



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Bogotá

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA QUE PERMITA CALCULAR LA  
DISTANCIA DE VIAJE Y VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN SUELOS A  
PARTIR DE LAS FUERZAS RESULTANTES DE UN MODELO DE EQUILIBRIO  
LÍMITE**

**Presentado por:**

**I.C. Laura Camila Cantor Guasca  
I.C. Andrés Felipe Prieto Chávarro**

**Dirigido por:**

**I.C. PhD, MG, MSc, DIC. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda**

**Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ingeniería – Departamento de Ingeniería Civil  
Maestría en Ingeniería Civil - Geotecnia  
Bogotá, Colombia  
Agosto, 2019**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo se lo dedico a mis padres Teresa Chávarro y Ricardo Prieto, quienes desde pequeño me han apoyado incondicionalmente, me han inculcado la excelencia y son mi motor de vida; a ellos les debo todo lo que soy hoy. En especial se lo dedico a mi abuelita Bertha, quien aún desde el cielo, sigue siendo mi motivación para ser mejor persona y mejor ingeniero cada día.*

*Andrés Felipe Prieto Chávarro*

*El presente trabajo de grado se lo quiero dedicar a toda mi familia, especialmente a mis padres Margarita y Ricardo, y a mi hermanita María Juliana, por siempre acompañarme y respaldarme en cada una de las decisiones que he tomado, por siempre confiar en mí, por la paciencia y comprensión en momentos difíciles. A todas las personas que me han acompañado en este proceso muchas gracias por motivarme diariamente a mejorar tanto personal como profesionalmente.*

*Laura Camila Cantor Guasca*

## **AGRADECIMIENTO ESPECIAL**

*Agradecemos al Dr. Carlos Eduardo Rodríguez por su dedicación y enseñanzas a lo largo de nuestra formación profesional, buscando siempre que desde la investigación se logre servir a la sociedad. Gracias por guiarnos y por el acompañamiento en este proceso que está a punto de culminar.*

## RESUMEN

Los deslizamientos son eventos naturales que pueden llegar a afectar el tránsito de una vía, causar la destrucción de viviendas e incluso generar pérdidas de vidas humanas; debido a que dichos eventos logran recorrer la distancia y alcanzar suficiente velocidad para causar afectaciones de este tipo. Por lo anterior, la evaluación de estos dos parámetros cinemáticos es necesaria para mitigar y prevenir los desastres que son ocasionados por estos procesos de movimientos en masa. Los métodos desarrollados para analizar el comportamiento cinemático se pueden agrupar en modelos empírico-estadísticos y modelos analíticos, los cuales cuentan con diferentes limitaciones: no pueden ser generalizados a diferentes tipos de deslizamiento (modelos empíricos), implementan modelos friccionantes que da lugar a grandes desplazamientos y velocidades a diferencia de las registradas en campo, no tienen en cuenta la energía de deformación, no consideran parámetros reológicos, entre otras.

Este trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar una metodología para el cálculo de la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite. Para ello, se plantea un modelo bidimensional de bloque deslizante, en el cual se acoplan las variables geométricas, mecánicas y reológicas del deslizamiento. Se considera que el movimiento del deslizamiento inicia en el momento en que las fuerzas desestabilizantes superan a las fuerzas resistentes, lo cual es evaluado a partir del modelo de equilibrio límite “Unbalanced Thrust Method”. Al hacer el equilibrio de fuerzas para cada dovela y aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene la aceleración, velocidad y desplazamiento para cada dovela. Considerando como condición inicial los desplazamientos obtenidos a partir del equilibrio límite, el movimiento de la masa deslizada es modelado mediante un sistema de bloques adyacentes que intercambian energía al colisionar entre sí mediante resortes; la resistencia al movimiento es dada por el modelo reológico Coulomb-viscoso, en el cual se consideran las componentes friccionantes y viscosas, que son representadas con un sistema en paralelo compuesto por un deslizador y un amortiguador, respectivamente.

La ecuación de movimiento del modelo corresponde a una ecuación diferencial lineal de segundo orden, la cual es resuelta por el método de diferencias finitas, obteniendo una ecuación explícita para obtener el desplazamiento de cada dovela, y así mismo la velocidad y la aceleración. El desarrollo de esta ecuación fue programado en un algoritmo elaborado en el software MATLAB®, mediante el cual fue posible evaluar la aplicabilidad del modelo en dos ejemplos supuestos y tres casos reales ocurridos en Asia; y así mismo analizar la sensibilidad en los resultados que tienen los parámetros que componen la ecuación de movimiento.

