parámetros geomecánicos (Tabla 18).

Tabla 18. Resultados Hoja cálculo de propiedades geotécnicas Vereda El Vallano, sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS PARA FAMILIAS DE TALUDES NATURALES POR MEDIO DE LA -MTN		
Condición de presurización	P POSITIVA	
HN Cabeza Neta Negativa M	-19.12017904	
HP Cabeza Neta Positiva M	21.3295838	
HNT Cabeza Neta M	2.209404768	
PARÁMETRO	LABORATORIO	MASA
γ Específico Sólidos	2.748985705	2.748985705
γ TOTAL (T/M ³)	2.857655592	2.511831474
γ SECO (T/M ³)	2.857655592	2.391232571
σ Origen	3.962263975	0.261347917
Cohesión Traccional (T/M ²)	3.468856969	0.228803167
Cohesión Inbrica (T/M ²)	0.224522529	0.030680426
Cohesión Traccional Efectiva (T/M ²)		0.220325632
Ángulo de fricción Pico ϕ_p	41.8182148	41.73230103
Ángulo de fricción Residual ϕ_r	34.66072728	13.85425531
Ángulo de fricción efectivo Pico ϕ_{epm}		42.80894674
Ángulo de fricción efectivo residual ϕ_{epm}		14.36565069
Altura Crítica Corto Plazo	3.562413045	
Altura Crítica Mediano Plazo		0.238064879
Porosidad Máxima	0.357696443	
Porosidad Promedia		0.037051648
K	4.981776635	
Hom	0.514640139	
Homt	0.453790902	

Fuente: Elaboración propia

6.5 FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FSr) EN LA VEREDA EL VALLANO

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.6, se calcularon los valores del FSr frente al deslizamiento para distintos escenarios, considerando taludes numerados del 1 al 20. Estos cálculos permitieron realizar una evaluación cuantitativa del riesgo de deslizamientos en la vereda Vallano,

facilitando la identificación precisa de áreas críticas, como se presenta en las Tablas 19 y 20. Los datos completos se encuentran disponibles en los anexos. Estos cálculos los resultados del objetivo específico 2 relacionado con la “Identificación de sectores susceptibles a movimiento en masa con la MTN, en la vereda El Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia-Colombia”.

Tabla 19. Hoja electrónica factor de seguridad relativos al deslizamiento estudio regional taludes de 1 al 20

FAMILIA	COORDENADAS DEL CENTROIDE		PARAMETROS GEOMÉTRICOS FAMILIA		ALTURAS CRÍTICAS				FACTORES DE SEGURIDAD		
					Hom	Homt	Corto Plazo	Mediano plazo	Corto Plazo	Mediano plazo	Largo plazo
							Hcp	Hmp			
X	Y	HLD	LLD								
1	836029.3457	1169532.1810	27.00	43.48	1.0309	0.9413	26.0073	26.0968	1.0382	1.0346	0.9986
2	836052.7015	1169496.6990	21.00	30.18	0.5146	0.4538	26.5235	26.5844	0.7918	0.7899	0.7767
3	836014.0392	1169485.1591	14.00	24.38	1.7844	1.7061	25.2538	25.3321	0.5544	0.5527	0.5178
4	836007.7176	1169332.9317	25.00	57.81	4.1457	4.0778	22.8925	22.9604	1.0921	1.0888	0.9246
5	836205.674	1168981.2092	27.00	58.21	1.2386	1.1738	25.7995	25.8644	1.0465	1.0439	0.9986
6	836244.5552	1168986.6175	27.00	46.20	0.3324	0.2199	26.7058	26.8183	1.0110	1.0068	0.9986
7	836246.0386	1169043.9785	16.00	42.58	3.0754	3.0719	23.9627	23.9662	0.6677	0.6676	0.5918
8	836452.0366	1169021.2356	30.00	44.67	0.9665	0.7778	26.0717	26.2603	1.1507	1.1424	1.1095
9	836845.4355	1168899.8483	17.00	47.77	3.6468	3.5172	23.3914	23.5210	0.7268	0.7228	0.6287
10	836897.7718	1168889.1968	18.00	59.87	3.1058	2.8259	23.9324	24.2122	0.7521	0.7434	0.6657
11	835981.3692	1168746.5589	26.00	44.71	1.1460	0.9123	25.8921	26.1258	1.0042	0.9952	0.9616
12	835968.6359	1168716.2215	23.00	40.39	1.5680	1.4710	25.4702	25.5672	0.9030	0.8996	0.8507
13	836172.1305	1168476.9238	27.00	58.43	5.5613	5.4929	21.4768	21.5453	1.2572	1.2532	0.9986
14	836135.9133	1168446.1128	23.00	40.86	2.5473	2.4803	24.4908	24.5578	0.9391	0.9366	0.8507
15	837018.2958	1168532.2468	26.00	38.11	0.3774	0.2451	26.6608	26.7931	0.9752	0.9704	0.9616
16	837038.0589	1168539.3247	21.00	33.28	0.7673	0.5800	26.2708	26.4582	0.7994	0.7937	0.7767
17	836483.8973	1167167.9558	22.00	29.06	0.1083	0.0485	26.9298	26.9896	0.8169	0.8151	0.8137
20	836527.1755	1167186.873	18.00	23.61	0.0000	0.0000	27.0381	27.0381	0.6657	0.6657	0.6657

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Parámetros de la función potencial de la pendiente promedio del PT a nivel de población

PARÁMETROS POBLACIÓN	
ap	3.15788644
bp	0.52781717
L _{LP}	58.2130328
H _{LP}	26.97767278

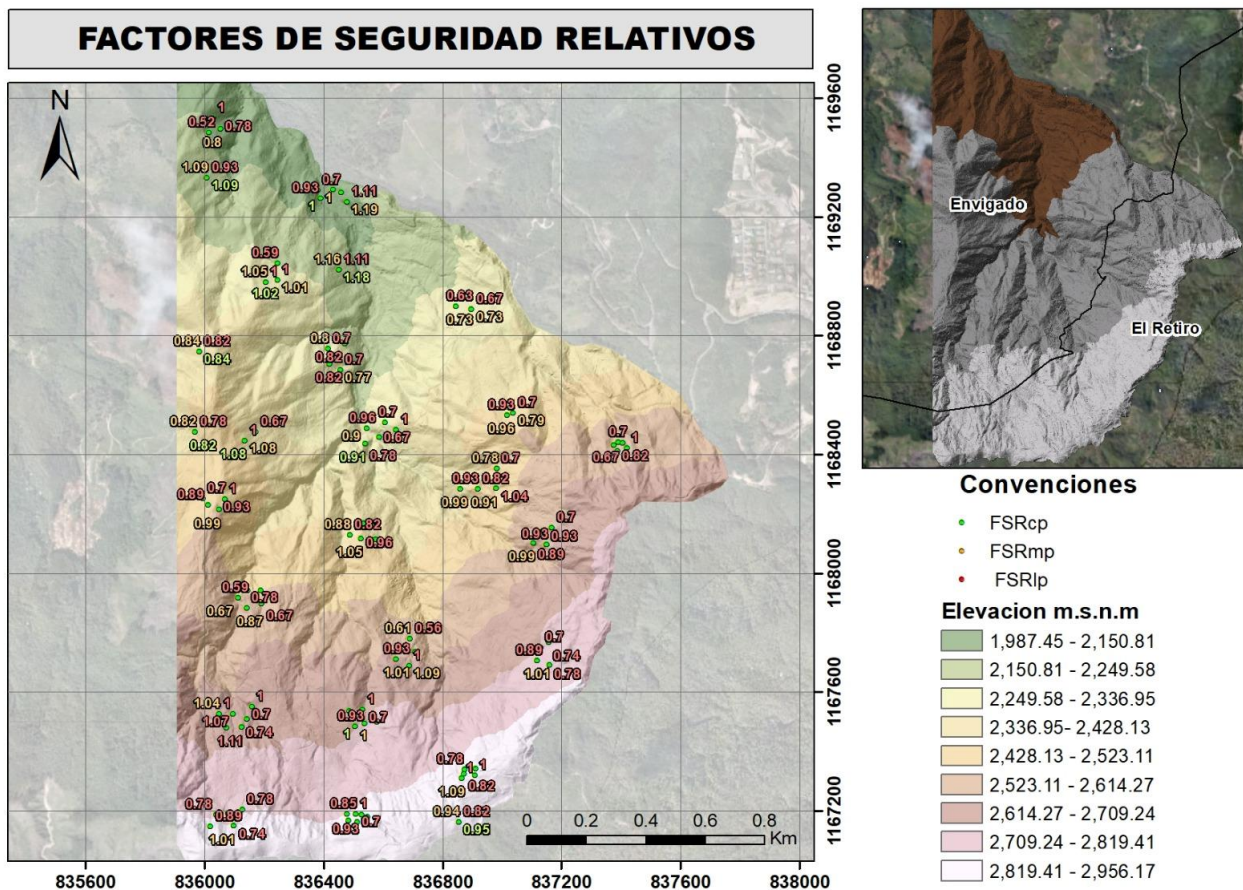
Fuente: Elaboración propia

6.5.1 MAPA DE SUSCEPTIBILIDADES DE LA VEREDA EL VALLANO

Finalmente, se generó un mapa de isovalores que representa los FSr al deslizamiento a corto, mediano y largo plazo en la vereda El Vallano, sector Astilleros del Municipio de Envigado Antioquia Colombia (Figuras 29-32). Este mapa se convierte en una herramienta visual clave para identificar áreas vulnerables a deslizamientos y facilitar la toma de decisiones en la gestión de riesgos.

Los mapas generados para las distintas categorías de tiempo (corto, mediano y largo plazo) están elaborados en una escala de 1:20.000, adecuada para llevar a cabo estudios regionales de zonificación geotécnica. Los factores de seguridad (FS) presentados reflejan valores relativos asociados al riesgo de deslizamiento, considerando únicamente las condiciones gravitacionales. Esto se basa en la geomorfología observada durante el periodo del estudio, tomando como referencia la topografía y la geología del área de interés, sin incluir variables adicionales como sismos o precipitaciones futuras.

Fig. 29 Mapa de susceptibilidades al deslizamiento en distintos horizontes temporales, Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.



Fuente: Elaboración propia.

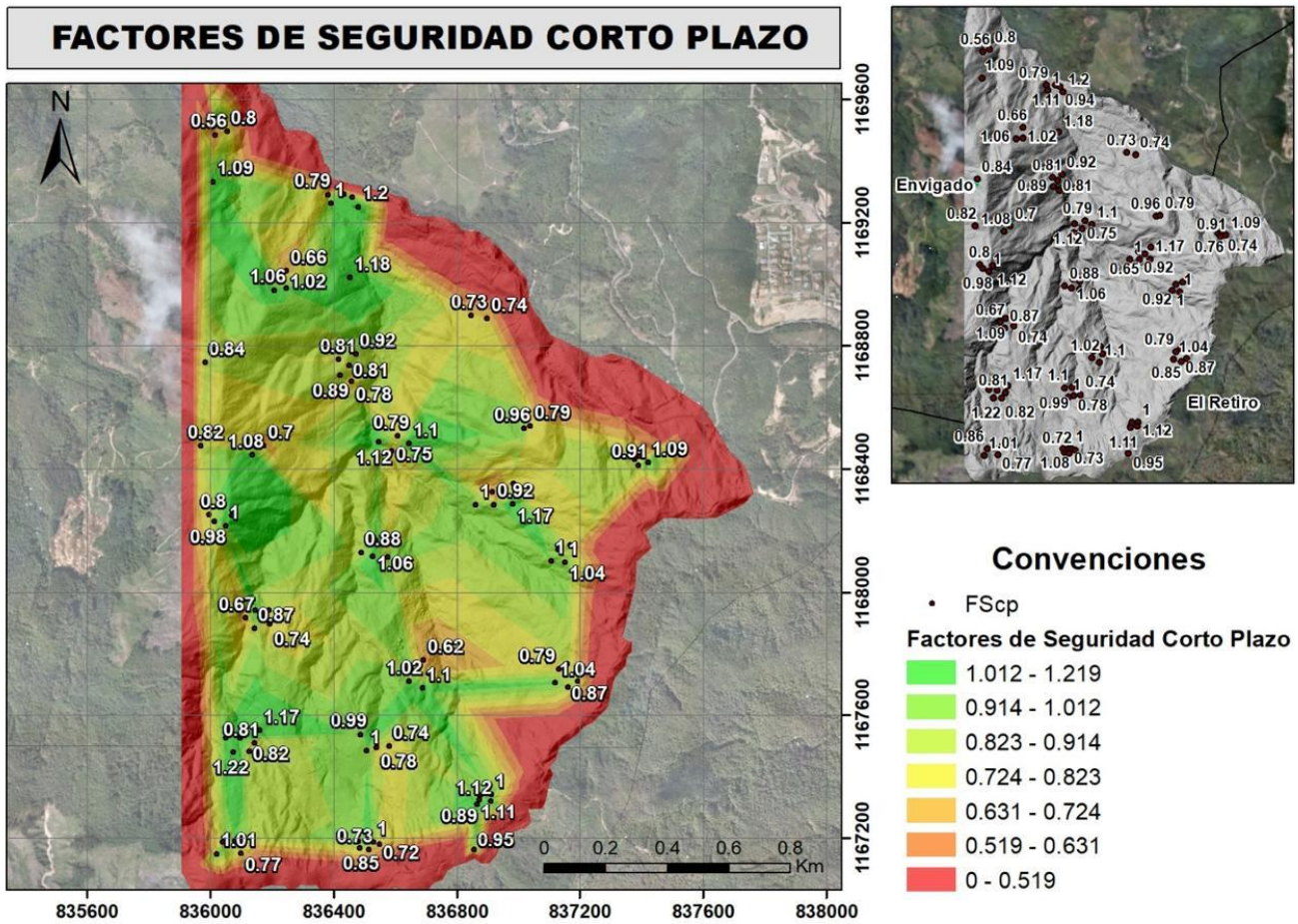


Fig. 30 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a corto plazo de la Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia.

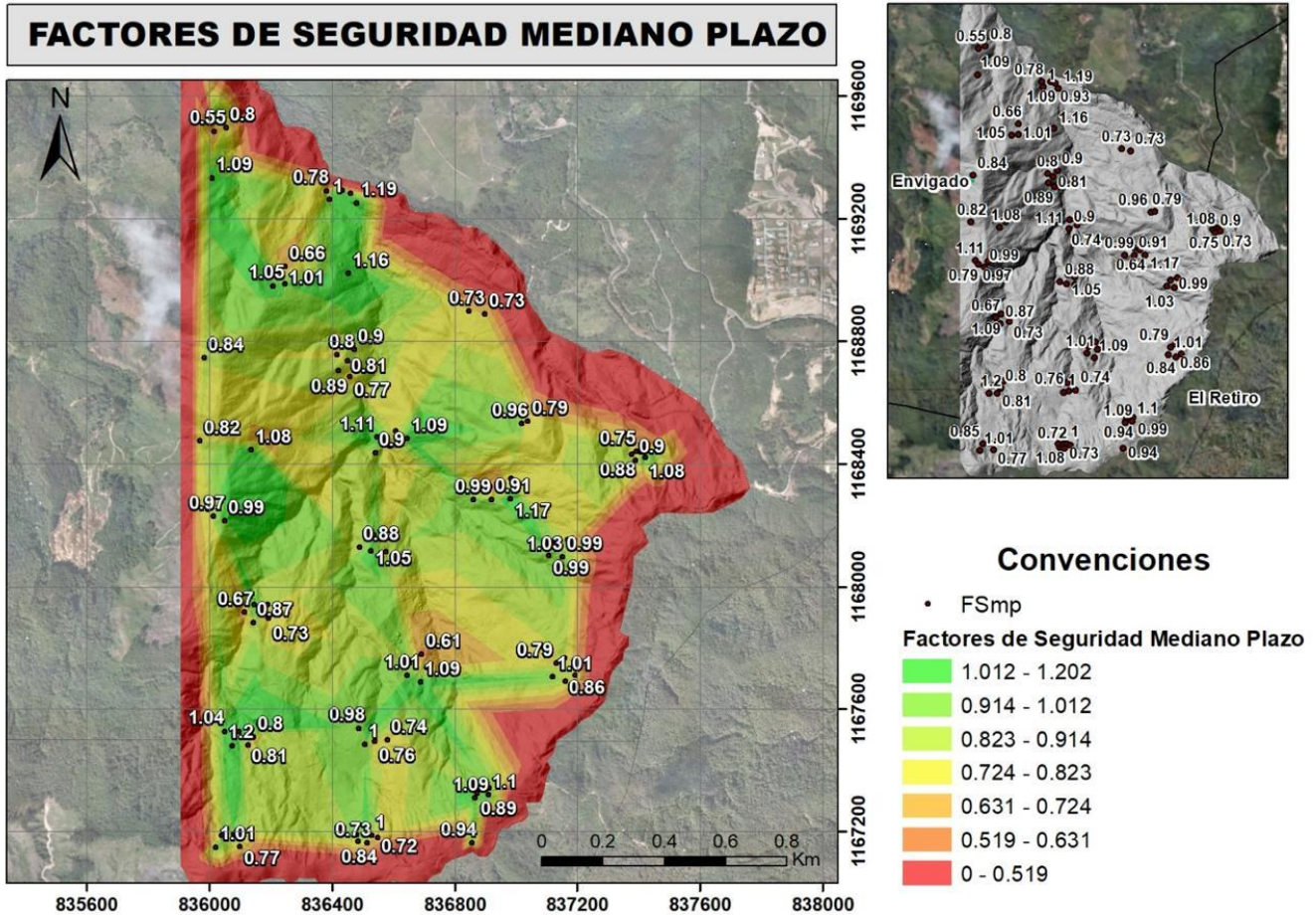


Fig. 31 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a mediano plazo de la Vereda El Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia

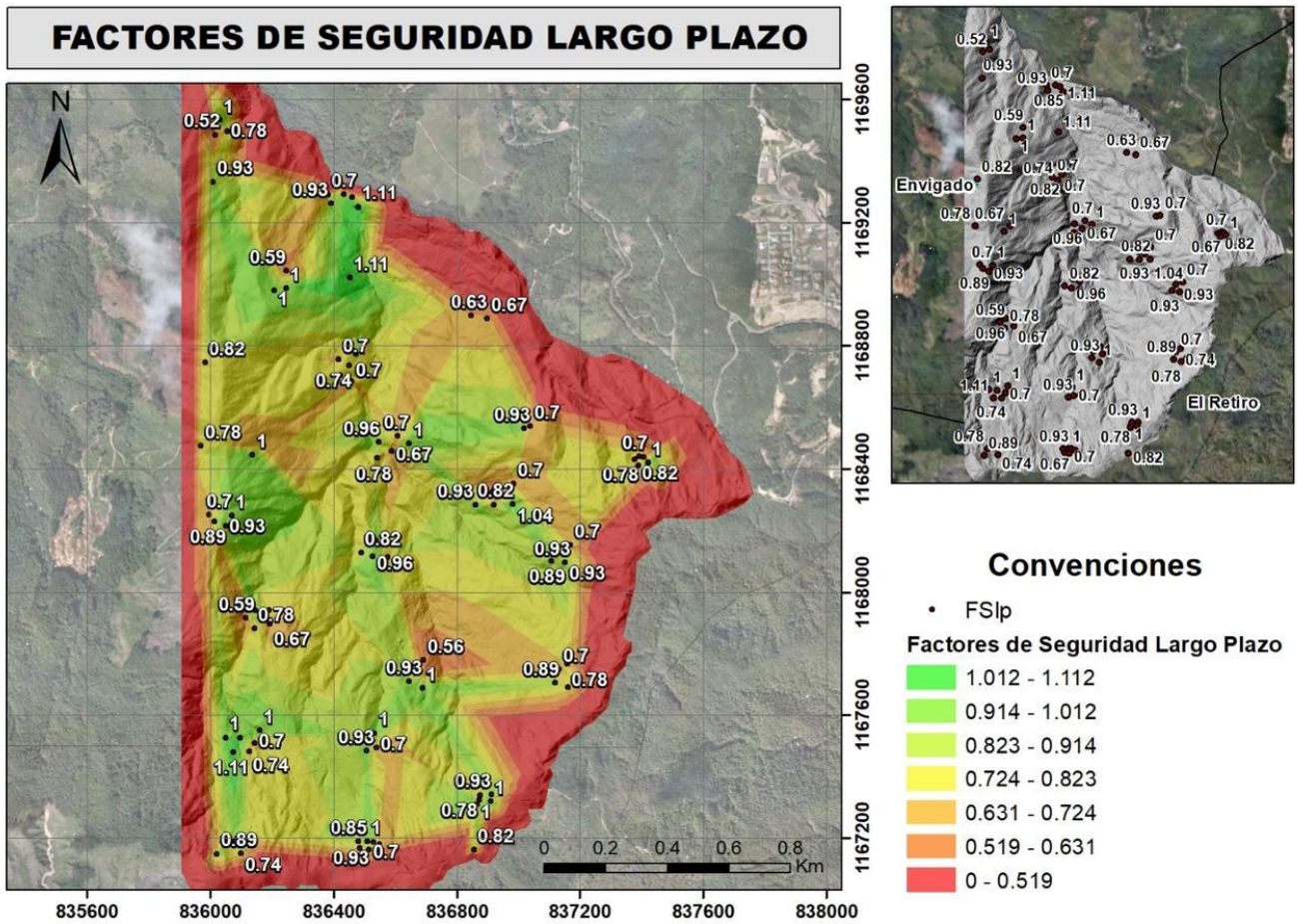


Fig. 32 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento a largo plazo de la Vereda el Vallano, Sector Astilleros Municipio de Envigado Antioquia.

Fuente: Elaboración propia

6.5.2 IDENTIFICACIÓN DE TALUDES SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS EN LA VEREDA EL VALLANO

En el segundo objetivo específico del estudio se abordó la identificación de áreas propensas a deslizamientos mediante la evaluación del FSlp, considerado en este contexto como un indicador de susceptibilidad a deslizamientos. Este índice establece una relación entre dos alturas, permitiendo analizar la estabilidad de los taludes en el marco de investigaciones a escala regional.