A partir del análisis llevado a cabo por medio del programa realizado, se logró modelar el comportamiento cinemático de los tres deslizamientos ocurridos, mediante retro cálculo. Sin embargo, el análisis de sensibilidad realizado a cada caso, pone en evidencia las diferentes limitaciones -discutidas en el documento- por problemas de estabilidad numérica, así como por la fuerte sensibilidad de parámetros como el coeficiente de viscosidad.

Estas limitaciones conllevaron a que el modelo propuesto en este trabajo de grado, no hiciera viable el desarrollo de una metodología que pueda ser empleada para calcular las variables cinemáticas de los deslizamientos en suelos. Por tanto, se realizan diferentes recomendaciones para que con el trabajo futuro se pueda seguir trabajando en el modelo propuesto y llegar así al desarrollo de una metodología.

**Palabras clave:** Distancia de Viaje, velocidad del deslizamiento, bloque deslizante, cinemática de deslizamientos, modelación numérica, estabilidad de taludes, viscosidad, ecuación de movimiento, método de diferencias finitas

## Tabla de Contenido

RESUMEN .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	13
1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.1. Objetivo general.....	19
1.2. Objetivos específicos.....	19
2. MARCOS DE REFERENCIA .....	20
2.1. Marco de antecedentes .....	20
2.1.1. Modelos empírico-estadísticos.....	20
2.1.2. Modelos analíticos .....	22
2.1.3. Modelos recomendados por el SGC (2016) .....	24
2.2. Marco conceptual .....	26
2.3. Marco teórico .....	28
2.3.1. Modelo de bloque deslizante.....	29
2.3.2. Métodos de equilibrio límite.....	33
2.3.3. Modelos constitutivos reológicos.....	35
2.3.5. Método de diferencias finitas.....	41
3. METODOLOGÍA.....	42

3.1.	Determinación de fuerzas actuantes y resistentes en un talud.....	42
3.2.	Modelo modificado de bloque deslizante.....	44
3.2.1.	Suposiciones básicas.....	44
3.2.2.	Modelo de masa conectado por resortes.....	45
3.2.3.	Modelo reológico Coulomb-viscoso.....	47
3.2.4.	Ecuación de movimiento.....	49
3.2.5.	Limitaciones.....	53
3.3.	Solución ecuación de movimiento.....	54
3.3.1.	Diferencias finitas.....	54
3.3.2.	MDF en modelo simplificado.....	55
3.3.3.	Condiciones iniciales y movimiento de la masa deslizada.....	64
3.4.	Desarrollo de código en Matlab®.....	67
3.5.	Análisis de sensibilidad de los parámetros en el problema del bloque deslizante en talud infinito.....	69
3.6.	Métodos para determinación de parámetros.....	82
4.	Resultados: Aplicabilidad de la metodología.....	85
4.1.	Ejemplo 1.....	85
4.1.1.	Topografía y características del deslizamiento.....	85
4.1.2.	Determinación de parámetros.....	85
4.1.3.	Distancia de viaje y velocidades.....	86

4.2.	Ejemplo 2.....	90
4.2.1.	Topografía y características del deslizamiento .....	90
4.2.2.	Determinación de parámetros .....	90
4.2.3.	Distancia de viaje y velocidades .....	91
4.3.	Deslizamiento ocurrido en Tianshui, China .....	94
4.3.1.	Topografía y características del deslizamiento .....	94
4.3.2.	Caracterización geotécnica .....	95
4.3.3.	Determinación de parámetros .....	95
4.3.4.	Distancia de viaje, velocidad y aceleración .....	96
4.4.	Deslizamiento Sale Mountain .....	100
4.4.1.	Topografía y características del deslizamiento .....	101
4.4.2.	Caracterización geotécnica .....	102
4.4.3.	Determinación de parámetros .....	103
4.4.4.	Distancia de viaje, velocidad y aceleración .....	104
4.5.	Deslizamiento Hiegaesi .....	107
4.5.1.	Topografía y características del deslizamiento .....	108
4.5.2.	Caracterización geotécnica .....	109
4.5.3.	Determinación de parámetros .....	110
4.5.4.	Distancia de viaje, velocidad y aceleración .....	111
5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN CASOS APLICADOS .....	114