El análisis realizado a partir de los datos obtenidos en el FS permitió evaluar la estabilidad de los taludes en el sector Astilleros de la vereda El Vallano, Municipio de Envigado, Antioquia-Colombia. La Tabla

21 muestra la identificación de los FS de los 98 taludes con base en sus parámetros geométricos y alturas críticas, considerando tres horizontes temporales: corto, mediano y largo plazo. Los valores obtenidos reflejan que algunos taludes presentan inestabilidad crítica, especialmente en el largo plazo, con factores de seguridad menores a 1. Por ejemplo, el talud 2 con un FS de 0.7918 en el corto plazo disminuyó a 0.7767 en el largo plazo, evidenciando un deterioro progresivo de la estabilidad.

La Tabla 22, clasifica los taludes en función de su FS en cuatro rangos de susceptibilidad: alta (FS < 0.724), media (FS entre 0.724 y 0.914), baja (FS entre 0.914 y 1) y estable (FS > 1). Esta clasificación, evaluada en tres horizontes temporales (corto, mediano y largo plazo), proporciona un panorama sobre la estabilidad progresiva de los taludes de la vereda El Vallano.

Con **susceptibilidad alta**, los taludes muestran un aumento significativo en su número a lo largo del tiempo, lo que indica un progresivo incremento de áreas en condiciones críticas de estabilidad. En el corto plazo, se registraron 8 taludes en esta categoría, lo cual representa sectores específicos con alto riesgo de deslizamientos desde el inicio. Este número aumenta a 10 en el mediano plazo, y se eleva aún más en el largo plazo, alcanzando 27 taludes. Este comportamiento sugiere que, con el tiempo, un número considerable de taludes previamente en categorías de menor riesgo migra hacia condiciones de alta susceptibilidad, demandando intervenciones urgentes en estas áreas para mitigar el riesgo de movimientos en masa.

Con **susceptibilidad media**, los taludes presentan una leve fluctuación a lo largo de los períodos analizados. En el corto plazo, 40 taludes se ubicaron en esta categoría. Este número aumenta ligeramente a 43 en el mediano plazo, reflejando un cambio hacia mayores niveles de susceptibilidad. Sin embargo, en el largo plazo, el número de taludes en esta categoría disminuye a 35, probablemente debido a que algunos taludes de susceptibilidad media han evolucionado hacia una categoría de mayor riesgo, como alta susceptibilidad, mientras que otros pueden haber migrado a la categoría baja.

Con **susceptibilidad baja**, los taludes permanecen relativamente constantes en el corto y mediano plazo, con 14 y 15 taludes, respectivamente. Esta estabilidad inicial sugiere que estos taludes tienen un nivel de riesgo moderadamente bajo. Sin embargo, en el largo plazo, el número de taludes en esta categoría aumenta a 21, lo cual puede ser indicativo de taludes previamente estables que han comenzado a experimentar un deterioro en su estabilidad, desplazándose hacia una categoría de mayor susceptibilidad.

Con susceptibilidad estable, los taludes experimentaron una disminución significativa a lo largo del tiempo, lo que refleja una pérdida de estabilidad progresiva en el terreno. En el corto plazo, 36 taludes fueron clasificados como estables, destacando una mayoría que inicialmente posee condiciones seguras. Sin embargo, esta cifra se reduce a 30 en el mediano plazo y disminuye drásticamente a 15 en el largo plazo. Esta tendencia indica que muchos taludes inicialmente estables han migrado hacia categorías de mayor susceptibilidad, debido posiblemente a factores de deterioro como la erosión, las condiciones climáticas cambiantes, y las actividades humanas lo que resalta la importancia de adoptar medidas preventivas, como las técnicas de bioingeniería, para garantizar la estabilidad de los taludes en la vereda El Vallano y proteger las áreas que aún mantienen condiciones estables, promoviendo así la sostenibilidad y la seguridad del entorno.

Este análisis refleja cómo la estabilidad de los taludes en la vereda el Vallano se ve comprometida con el tiempo, con una migración progresiva de taludes desde las categorías de baja y estable hacia media y alta susceptibilidad. La identificación de estos patrones temporales subraya la necesidad de monitorear continuamente los taludes y de priorizar las intervenciones en aquellos sectores con mayores niveles de riesgo para mitigar el impacto de posibles deslizamientos en el sector.

Tabla 21. Factores de Seguridad de los 98 taludes identificados en la vereda el Vallano

FAMILIA	COORDENADAS DEL CENTROIDE		PARAMETROS GEOMÉTRICOS		ALTURAS CRÍTICAS				FACTORES DE SEGURIDAD		
					Hom	Homt	Corto Plazo	Mediano plazo	Corto Plazo	Mediano plazo	Largo plazo
	X	Y	HLD	LLD	Hcp	Hmp	FScp	FSmp	FSlp		
1	836029.3457	1169532.1810	27.00	43.48	1.0309	0.9413	26.0073	26.0968	1.0382	1.0346	0.9986
2	836052.7015	1169496.6990	21.00	30.18	0.5146	0.4538	26.5235	26.5844	0.7948	0.7899	0.7767
3	836014.0392	1169485.1591	14.00	24.38	1.7844	1.7061	25.2538	25.3321	0.5544	0.5527	0.5178
4	836007.7176	1169332.9317	25.00	57.81	4.1457	4.0778	22.8925	22.9604	1.0921	1.0888	0.9246
5	836205.674	1168981.2092	27.00	58.21	1.2386	1.1738	25.7995	25.8644	1.0465	1.0439	0.9986
6	836244.5552	1168986.6175	27.00	46.20	0.3324	0.2199	26.7058	26.8183	1.0110	1.0068	0.9986
7	836246.0386	1169043.9785	16.00	42.58	3.0754	3.0719	23.9627	23.9662	0.6677	0.6676	0.5918
8	836452.0366	1169021.2356	30.00	44.67	0.9665	0.7778	26.0717	26.2603	1.3507	1.1424	1.1095
9	836845.4355	1168899.8483	17.00	47.77	3.6468	3.5172	23.9914	23.5210	0.7268	0.7228	0.6287
10	836897.7718	1168889.1968	18.00	59.87	3.1058	2.8259	23.9324	24.2122	0.7521	0.7434	0.6657
11	835981.3692	1168746.5589	26.00	44.71	1.1460	0.9123	25.8921	26.1258	1.0042	0.9952	0.9616
12	835968.6359	1168716.2215	23.00	40.39	1.5680	1.4710	25.4702	25.5672	0.9030	0.8996	0.8507
13	836172.1305	1168476.9238	27.00	58.43	5.5613	5.4929	21.4768	21.5453	1.2572	1.2532	0.9986
14	836135.9133	1168446.1128	23.00	40.86	2.5473	2.4803	24.4908	24.5578	0.9391	0.9366	0.8507
15	837018.2958	1168532.2468	26.00	38.11	0.3774	0.2451	26.6608	26.7931	0.9752	0.9704	0.9616
16	837038.0589	1168539.3247	21.00	33.28	0.7673	0.5800	26.2708	26.4582	0.7994	0.7937	0.7767
17	836483.8973	1167167.9558	22.00	29.06	0.1083	0.0485	26.9298	26.9896	0.8169	0.8151	0.8137
20	836527.1755	1167186.873	18.00	23.61	0	0	27.0381	27.0381	0.6657	0.6657	0.6657
21	836854.3753	1167163.6698	22.00	50.87	3.8970	3.5648	23.0807	23.4129	0.9532	0.9397	0.8155
22	836513.1693	1167162.9633	19.00	41.24	0.9850	0.8954	25.9927	26.0823	0.7310	0.7285	0.7043
23	836546.9675	1167180.5055	18.00	45.67	1.9680	1.8954	25.0097	25.0823	0.7197	0.7176	0.6672
24	836871.0509	1167324.8334	22.00	58.25	2.3595	2.1255	24.6182	24.8522	0.8936	0.8852	0.8155
25	836874.632	1167340.6966	21.00	46.41	4.8597	4.5987	22.1180	22.3789	0.9495	0.9384	0.7784
26	836911.1838	1167342.2630	25.00	55.23	1.9680	1.7855	25.0097	25.1922	0.9996	0.9924	0.9267
27	836865.1034	1167309.9601	27.00	51.25	2.5964	2.2370	24.3813	24.7407	1.1074	1.0913	1.0008
28	836908.7633	1167321.2439	27.00	46.78	2.7845	2.4588	24.1932	24.5189	1.1160	1.1012	1.0008
29	837076.1586	1168432.9813	21.00	59.24	3.2569	3.0255	23.7208	23.9522	0.8853	0.8767	0.7784
30	837391.7116	1168441.8360	19.00	41.89	1.8964	1.6987	25.0813	25.2789	0.7575	0.7516	0.7043
31	837406.0526	1168438.1447	18.00	43.89	2.5610	2.3659	24.4167	24.6117	0.7372	0.7314	0.6672
32	837388.2069	1168413.2697	22.00	44.25	2.7894	2.5986	24.1883	24.3790	0.9095	0.9024	0.8155
33	837419.4253	1168422.2154	27.00	38.29	2.1247	1.9855	24.8530	24.9922	1.0864	1.0803	1.0008
34	836433.1871	1169291.7498	26.00	47.83	3.5680	3.1548	23.4097	23.8229	1.1107	1.0914	0.9638
35	836460.4417	1169283.2953	23.00	35.49	2.4879	2.1259	24.4898	24.8518	0.9302	0.9255	0.8526
36	836380.0876	1169291.1400	19.00	29.84	2.7894	2.5648	24.1883	24.4129	0.7855	0.7783	0.7043
37	836389.3709	1169262.1297	25.00	39.87	1.9857	1.8957	24.9920	25.0819	1.0003	0.9967	0.9267
38	836479.1036	1169251.5534	30.00	34.52	1.8975	1.7846	25.0802	25.1931	1.1962	1.1908	1.1120
39	836034.5874	1168279.5296	29.00	39.87	2.8964	2.5685	24.0813	24.4092	1.2043	1.1881	1.0750
40	835993.6316	1168251.2957	19.00	59.25	3.2540	3.0260	23.7237	23.9517	0.8009	0.7933	0.7043
41	836011.0631	1168230.5027	24.00	49.69	2.5640	2.2689	24.4137	24.7087	0.9831	0.9713	0.8896
42	836068.3717	1168250.2782	27.00	37.98	2.7846	2.5689	24.1931	24.4087	1.1160	1.1062	1.0008
43	836048.3472	1168214.5169	25.00	29.78	1.9854	1.7855	24.9923	25.1922	1.0003	0.9924	0.9267
44	837128.0314	1168138.9013	23.00	57.34	1.9854	1.7892	24.9923	25.1885	0.9203	0.9131	0.8526
45	837168.3182	1168153.0940	19.00	42.89	2.8547	2.6894	24.1230	24.2883	0.7876	0.7823	0.7043
46	837106.1127	1168102.1747	24.00	49.36	3.0875	2.8548	23.8902	24.1229	1.0046	0.9949	0.8896
47	837150.2998	1168096.4274	25.00	37.85	2.8569	2.6895	24.1208	24.2881	1.0365	1.0293	0.9267
48	837150.2998	1168096.4274	25.00	35.96	1.8948	1.6986	25.0829	25.2791	0.9967	0.9890	0.9267
49	836047.8731	1167528.1951	27.00	47.21	0.9855	0.8955	25.9922	26.0822	1.0388	1.0352	1.0008
50	836095.1619	1167526.4732	29.00	41.89	1.5697	1.3568	25.4080	25.6208	1.1414	1.1319	1.0750
51	836072.4291	1167481.6828	30.00	49.25	2.3657	2.0126	24.6120	24.9651	1.2189	1.2017	1.1120
52	836124.2952	1167483.8118	20.00	35.89	2.6985	2.3265	24.2792	24.6512	0.8238	0.8113	0.7414
53	836143.062	1167510.5842	19.00	39.78	3.5687	3.2659	23.4090	23.7118	0.8117	0.8013	0.7043
54	836158.6102	1167551.4616	27.00	29.54	3.9854	3.5699	22.9923	23.4078	1.1743	1.1535	1.0008
55	836539.9453	1168436.1052	21.00	34.23	3.8945	3.5649	23.0832	23.4128	0.9098	0.8969	0.7784
56	836544.6188	1168488.0691	26.00	54.55	3.7894	3.5699	23.1883	23.4078	1.1213	1.1107	0.9638
57	836587.3655	1168458.6108	18.00	49.23	2.8721	2.5699	24.1056	24.4078	0.7467	0.7375	0.6672
58	836606.4521	1168507.0495	19.00	55.78	2.9856	2.5698	23.9921	24.4078	0.7919	0.7784	0.7043
59	836644.5119	1168483.6032	27.00	48.96	2.4587	2.2366	24.5190	24.7411	1.1012	1.0913	1.0008
60	836572.4216	1168158.3933	20.00	31.98	2.6597	2.4240	24.3180	24.5537	0.8224	0.8145	0.7414
61	836575.105	1168114.1321	22.00	37.96	3.5687	2.2365	23.4090	24.7411	0.9398	0.8892	0.8155
62	836535.856	1168168.1081	26.00	44.89	2.3698	2.1549	24.6079	24.8228	1.0566	1.0474	0.9638
63	836526.6381	1168116.5303	26.00	50.96	2.3660	2.1222	24.6117	24.8555	1.0564	1.0460	0.9638
64	836487.9192	1168129.8682	22.00	48.26	2.0360	1.9658	24.9417	25.0119	0.8821	0.8796	0.8155
65	837191.8229	1167711.2631	20.00	53.96	3.5689	3.2658	23.4088	23.7118	0.8544	0.8435	0.7414
66	837159.4283	1167692.2858	21.00	60.89	2.9645	2.5689	24.0132	24.4087	0.8745	0.8603	0.7784
67	837157.3957	1167767.4036	20.00	58.96	3.2654	3.0236	23.7123	23.9541	0.8434	0.8349	0.7414
68	837130.4735	1167749.8824	19.00	52.78	2.9643	2.8957	24.0134	24.0820	0.7912	0.7890	0.7043
69	837118.4095	1167706.4030	24.00	48.69	3.8546	3.2660	23.1231	23.7117	1.0379	1.0122	0.8896
70	836691.1659	1167780.8435	15.00	49.25	2.7459	2.5649	24.2318	24.4128	0.6190	0.6144	0.5560
71	836651.0259	1167751.9944	23.00	39.45	1.9568	1.7547	25.0209	25.2230	0.9192	0.9119	0.8526
72	836707.2898	1167735.9938	17.00	59.58	3.5689	3.2357	23.4087	23.7420	0.7262	0.7160	0.6302
73	836643.9442	1167712.2651	25.00	38.95	2.3949	2.1259	24.5828	24.8518	1.0170	1.0060	0.9267
74	836686.961	1167689.0331	27.00	55.64	2.3660	2.1954	24.6117	24.7823	1.0970	1.0895	1.0008
75	836457.0063	1168684.4047	19.00	59.26	2.5698	2.3660	24.4079	24.6117	0.7784	0.7720	0.7043
76	836419.3645	1168704.5379	22.00	55.96	2.3546	2.1459	24.6231	24.8318	0.8935	0.8860	0.8155
77	836448.5752	1168737.2899	20.00	59.56	2.3645	2.1366	24.6132	24.8411	0.8126	0.8051	0.7414
78	836415.9353	1168755.9881	19.00	58.98	3.5684	3.1259	23.4093	23.8518	0.8116	0.7966	0.7043
79	836471.2496	1168772.9285	22.00	45.89	2.9864	2.5699	23.9913	24.4078	0.9170	0.9014	0.8155
80	836126.3714	1167206.3638	21.00	50.85	3.2658	3.0215	23.7119	23.9561	0.8856	0.8766	0.7784
81	836079.3699	1167192.1381	25.00	55.59	2.4587	2.2354	24.5190	24.7423	1.0196	1.0104	0.9267
82	836098.6413	1167151.2530	20.00	48.26	1.0265	0.9855	25.9512	25.9922	0.7707	0.7695	0.7414
83	836037.6326	1167187.6864	21.00	44.42	2.5984	2.3660	24.3793	24.6117	0.8614	0.8533	0.7784
84	836020.1609	1167149.7486	24.00	39.85	3.2659	3.1255	23.7118	23.8522	1.0122	1.0062	0.8896
85	836983.6604	1168352.6874	19.00	41.89	2.9654	2.7457	24.0123	24.2320	0.7913	0.7841	0.7043
86	836914.1457	1168326.6878	15.00	58.47	2.5684	2.3564	24.4093	24.6213	0.6145	0.609	

Tabla 22. Cantidad de taludes según susceptibilidad

		CANTIDAD DE TALUDES SEGÚN SUSCEPTIBILIDAD		
RANGO	SUSCEPTIBILIDAD	Corto Plazo	Mediano plazo	Largo plazo
0 - 0.724	ALTA	8	10	27
0.724 - 0.914	MEDIA	40	43	35
0.914 - 1	BAJA	14	15	21
Mayor a 1	ESTABLE	36	30	15

RANGOS	ALTO	MEDIO	BAJO	ESTABLE
	0.0000	0.7240	0.9140	1.0000

Fuente: Elaboración propia

6.6 RECOMENDACIONES DE BIOINGENIERÍA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA VEREDA VALLANO

Las recomendaciones en bioingeniería para la estabilidad de taludes se derivan directamente del cumplimiento del objetivo específico 3, cuyo propósito fue “Realizar recomendaciones de técnicas de bioingeniería para la estabilización de los taludes naturales identificados con alta susceptibilidad al aplicar la MTN”. Estos taludes fueron determinados mediante el FSr, detallados en el numeral 6.6, a través de la aplicación de la MTN. Las recomendaciones están respaldadas por una revisión de la literatura sobre estrategias de bioingeniería aplicadas en contextos similares. Las técnicas recomendadas buscan mejorar la estabilidad de los taludes mediante el uso eficiente de recursos naturales, promoviendo prácticas que combinen efectividad técnica con sostenibilidad ambiental. A continuación, se presentan las recomendaciones de bioingeniería específicas para cada tipo de problema identificado.

6.6.1 PROBLEMAS DE EROSIÓN SUPERFICIAL EN TALUDES NATURALES

La erosión superficial en taludes naturales es una preocupación significativa, especialmente en áreas con suelos expuestos o escasa vegetación. Este proceso, caracterizado por la pérdida gradual de las capas superficiales del suelo debido a la acción del agua y el viento, se ve exacerbado en zonas de fuertes

pendientes y bajo condiciones climáticas adversas. Su impacto no solo afecta la estabilidad del terreno, sino también la calidad ambiental y la sostenibilidad de infraestructuras construidas sobre estos suelos.

Una de las técnicas más utilizadas para mitigar este problema es la hidrosiembra, que consiste en aplicar una mezcla de semillas, fertilizantes, agentes aglutinantes y, en ocasiones, estabilizadores de suelo sobre la superficie del talud. Esta técnica promueve una rápida revegetación, reduciendo significativamente la erosión al incrementar la cohesión del suelo y limitar la acción erosiva. Según el "Manual de Técnicas de Estabilización Biotécnica en Taludes de Infraestructuras de Obra Civil" publicado en 2014, la hidrosiembra es una técnica recomendada para el control de la erosión superficial en taludes de infraestructuras civiles [48]. Investigaciones recientes también destacan que las técnicas biológicas, como la revegetación con gramíneas y leguminosas, son más efectivas para reducir la pérdida anual de suelo en comparación con técnicas de manejo del suelo o soluciones de ingeniería [49], [50].

Otra solución efectiva para controlar la erosión es el uso de mantas biodegradables fabricadas con materiales naturales ya que proporcionan una protección adicional contra la erosión al reducir el impacto directo de la lluvia y mejorar la infiltración. El mismo manual destaca la eficacia de estas mantas en la protección de taludes contra la erosión superficial [48]. Además, estudios han demostrado que el uso de geotextiles biodegradables no solo facilita la revegetación, sino que también reduce significativamente la erosión en pendientes pronunciadas al absorber el impacto del agua y estabilizar las partículas del suelo [51], [52]. Un estudio llevado a cabo en pendientes con diferentes inclinaciones encontró que los geotextiles biodegradables, como el coco y el yute, son particularmente útiles durante las etapas iniciales de estabilización, ya que mantienen el suelo en su lugar mientras las raíces de las plantas se desarrollan [52].

La erosión superficial en taludes naturales es un problema crítico, especialmente en áreas montañosas y pendientes pronunciadas donde las condiciones climáticas y del terreno agravan el riesgo de degradación del suelo (referencia). En este contexto, un estudio publicado en 2023 por Vargas Rojas en la Universidad Cooperativa de Colombia enfatiza la importancia de seleccionar especies vegetales adecuadas para la estabilización de taludes [53]. Por ejemplo, las gramíneas y otras plantas con sistemas radiculares densos y profundos mejoran significativamente la estabilidad del suelo al proporcionar una red natural de soporte que reduce el riesgo de deslizamientos y pérdida de material por erosión. La recomendación de Vargas-Rojas se alinea con la investigación realizada por Krautzer et al, los cuales proporcionan evidencia clave sobre la eficacia de las técnicas de recultivación y el uso de mezclas de semillas adaptadas al entorno para estabilizar terrenos afectados [54]. Este estudio se desarrolló en cinco

sitios experimentales en los Alpes, a altitudes que oscilaron entre 1,245 y 2,350 metros sobre el nivel del mar, con el objetivo de diseñar estrategias de restauración eficaces en condiciones de alta montaña [54].

Uno de los hallazgos más significativos de la investigación fue la importancia de lograr una cobertura vegetal superior al 70% para garantizar la estabilidad del suelo y minimizar la erosión a largo plazo. En las primeras etapas de restauración, el uso de coberturas protectoras como mantillos resultó ser esencial para prevenir el drenaje superficial y la pérdida de suelo, proporcionando un entorno propicio para la germinación y el crecimiento inicial de las plantas. Asimismo, las mezclas de semillas específicas del sitio demostraron ser más efectivas que las comerciales, especialmente en condiciones climáticas extremas y terrenos altamente inclinados. Estas mezclas, que incluyeron gramíneas y leguminosas alpinas nativas, mostraron mayor persistencia y capacidad para adaptarse al entorno, garantizando una protección duradera contra la erosión [54].

Por otro lado, las enmiendas químicas como la poliacrilamida (PAM) combinada con yeso son opciones prometedoras para mejorar la cohesión del suelo y reducir la pérdida de partículas durante eventos de lluvia intensa. Estas enmiendas estabilizan las partículas del suelo, mejorando sus propiedades físicas y facilitando el establecimiento de vegetación. Según Akbarzadeh et al. (2009), la combinación de PAM con yeso puede reducir las pérdidas de suelo en pendientes empinadas en casi un 99%, convirtiéndola en una estrategia viable para condiciones extremas [55].

Finalmente, la planificación y el diseño adecuados de los taludes son fundamentales para minimizar la erosión. Técnicas como la construcción de terrazas, drenajes de contra pendiente y bancos nivelados son efectivas para reducir la velocidad del agua y disminuir la capacidad de arrastre de partículas del suelo. Estas técnicas, combinadas con revegetación y estabilización química, ofrecen soluciones sostenibles para el control de la erosión en taludes naturales [56].

En síntesis, la erosión superficial en taludes naturales es un desafío complejo que requiere un enfoque integral y adaptado a las condiciones locales. La combinación de técnicas biológicas, como la hidrosiembra y la selección de especies adecuadas, con soluciones físicas, como mantas biodegradables y geotextiles, y químicas, como las enmiendas estabilizadoras, puede ofrecer resultados efectivos y sostenibles. Según la literatura es importante adoptar enfoques específicos para cada contexto, teniendo en cuenta factores como la altitud, la inclinación del terreno y las condiciones climáticas, para garantizar la sostenibilidad y la efectividad de las intervenciones a largo plazo.

6.6.2 TALUDES NATURALES CON POSIBLES DESLIZAMIENTOS LENTOS O MOVIMIENTOS DE MASA

Los deslizamientos lentos y movimientos de masa en taludes naturales representan un riesgo significativo en áreas con suelos inestables, propensas a la erosión o con alta saturación de agua. Para abordar estos riesgos, las técnicas de estabilización biotécnica han demostrado ser eficaces al combinar elementos vegetales y estructuras físicas, fomentando tanto la estabilización del terreno como la integración ambiental.

Entre estas técnicas, el uso de fascinas o estructuras de enmaderamiento es una solución efectiva. Estas estructuras consisten en la disposición horizontal de troncos o ramas a lo largo del talud, lo que ayuda a frenar el movimiento del suelo y a retener material suelto. Según el "Manual de Técnicas de Estabilización Biotécnica en Taludes de Infraestructuras de Obra Civil", las fascinas son particularmente recomendadas para estabilizar taludes con riesgo de deslizamientos superficiales, ya que su implementación es sencilla y proporciona una estabilización inmediata mientras la vegetación circundante se desarrolla para reforzar el terreno [48].

Un estudio realizado en 2019, destacó que las fascinas son particularmente eficaces cuando se combinan con especies vegetales como los sauces (*Salix spp.*) y álamos (*Populus spp.*). La plantación de árboles y arbustos con sistemas radiculares profundos, añade una capa adicional de seguridad al suelo. Estas especies vegetales desarrollan raíces que penetran en capas profundas, mejorando la cohesión del terreno y reduciendo el riesgo de deslizamientos de mayor magnitud [57]. Según Vargas-Rojas, estas plantas también contribuyen a controlar la infiltración de agua en el terreno, evitando la saturación excesiva que suele ser uno de los principales factores desencadenantes de los movimientos de masa [53].

Otra técnica efectiva es la construcción de biomuros, estructuras que combinan plantas con materiales como piedra o madera para estabilizar el terreno. Estos muros vivos no solo aportan resistencia adicional en zonas con riesgo de deslizamiento, sino que también se integran estéticamente al entorno natural, ofreciendo beneficios a largo plazo tanto en términos de estabilidad como de recuperación ambiental. El "Manual de Técnicas de Estabilización Biotécnica en Taludes de Infraestructuras de Obra Civil", detalla que los biomuros son especialmente útiles en áreas con pendiente pronunciada y suelos inestables, donde pueden combinarse con otras soluciones biotécnicas para maximizar su efectividad [48].

El manejo adecuado del agua superficial y subsuperficial es esencial para la estabilización de taludes, ya que el exceso de agua en el suelo puede disminuir significativamente su resistencia al corte y generar

condiciones favorables para deslizamientos y movimientos de masa. Los sistemas de drenaje subsuperficial se destacan como una de las soluciones más efectivas para reducir la presión de poros y estabilizar taludes. Según Urciuoli & Pirone [58], este tipo de drenaje disminuye los niveles freáticos en suelos saturados, mejorando su resistencia mecánica y reduciendo las fuerzas de empuje hidráulicas que comprometen la estabilidad del terreno. Estas estrategias son especialmente relevantes en áreas con alta infiltración de agua o precipitaciones frecuentes, donde la saturación puede provocar deslizamientos.

El uso simultáneo de sistemas de drenaje superficial y subsuperficial ha demostrado ser una técnica ampliamente efectiva y adaptable. Estudios han sugerido que estas soluciones deben diseñarse considerando las características específicas del suelo y las condiciones del agua subterránea en cada lugar. La combinación de ambos sistemas permite mitigar tanto la infiltración como la acumulación de agua, disminuyendo el riesgo de deslizamientos incluso en taludes con pendientes pronunciadas. En este sentido, el diseño integrado es crucial para maximizar la eficacia de las intervenciones y minimizar el impacto en el entorno [59]. Adicionalmente, los drenajes horizontales y subsuperficiales han demostrado ser particularmente efectivos en la mitigación de movimientos lentos de taludes y en la prevención de deslizamientos en áreas con pendientes críticas. Pawlak et al., describen cómo estos sistemas permiten reducir rápidamente los niveles freáticos tras su instalación, mejorando la estabilidad del suelo en un corto período de tiempo [60]. Este método es especialmente útil en terrenos con inclinaciones pronunciadas y condiciones de saturación elevada, donde el manejo del agua resulta determinante para prevenir colapsos del talud.

Para el diseño sostenible y el mantenimiento de los sistemas de drenaje son aspectos clave para garantizar su efectividad a largo plazo. Carder et al., destacan la importancia de incorporar estrategias de bioingeniería, como la revegetación con especies autóctonas, en el diseño de estos sistemas [61]. La integración de vegetación no solo mejora la sostenibilidad de los proyectos al promover la regeneración ecológica, sino que también reduce significativamente los costos operativos asociados con el mantenimiento periódico. Además, la vegetación contribuye a estabilizar el suelo mediante la mejora de la cohesión y la reducción de la infiltración excesiva.

Por otro lado, el control de agua superficial también desempeña un papel fundamental para evitar la infiltración y reducir el riesgo de deslizamientos. Haugen, enfatiza que un diseño adecuado de canales de desvío y zanjas de infiltración puede prevenir la acumulación de agua en áreas críticas, minimizando la saturación del terreno [62]. Este enfoque es crucial en terrenos con características geotécnicas

complejas, donde la infiltración no controlada puede agravar la inestabilidad y desencadenar deslizamientos.

Considerando lo anterior, el manejo del agua superficial y subsuperficial constituye un pilar fundamental para la estabilización de taludes, especialmente en áreas propensas a deslizamientos y saturación del terreno. Las estrategias combinadas, que integran sistemas de drenaje con técnicas de bioingeniería, no solo maximizan la estabilidad del suelo, sino que también promueven la sostenibilidad y resiliencia ambiental. Diseños bien planificados y adaptados a las condiciones locales pueden ofrecer soluciones duraderas y eficientes, reduciendo tanto los riesgos geotécnicos como los costos asociados a su mantenimiento.

6.6.3 TALUDES NATURALES CON POSIBLES DESLIZAMIENTOS POR SATURACIÓN DEL SUELO

La saturación del suelo es un factor crítico que puede desencadenar deslizamientos en taludes naturales. La implementación de zanjas de infiltración o drenaje en puntos estratégicos del talud, combinadas con la plantación de vegetación que absorba agua y refuerce el suelo, es una medida efectiva para canalizar el agua y reducir la saturación. El "Manual de Técnicas de Estabilización Biotécnica en Taludes de Infraestructuras de Obra Civil" recomienda esta práctica para mejorar el drenaje y la estabilidad de los taludes [48].

El uso de especies fitorremediadoras, como el sauce o el álamo, que son eficientes en la absorción de agua, ayuda a disminuir la saturación en zonas vulnerables. Estas plantas contribuyen a reducir el contenido de humedad del suelo, incrementando su resistencia al corte y disminuyendo el riesgo de deslizamientos. El estudio de Vargas-Rojas resalta la importancia de seleccionar especies vegetales adecuadas para la estabilización de taludes, enfatizando el papel de las especies fitorremediadoras en la reducción de la saturación del suelo [53].

La instalación de barreras vivas, como setos formados por filas de árboles o arbustos, ayuda a controlar la acumulación de agua y reduce la erosión, mientras estabiliza el suelo con sus raíces. Estas barreras actúan como filtros naturales que disminuyen la velocidad del agua superficial y promueven la

infiltración, contribuyendo a la estabilidad del talud. El manual de técnicas de estabilización describe la implementación y beneficios de las barreras vivas en la estabilización de taludes [48].

6.6.4 TALUDES NATURALES MUY INCLINADOS O ROCOSOS

Los taludes naturales muy inclinados o rocosos representan desafíos significativos en términos de estabilidad estructural y sostenibilidad ambiental. Las técnicas de bioingeniería han emergido como alternativas efectivas y ecológicamente responsables frente a los métodos convencionales, utilizando materiales vivos, como plantas y estructuras biodegradables, para estabilizar el terreno y fomentar la restauración de ecosistemas degradados.

Bajo estas condiciones, las estructuras de bioingeniería conocidas como "soil bioengineering cribs" ofrecen un enfoque prometedor. Estas soluciones, que combinan madera y vegetación viva, proporcionan un soporte inicial que facilita el desarrollo de raíces capaces de reforzar el suelo y mitigar la erosión superficial. La investigación de Gray & Sotir, destaca la eficacia de técnicas como el enrejado vegetal y las capas de ramas vivas, que no solo controlan la erosión en taludes críticos, sino que también promueven la integración del paisaje en el entorno natural [63]. El manual de técnicas de estabilización de taludes también recomienda estas técnicas para taludes con pendientes pronunciadas [48].

En taludes rocosos, donde las condiciones del suelo pueden ser limitantes, el uso de especies vegetales especializadas, como sedum y helechos, ha demostrado ser particularmente efectivo. Estas plantas aprovechan las grietas y fisuras en las rocas para anclarse, mejorando la cohesión del suelo y estabilizando partículas sueltas. Estudios recientes han subrayado la importancia de elegir especies que se adapten a las condiciones extremas del terreno, maximizando así su efectividad y durabilidad en áreas de difícil acceso [53], [64].

Además de la vegetación, las barreras biodegradables, como muros bajos o fascinas, complementan las estrategias de bioingeniería en pendientes extremas. Estas barreras actúan como sistemas temporales de soporte, estabilizando el suelo mientras las raíces de las plantas se desarrollan para formar una red de refuerzo natural. Este enfoque integrado ha mostrado beneficios tanto estructurales como ecológicos, mejorando la resiliencia del terreno frente a eventos erosivos severos. Según Dorairaj & Osman, la combinación de barreras biodegradables con vegetación es una estrategia efectiva para optimizar la estabilidad en taludes críticos [65]. Asimismo, el manual de técnicas de estabilización de taludes detalla

los beneficios de estas barreras en la protección y estabilización de taludes rocosos y muy inclinados [48].

El éxito de estas técnicas radica en un entendimiento profundo de las interacciones hidrológicas y mecánicas entre las plantas y el suelo. Las raíces no solo ofrecen refuerzo estructural, sino que también contribuyen a la regulación del contenido de agua en el suelo, reduciendo la infiltración y el riesgo de deslizamientos en temporadas de lluvias intensas. Investigaciones han demostrado que especies vegetales con sistemas radiculares complejos son particularmente efectivas para preservar la succión del suelo y mejorar la resistencia del terreno tras lluvias prolongadas [66].

En conjunto, las técnicas de bioingeniería aplicadas a taludes muy inclinados o rocosos representan una solución integral que combina soporte estructural inmediato, restauración ecológica y sostenibilidad a largo plazo. Su implementación adecuada, basada en una cuidadosa selección de especies vegetales y el uso estratégico de barreras biodegradables, puede transformar áreas vulnerables en terrenos estables y ambientalmente resilientes. Este enfoque no solo mitiga riesgos geológicos, sino que también promueve una relación armónica entre la infraestructura y el medio ambiente.

6.6.5 ESTABILIZACIÓN DE TALUDES NATURALES ALTOS

La estabilización de taludes naturales altos representa un desafío crítico en ingeniería civil, particularmente en regiones propensas a fenómenos de erosión y deslizamientos. Dentro de las soluciones de bioingeniería, los terraplenes verdes se destacan como una alternativa efectiva y sostenible. Estas estructuras combinan el uso de vegetación con materiales como geotextiles biodegradables, proporcionando tanto soporte estructural como beneficios ecológicos a largo plazo.

Los terraplenes verdes actúan como sistemas de estabilización al facilitar el desarrollo de raíces que refuerzan el suelo de forma natural, mejorando su cohesión y resistencia frente a tensiones mecánicas. Este enfoque permite la integración gradual de las plantas en el terreno, lo que reduce significativamente el riesgo de deslizamientos y contribuye a la consolidación del suelo. Además, al emplear geotextiles biodegradables, se logra una infiltración controlada del agua de lluvia, disminuyendo la saturación del suelo y reduciendo el impacto de los flujos de agua superficiales [53].

El diseño de estos sistemas incorpora materiales naturales que permiten una degradación controlada en el tiempo, proporcionando soporte inicial mientras las plantas se establecen. Según el Manual de técnicas

de estabilización de taludes, el uso de geotextiles biodegradables es particularmente eficaz en terrenos con alta pendiente y riesgo de erosión intensa, donde otros métodos podrían resultar menos sostenibles o más invasivos [48].

Desde un punto de vista ambiental, los terraplenes verdes favorecen la restauración ecológica al incorporar vegetación autóctona que promueve la biodiversidad y la recuperación del hábitat en áreas degradadas. Este proceso de revegetación no solo mejora la estabilidad del terreno, sino que también contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado a la erosión y la pérdida de suelo fértil. Además, estos sistemas ofrecen un balance adecuado entre las necesidades técnicas de estabilización y los objetivos de sostenibilidad, cumpliendo con los principios de manejo ambiental responsable.

Esta integración de los terraplenes verdes en proyectos de estabilización de taludes expande las posibilidades de la bioingeniería, como se evidencia en el uso de técnicas complementarias, que integran elementos naturales y estructurales. Por ejemplo, Budimir & Roduner presentan sistemas combinados de mallas de acero de alta resistencia y geotextiles, diseñados para trabajar junto con la revegetación en pendientes pronunciadas [67]. Estas soluciones permiten distribuir eficientemente las fuerzas en el talud, reduciendo tanto el riesgo de erosión superficial como el de fallos estructurales. Este tipo de enfoques ilustra cómo la bioingeniería puede incorporar componentes mecánicos para abordar los retos en terrenos de alta complejidad.

Además, la bioingeniería integra técnicas de refuerzo mecánico que interactúan de manera armónica con el entorno natural. Greenwood, destaca el uso de clavos de cal y refuerzos biodegradables que, además de incrementar la resistencia del suelo, facilitan su integración ecológica [68]. Por su parte, Mahmud & Zimmie, proponen un sistema de estabilización mecánica con tiras de geotextil no tejido, una técnica que respalda la revegetación y optimiza el drenaje del terreno [69]. Este tipo de enfoques combinan sostenibilidad y funcionalidad estructural, un principio central de la bioingeniería.

El estudio de Zhang et al., refuerza esta perspectiva al analizar la eficiencia de las geogrillas como elementos de refuerzo para suelos expansivos [70]. Aunque este enfoque tiene un componente técnico predominante, su uso combinado con vegetación y materiales biodegradables resalta su alineación con los principios de la bioingeniería. La implementación de geogrillas no solo mejora la estabilidad estructural, sino que también disminuye considerablemente el impacto ambiental asociado al empleo de materiales tradicionales, como el cemento y los agregados sintéticos.

En conjunto, estas técnicas representan un enfoque integral para la estabilización de taludes altos, que combina elementos de bioingeniería con soluciones mecánicas avanzadas. Su implementación no solo garantiza la seguridad estructural en condiciones geológicas adversas, sino que también prioriza la sostenibilidad ambiental, restaurando hábitats y promoviendo la biodiversidad en áreas degradadas. Este enfoque integral refuerza la viabilidad de la bioingeniería como una herramienta esencial en la gestión de infraestructuras y ecosistemas en terrenos complejos. La tabla 23, resume las recomendaciones para la estabilización de taludes naturales mediante técnicas de bioingeniería.

Tabla 23. Recomendaciones para la Estabilización de Taludes mediante Bioingeniería

Tipo de Problema	Recomendaciones de Bioingeniería	Referencias
Problemas de Erosión Superficial	<p>Hidrosiembra para revegetación rápida.</p> <p>Mantas biodegradables para protección inicial.</p> <p>Plantación de gramíneas para mejorar la cohesión superficial.</p> <p>Selección de especies adecuadas para revegetación.</p> <p>Enmiendas químicas como PAM con yeso.</p> <p>Diseño de drenajes y terrazas.</p>	[48], [49], [50], [53], [55].
Taludes con Deslizamientos Lentos o Movimientos de Masa	<p>Enmaderamiento o fascinas para frenar movimientos de suelo.</p> <p>Plantación de árboles y arbustos de raíces profundas como sauces y álamos.</p> <p>Biomuros con plantas y piedras o madera para soporte adicional.</p> <p>Sistemas de drenaje superficial y subsubperfcial</p>	[48], [57], [58], [60].
Taludes Saturados	<p>Zanjas de infiltración combinadas con plantas absorbentes de agua.</p> <p>Uso de especies fitorremediadoras como sauces y álamos.</p> <p>Barreras vivas para reducir acumulación de agua y erosionar menos el suelo.</p>	[48], [53]
Taludes Muy Inclinaos o Rocosos	<p>Enramado o enrejado vegetal para estabilización en pendiente (Soil bioengineering cribs).</p> <p>Uso de plantas de raíz en fisuras de rocas como helechos y sedum.</p> <p>Muros bajos biodegradables para soporte temporal.</p>	[48], [53], [63], [65], [66].
Estabilización de Taludes Altos	<p>Terraplenes verdes combinando geotextiles biodegradables y vegetación.</p> <p>Uso de raíces profundas para soporte natural.</p> <p>Creación de hábitats sostenibles con cobertura vegetal.</p> <p>Integración con geogrillas y refuerzos mecánicos</p>	[48], [53], [68], [70].

7 CONCLUSIONES

La investigación alcanzó el objetivo general planteado, que consistió en evaluar la susceptibilidad a deslizamientos utilizando la MTN, lo que permitió identificar áreas críticas y analizar la estabilidad del terreno en la vereda El Vallano, sector Astilleros, municipio de Envigado, Antioquia, Colombia. Este enfoque permitió zonificar el área de estudio, destacando sectores con diferentes niveles de susceptibilidad a deslizamientos, generando insumos clave para la gestión del riesgo, la planificación territorial y el diseño de medidas preventivas.

El análisis de los factores de seguridad en los taludes del sector, mostró un patrón claro de deterioro en la estabilidad del terreno a lo largo del tiempo, con un aumento significativo en la cantidad de taludes clasificados con alta susceptibilidad y una marcada reducción en aquellos considerados estables, particularmente en el horizonte de largo plazo. Este comportamiento evidencia que el terreno, aunque en su mayoría estable en el corto plazo, es altamente vulnerable a factores que aceleran su inestabilidad, como la erosión, las variaciones climáticas y las actividades humanas no reguladas. La tendencia observada hacia estados de riesgo moderado y alto resalta la necesidad de implementar medidas de mitigación inmediatas que salvaguarden tanto la seguridad del terreno como la de las comunidades aledañas. Estos hallazgos subrayan la importancia de una planificación territorial informada y de intervenciones preventivas y correctivas que contrarresten la amenaza de movimientos en masa en el largo plazo.

Los valores bajos de FSr obtenidos confirman una alta susceptibilidad del terreno a deslizamientos. Aunque estos no implican un deslizamiento inmediato, sí evidencian una susceptibilidad incrementada bajo escenarios naturales. En línea con esto, el análisis de las condiciones que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos en las áreas críticas de la vereda El Vallano, resalta la complejidad geomorfológica, geológica e hidrológica de la región.

La topografía de la zona estudiada, caracterizada por pendientes pronunciadas y la presencia de semi cuchillas alargadas con áreas planas intercaladas, contribuye a la inestabilidad del terreno, particularmente en sectores donde los escarpes y la erosión afectan la cohesión del suelo. Este patrón geomorfológico, combinado con la alta incidencia de lluvias, la escorrentía superficial, y la predominancia de rocas metamórficas como gneis y esquistos, que presentan propiedades diferenciadas de meteorización y suelos residuales susceptibles a la erosión, agravan la inestabilidad del terreno.

Adicionalmente, la saturación del suelo y la concentración de flujos superficiales e intermitentes,

asociados a las dinámicas hidrológicas de la cuenca La Ayurá, intensifican los procesos erosivos y la pérdida de resistencia al corte del terreno. Estas condiciones no solo explican la ocurrencia de deslizamientos previos, sino que también representan un factor crítico que podría contribuir a deslizamientos futuros bajo condiciones adversas.

Desde el punto de vista climático, la alta pluviosidad anual, junto con periodos de lluvia intensa y baja capacidad de infiltración del suelo, amplifica los riesgos de deslizamientos al generar condiciones de humedad excesiva en áreas críticas. El cambio climático podría agravar este problema, aumentando la frecuencia e intensidad de eventos extremos. A esto se suman intervenciones humanas, como la modificación de cauces y la construcción de infraestructuras en zonas inestables, que agravan la vulnerabilidad del terreno.

A partir de los hallazgos observados, la estabilización de taludes en la Vereda El Vallano requiere un enfoque integral que combine soluciones técnicas avanzadas y principios de sostenibilidad ambiental. El manejo adecuado del agua superficial y subsuperficial emerge como un pilar fundamental, destacando el uso de sistemas de drenaje estratégicamente ubicados y técnicas de bioingeniería, como la incorporación de especies fitorremediadoras y barreras vivas. Estas medidas no solo reducen la saturación del suelo y fortalecen su resistencia al corte, sino que también contribuyen a mitigar los riesgos asociados a los deslizamientos, promoviendo la estabilidad geotécnica a largo plazo.

Finalmente, este modelo de gestión de taludes a través de bioingeniería debería integrar soluciones mecánicas para abordar de manera efectiva las condiciones geológicas adversas, asegurando tanto la seguridad estructural como la restauración ecológica. De este modo, no solo se mitigan riesgos, sino que también se generan beneficios sociales y ambientales a largo plazo. La adopción de una visión moderna y responsable en la gestión de taludes, garantiza la seguridad de las comunidades locales y la preservación del medio ambiente en un contexto de creciente vulnerabilidad a deslizamientos.

8 RECOMENDACIONES

Dada la tendencia hacia una menor estabilidad en el terreno, es crucial establecer un sistema de monitoreo continuo y a largo plazo que permita evaluar de manera periódica los factores de seguridad de los taludes. Este monitoreo debe incluir mediciones de parámetros clave, como la inclinación y altura de los taludes, así como el análisis de posibles cambios en la estructura del suelo debido a la erosión y otros factores ambientales. Este enfoque permitirá detectar de manera temprana cualquier cambio en la susceptibilidad y orientar las intervenciones oportunas.

Es recomendable realizar intervenciones prioritarias en los taludes clasificados como de alta susceptibilidad, especialmente aquellos que han alcanzado esta categoría en el largo plazo. Estas intervenciones deben enfocarse en estabilizar el terreno mediante la instalación de estructuras de contención y el refuerzo con técnicas de revegetalización, que pueden mejorar la cohesión del suelo y reducir la probabilidad de deslizamientos. Asimismo, la implementación de sistemas de drenaje adecuados será fundamental para minimizar el impacto de las precipitaciones en la estabilidad del terreno.

Además de las medidas directas sobre los taludes, es crucial establecer controles rigurosos sobre las actividades humanas en el área de estudio para evitar la degradación adicional del terreno. Se deben establecer restricciones a la deforestación, la construcción no planificada y el manejo ineficaz de aguas superficiales, actividades que incrementan el riesgo de deslizamientos. Promover prácticas sostenibles en el uso del suelo contribuirá a preservar la estabilidad del terreno y reducir el deterioro en el largo plazo.

Se recomienda que los resultados de este análisis también se integren en los planes de ordenamiento territorial, priorizando la delimitación de las áreas de alto riesgo para evitar desarrollos futuros en zonas inestables. Al integrar la información sobre la susceptibilidad de los taludes en la planificación territorial, se favorecerá una gestión informada del suelo que priorice la seguridad de la comunidad y la protección del ambiente.

Con base en los hallazgos de esta investigación, se recomienda implementar estrategias integrales para mitigar la susceptibilidad a deslizamientos, priorizando acciones como la estabilización mecánica del suelo mediante estructuras de contención y bioingeniería, incluyendo sistemas de terrazas con drenaje adecuado y revegetalización para reducir el impacto erosivo de las lluvias. Es crucial fortalecer la gestión hidrológica en la cuenca mediante la canalización y control de escorrentías naturales, evitando acumulaciones de agua que saturen el terreno. Asimismo, se sugiere establecer un monitoreo constante de las condiciones geomorfológicas e hidrológicas, empleando tecnologías geoespaciales para identificar cambios en la estabilidad del terreno y prever posibles deslizamientos. La restauración ecológica mediante la implementación de barreras biodegradables y la selección cuidadosa de especies vegetales contribuye a transformar áreas vulnerables en terrenos estables, promoviendo la biodiversidad y fomentando una relación armónica entre la infraestructura y el medio ambiente. Este enfoque integral debe ser considerado como una herramienta fundamental para la gestión sostenible de infraestructuras y ecosistemas en áreas propensas a deslizamientos.

Finalmente, se sugiere continuar con investigaciones futuras que incluyan variables adicionales, como la actividad sísmica, así como las características de la vegetación, para profundizar en la comprensión de los factores que afectan la estabilidad de los taludes. La incorporación de la actividad sísmica permite evaluar el impacto de movimientos tectónicos en la estructura del suelo, lo cual puede acelerar o desencadenar deslizamientos. Además, estudiar el tipo y las propiedades de la vegetación, incluyendo la densidad, las especies presentes y su sistema radicular, permite entender cómo la cobertura vegetal contribuye a la cohesión y retención del suelo, lo que potencialmente reduce el riesgo de inestabilidad. Utilizar técnicas avanzadas de modelado geotécnico y análisis tridimensional en combinación con estas variables puede ofrecer una visión más precisa y detallada de la dinámica del terreno. Estas herramientas mejorarán la identificación de áreas críticas y permitirán diseñar estrategias de mitigación más efectivas y sostenibles. Al integrar estas acciones, se fortalecerá la capacidad de respuesta ante la susceptibilidad de deslizamientos, proporcionando una mejor preparación y adaptación frente a amenazas naturales en el sector.

- [1] T. Shuk, *Quantitative safety factor mapping by means of the Natural Slope Methodology (NSIM)*. Balkema, Rotterdam, 1996.
- [2] T. Shuk Erdos, “Zonificación Geotécnica Cuantitativa por Medio de la Metodología de Taludes Naturales (MTN),” in *XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica Conferencia Principal, Sesión de Especialidad No. 7, “Estabilidad de Taludes y Terraplenes,”* Foz de Iguassú, Brasil, Aug. 1999, pp. 1–76. Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.scg.org.co/wp-content/uploads/MTN-Metodologia-de-Taludes-Naturales-TSHUK-1999.pdf>
- [3] S. Fidan, H. Tanyaş, A. Akbaş, L. Lombardo, D. N. Petley, and T. Görüm, “Understanding fatal landslides at global scales: a summary of topographic, climatic, and anthropogenic perspectives,” *Natural Hazards*, vol. 120, no. 7, pp. 6437–6455, May 2024, doi: 10.1007/s11069-024-06487-3.
- [4] P. Carrión-Mero, N. Montalván-Burbano, F. Morante-Carballo, A. Quesada-Román, and B. Apolo-Masache, “Worldwide Research Trends in Landslide Science,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 18, no. 18, p. 9445, Sep. 2021, doi: 10.3390/ijerph18189445.
- [5] A. J. González-García, “The Natural Slope Methodology (NSM), an efficient tool to estimate landslide relative hazard parameters,” in *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 1st ed., S. Aversa, L. Cascini, L. Picarelli, and C. Scavia, Eds., Rome, Italy: CRC Press, 2018, pp. 1003–1010. doi: 10.1201/9781315375007.
- [6] E. Aristizábal and O. Sánchez, “Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes,” *Disasters*, vol. 44, no. 3, pp. 596–618, Jul. 2020, doi: 10.1111/disa.12391.
- [7] D. Restrepo, J. Bielak, R. Serrano, J. Gómez, and J. Jaramillo, “Effects of realistic topography on the ground motion of the Colombian Andes – A case study at the Aburrá Valley, Antioquia,” *Geophys J Int*, vol. 204, no. 3, pp. 1801–1816, Mar. 2016, doi: 10.1093/gji/ggv556.
- [8] P. Redshaw, J. Bottomley, and M. Free, “The Global Landslide Hazard Map Final Project Report,” London, UK, Jun. 2020. Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0037584>
- [9] M. P. Amarasinghe, S. A. S. Kulathilaka, D. J. Robert, A. Zhou, and H. A. G. Jayathissa, “Risk assessment and management of rainfall-induced landslides in tropical regions: a review,” *Natural Hazards*, pp. 2179–2231, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11069-023-06277-3.
- [10] M. Kühnl, M. Sapena, M. Wurm, C. Geiß, and H. Taubenböck, “Multitemporal landslide exposure and vulnerability assessment in Medellín, Colombia,” *Natural Hazards*, vol. 119, no. 2, pp. 883–906, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11069-022-05679-z.
- [11] E. Aristizábal and E. García, “The relationship between rainfall and landslide in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes,” in *SCG-XIII International Symposium on Landslides*, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Eds., Cartagena, Colombia, Jun. 2021.
- [12] R. Paolucci, “Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities,” *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 31, no. 10, pp. 1831–1853, Oct. 2002, doi: 10.1002/eqe.192.

- [13] C. Augusto, H. Montoya, J. Alexánder Vega Gutiérrez, and G. Profesor, “Estimación de la Amenaza por Deslizamientos Detonados por Sismos y Lluvia (Valle de Aburrá-Colombia),” *Revista EIA*, vol. 11, pp. 103–117, 2014, doi: 10.14508/reia.2014.11.22.103-117.
- [14] S. E. Hough, A. Yong, J. R. Altidor, D. Anglade, D. Given, and S.-L. Mildor, “Site Characterization and Site Response in Port-au-Prince, Haiti,” *Earthquake Spectra*, vol. 27, no. 1_suppl1, pp. 137–155, Oct. 2011, doi: 10.1193/1.3637947.
- [15] M. Çelebi, “Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 77, no. 4, pp. 1147–1167, Aug. 1987, doi: 10.1785/BSSA0770041147.
- [16] D. M. Cruden and D. J. Varnes, “Landslide types and processes,” in *Landslides: Investigation and Mitigation*, K. A. Turner and R. L. Schuster, Eds., National Academies Press, 1996, ch. 3, pp. 36–75. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- [17] O. Hungr, S. Leroueil, and L. Picarelli, “The Varnes classification of landslide types, an update,” *Landslides*, vol. 11, no. 2, pp. 167–194, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- [18] D. N. Petley, “On the impact of climate change and population growth on the occurrence of fatal landslides in South, East and SE Asia,” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 43, no. 4, pp. 487–496, Nov. 2010, doi: 10.1144/1470-9236/09-001.
- [19] European Environment Agency (EEA), “Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe: Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices,” Luxembourg, 2017. doi: doi:10.2800/938195.
- [20] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “Inter-American Development Bank Sustainability Report 2019,” Washington, D.C., Apr. 2020. doi: 10.18235/0002278.
- [21] W. E. Giraldo and M. F. Aristizabal Arboleda, “Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido el 26 de octubre del 2016 en la Cantera Las Nieves, Municipio de Copacabana,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 48, pp. 12–22, Sep. 2020, doi: 10.15446/rbct.n48.87484.
- [22] J. Montero Olarte, “Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia,” Bogotá, Colombia, Oct. 2017.
- [23] C. García, “El desastre de Villatina,” in *Desastres de Origen Natural en Colombia 1979-2004*, 1st ed., M. Hermelin, Ed., Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2005, ch. 5, pp. 55–64. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/items/594cc8e8-0d57-4b30-94c6-ef2568012b3f>
- [24] M. Gamperl *et al.*, “Recommendations for Landslide Early Warning Systems in Informal Settlements Based on a Case Study in Medellín, Colombia,” *Land (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1451, Jul. 2023, doi: 10.3390/land12071451.
- [25] J. Ojeda and L. Donnelly, “Landslides in Colombia and their impact on towns and cities,” 2006.
- [26] Centro de Historia Envigado, “Vereda El Vallano.” Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.centrodehistoriaenvigado.com/vereda-el-vallano/>
- [27] X. Naranjo Gonzalez and Y. Gutierrez Rojas, “Caracterización y Zonificación de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, en la Cuenca la Quebrada La Ayurá: Tramo Cerros Astilleros - Parque

Ecológico el Saldo, Municipio de Envigado-Antioquia,” Pregrado, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2017.

- [28] M. Ramírez and E. Sánchez, “Manejo del riesgo que generan los taludes de la quebrada La Seca, del municipio de Envigado,” *Cuaderno Activa*, vol. 6, no. 1, pp. 109–121, Jun. 2015.
- [29] R. M. Iverson, “Slope stability—geotechnical engineering and geomorphology,” *Earth Surf Process Landf*, vol. 14, no. 3, pp. 271–271, May 1989, doi: 10.1002/esp.3290140308.
- [30] S. Çellek, “Effect of the Slope Angle and Its Classification on Landslide,” *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–23, Aug. 2020, doi: 10.21203/rs.3.rs-61660/v1.
- [31] R. L. Schuster and L. M. Highland, “The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 66, no. 1, pp. 1–27, Feb. 2007, doi: 10.1007/s10064-006-0080-z.
- [32] C. A. Buenahora Ballesteros, A. M. Martínez-Graña, and M. Yenes, “Influence of Cumulative Geotechnical Deterioration on Mass Movement at a Medium-Scale Regional Analysis (Cortinas Sector, Toledo, Colombia),” *Land (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 1000, Jul. 2024, doi: 10.3390/land13071000.
- [33] T. Shuk and A. J. González, “Quantification of Slope Instability Risk and Cost Parameters for Geotechnical Applications in a Highway Project and in a Regional Study,” Bogotá, Colombia.
- [34] F. C. Dai, C. F. Lee, and Y. Y. Ngai, “Landslide risk assessment and management: an overview,” *Eng Geol*, vol. 64, no. 1, pp. 65–87, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0013-7952(01)00093-X.
- [35] S. Cellek, “The Effect of Aspect on Landslide and Its Relationship with Other Parameters,” in *Landslides*, IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.99389.
- [36] M. Loche and G. Scaringi, “Assessing the influence of temperature on slope stability in a temperate climate: A nationwide spatial probability analysis in Italy,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 183, p. 106217, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.envsoft.2024.106217.
- [37] T. Shuk, “Estado Actual de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) y de sus resultados y aplicaciones,” Bogotá, Colombia, Mar. 1995.
- [38] M. C. Marín-Duque, “Verificación de la metodología de taludes naturales a partir de investigaciones geotécnicas existentes,” Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Antioquia, 2006. Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/5000>
- [39] F. Y. Waldo-Quinto, “Determinación de factores de seguridad relativos al deslizamiento utilizando la Metodología de Taludes Naturales (MTN) en la zona sub-urbana y urbana del municipio del Carmen de Atrato Chocó,” Maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2023. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10784/33533>
- [40] T. Shuk, *Site Characterization by means of the Natural Slope Methodology (NSM)*. Balkema, Rotterdam, 1998.
- [41] E. Hoek, *Practical Rock Engineering*. Vancouver, Canda, 2006. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>

- [42] R. Sajo, “Mapa Área Metropolitana del Valle de Aburrá,” Wikimedia Commons. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8518353>
- [43] E. Aristizábal and S. Yokota, “Evolución Geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 24, pp. 5–17, Nov. 2008, Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1695/169516254002.pdf>
- [44] L. A. Arias and L. H. González, “La diversidad del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia),” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 15, pp. 51–72, 2003, Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7988862>
- [45] J. Gómez-Tapias, N. E. Montes-Ramírez, V. Rey-León, E. Marín-Rincón, and D. Mateus-Zabala, “Memoria explicativa del Mapa Geológico de Colombia, Geological Map of Colombia y Atlas Geológico de Colombia 2023,” Bogotá, D.C. , Aug. 2023. Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: https://www2.sgc.gov.co/MGC/Documents/MGC_2023/Memoria_mgc_gmc_agc_2023.pdf
- [46] L. M. Echavarría-Ramírez, “Zonificación de las rocas metamórficas del Valle de Aburra y sus alrededores,” Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Medellín, Colombia, 1973.
- [47] Weather Spark, “El clima y el tiempo promedio en todo el año en Envigado, Colombia.”
- [48] Universidad de Córdoba, C. Instituto de Agricultura Sostenible, and S. Paisajes del Sur SL/ Bonterra Ibérica, “Manual de Técnicas de Estabilización Biotécnica en Taludes de Infraestructuras de Obra Civil,” Córdoba, Andalucía, 2014. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/110010/1/ManualVersionFinal.pdf>
- [49] G. Liu, F. Hu, F. Zheng, and Q. Zhang, “Effects and mechanisms of erosion control techniques on stairstep cut-slopes,” *Science of The Total Environment*, vol. 656, pp. 307–315, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.385.
- [50] M. Xiong, R. Sun, and L. Chen, “Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis,” *Science of The Total Environment*, vol. 645, pp. 753–760, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.124.
- [51] K. R. Lekha, “Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes—A case study,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 22, no. 5, pp. 399–413, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.geotexmem.2003.12.003.
- [52] S.-C. Chen, K.-T. Chang, S.-H. Wang, and J.-Y. Lin, “The efficiency of artificial materials used for erosion control on steep slopes,” *Environ Earth Sci*, vol. 62, no. 1, pp. 197–206, Jan. 2011, doi: 10.1007/s12665-010-0514-6.
- [53] E. M. Vargas-Rojas, “Herramientas de Bioingeniería para la Estabilización de Taludes,” Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia, Neiva, Colombia, 2023. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/2a04f4a6-7f52-4dc6-82c1-8db959b5642c/content>
- [54] B. Krautzer, W. Graiss, G. Peratoner, C. Partl, S. Venerus, and B. Klug, “The influence of recultivation technique and seed mixture on erosion stability after restoration in mountain environment,” *Natural Hazards*, vol. 56, no. 2, pp. 547–557, Feb. 2011, doi: 10.1007/s11069-009-9491-z.

- [55] A. Akbarzadeh, R. Mehrjardi, H. Refahi, H. Rouhipour, and M. Gorji, "Using soil binders to control runoff and soil loss in steep slopes under simulated rainfall," *Int Agrophys*, vol. 23, pp. 99–109, Jan. 2009, Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280094675_Using_soil_binders_to_control_runoff_and_soil_loss_in_steep_slopes_under_simulated_rainfall
- [56] Y. Yu, W. Wei, L. Chen, T. Feng, and S. Daryanto, "Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China," *Science of The Total Environment*, vol. 652, pp. 755–764, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.255.
- [57] P. Punetha, M. Samanta, and S. Sarkar, "Bioengineering as an Effective and Ecofriendly Soil Slope Stabilization Method: A Review," in *Landslides: Theory, Practice and Modelling.*, 1st ed., vol. 50, S. Pradhan, V. Vishal, and T. Singh, Eds., Springer, Cham, 2019, pp. 201–224. doi: 10.1007/978-3-319-77377-3_10.
- [58] G. Urciuoli and M. Pirone, "Subsurface Drainage for Slope Stabilization," in *Landslide Science and Practice*, 1st ed., vol. 6, C. Margottini, P. Canuti, and K. Sassa, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 577–585. doi: 10.1007/978-3-642-31319-6_74.
- [59] M. Neves, V. Cavaleiro, and A. Pinto, "Slope Stability Assessment and Evaluation of Remedial Measures Using Limit Equilibrium and Finite Element Approaches," *Procedia Eng*, vol. 143, pp. 717–725, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.109.
- [60] S. L. Pawlak, R. Pattillo, and N. Bacheldor, "Mitigation of Slope Creep by Subsurface Drainage," in *Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, Apr. 2000, pp. 253–262. doi: 10.1061/40486(300)16.
- [61] D. R. Carder, G. R. Watts, L. Campton, and S. Motley, "Drainage of earthworks slopes," Sep. 2008. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=TRL&DocID=287284>
- [62] B. D. Haugen, "A Design Method For Landslide Surface Water Drainage Control," *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 23, no. 4, pp. 275–289, Nov. 2017, doi: 10.2113/gsegeosci.23.4.275.
- [63] D. H. Gray and R. B. Sotir, "Biotechnical Stabilization of Steepened Slopes," Washington, D.C., Jan. 1995. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://wsdot.wa.gov/publications/fulltext/Roadside/BiotechnicalStabilizationofSteepenedSlopes.pdf>
- [64] A. Ray, A. K. Bharati, H. Verma, R. Rai, and T. N. Singh, "Numerical study of the utility of bioengineering technique for slope stabilisation," *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 18, no. 4, pp. 253–271, Jul. 2023, doi: 10.1080/17486025.2022.2040605.
- [65] D. Dorairaj and N. Osman, "Present practices and emerging opportunities in bioengineering for slope stabilization in Malaysia: An overview," *PeerJ*, vol. 9, p. e10477, Jan. 2021, doi: 10.7717/peerj.10477.
- [66] C. W. W. Ng, A. K. Leung, and J. J. Ni, "Bioengineering for Slope Stabilisation Using Plants: Hydrological and Mechanical Effects," in *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, W. Wu and H. Yu, Eds., Vienna; Austria: Springer, Cham, 2018, pp. 1287–1303. doi: 10.1007/978-3-319-97115-5_87.

- [67] V. Budimir and A. Roduner, “Structural reinforcement of geotextiles by high-tensile steel wire meshes,” in *Fifth International Conference on Road and Rail Infrastructure*, S. Lakušić, Ed., Zadar, Croatia: Department of Transportation, May 2018, pp. 241–250. doi: 10.5592/CO/CETRA.2018.954.
- [68] D. A. Greenwood, “Speculations on methods of stabilizing slopes,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 2, no. 3, pp. 103–123, Jul. 1998, doi: 10.1680/gi.1998.020302.
- [69] M. B. Mahmud and T. F. Zimmie, “Innovative and Rapidly Installed Mechanically Stabilized Earth System for Highway Embankments: Model Studies,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1582, no. 1, pp. 1–7, Jan. 1997, doi: 10.3141/1582-01.
- [70] R. Zhang, M. Long, and J. Zheng, “Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1155/2019/9454929.

ANEXOS

Por favor, acceda al siguiente enlace para revisar los anexos relacionados: [ANEXOS MTN](#)

El enlace dirige a una carpeta en OneDrive que incluye los siguientes documentos:

Anexo A. Topografía

Anexo B. Curvas El Vallano

Anexo C. Estudio Geotécnico Vallano

Anexo D. Resumen Estudio Geotécncio Vallano

Anexo E. Evaluación MTN

Anexo F. Evaluación Envolutas

Anexo G. Patrón Triangular Población

Anexo H. Factores de Seguridad Taludes

Anexo I. Factores de Seguridad Taludes Rangos de Susceptibilidad