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	127
7.	CONCLUSIONES.....	131
8.	TRABAJO FUTURO .....	134
9.	BIBLIOGRAFIA.....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Deslizamientos registrados en Colombia de 1921 a 2017 (DESINVENTAR, 2019) .....	14
Figura 1.2 Frecuencia de deslizamientos registrados en los departamentos de Colombia. (DESINVENTAR, 2019) .....	15
Figura 1.3 Pérdidas de vida y viviendas destruidas por tipo de evento, 1970-2011. (Banco Mundial: Colombia, 2012) .....	16
Figura 2.1 Variables geométricas para definir la distancia de viaje de un deslizamiento (Hungar, Corominas, & Eberhardt, Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity., 2005) .....	25
Figura 2.2 Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema (Yue, 2014).....	26
Figura 2.3. Perfil del deslizamiento. (Miao, Liu, Niu, & Ma, 2001) .....	29
Figura 2.4. Fuerzas actuando en un bloque del deslizamiento. (Miao, Liu, Niu, & Ma, 2001) .....	29
Figura 2.5. Modelo de bloques simplificado por resortes. (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides, 2001) .....	30
Figura 3.1 Diagrama de fuerzas actuantes en la dovela en método UTM.....	42
Figura 3.2. Comparación de fuerzas entre dovelas para métodos de equilibrio límite. ....	43
Figura 3.3 Diagrama de masas conectadas por resortes .....	45
Figura 3.4 Modelo reológico (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996) .....	48

Figura 3.5 Diagrama de masa conectado por resortes y amortiguadores .....	49
Figura 3.6 Diagrama de fuerzas dovela intermedia .....	50
Figura 3.7 Diagrama de fuerzas primera dovela .....	52
Figura 3.8 Diagrama de fuerzas última dovela .....	53
Figura 3.9 Modelo simplificado plano inclinado .....	56
Figura 3.10 Ejemplos de movimientos sobreamortiguados para el modelo simplificado.....	59
Figura 3.11. Aproximación por diferencias finitas a solución analítica. ....	60
Figura 3.12 Diagrama de flujo de algoritmo “LAAND-Slide Runout”.....	69
Figura 3.13 Superficie del talud durante la modelación.....	71
Figura 3.14 Posición del bloque deslizante Modelo 1 .....	71
Figura 3.15 Velocidad del bloque deslizante Modelo 1 .....	72
Figura 3.16 Aceleración del bloque deslizante Modelo 1 .....	72
Figura 3.17 Posición del bloque deslizante Modelo 2 .....	73
Figura 3.18 Velocidad del bloque deslizante Modelo 2 .....	74
Figura 3.19 Aceleración del bloque deslizante Modelo 2 .....	74
Figura 3.20 Análisis de sensibilidad bloque deslizante Modelo 1 .....	78
Figura 3.21 Análisis de sensibilidad bloque deslizante Modelo 2.....	79
Figura 3.22 Análisis de sensibilidad E vs $\mu$ .....	80

Figura 3.23 Análisis de sensibilidad Número de dovelas vs incremento de tiempo Modelo 1.....	81
Figura 3.24 Análisis de sensibilidad Número de dovelas vs incremento de tiempo Modelo 2.....	82
Figura 4.1. Superficie del talud durante el tiempo que ocurre el deslizamiento.....	87
Figura 4.2. Posición de cada dovela durante el deslizamiento.....	88
Figura 4.3. Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento .....	89
Figura 4.4. Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento.....	89
Figura 4.5 Superficie del talud durante el tiempo que ocurre el deslizamiento. ....	91
Figura 4.6 Posición de cada dovela durante el deslizamiento.....	92
Figura 4.7 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento .....	93
Figura 4.8 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento .....	93
Figura 4.9. Topografía del deslizamiento ocurrido en Tianshui- Curvas de nivel cada 5m -. 1. Terraza del cuaternario. 2. Escarpe 3. Pata del deslizamiento 4. Drumlin 5. Depresión 6. Hundimiento 7. Grietas 8. Fabricas destruidas 9. Fabricas no destruidas. (Tomado de Miao et. al, 2001).....	94
Figura 4.10. Superficie del talud durante el deslizamiento “Tianshui” .....	97
Figura 4.11. Posición de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui .....	98
Figura 4.12. Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui .....	99
Figura 4.13. Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui .....	99
Figura 4.14. Deslizamiento Sale Mountain. Tomado de (Hung, Leroueil, & Picarelli, The Varnes classification of landslide types, an update, 2014) .....	100

Figura 4.15 Plano del deslizamiento de Sale Mountain (Zha, 1983). 1, dirección principal de viaje; 2, límite de la cama de deslizamiento; 3, límite de la acumulación; 4, límite de la zona afectada; 5, estrato y edad de los depósitos; 6, área de rodadura; 7, dirección del movimiento de la masa del suelo; 8, ubicación final del pueblo desplazado; 9, depresión; 10, drumlin; 11, punto excavado; 12, culpa; 13, línea de sección transversal; 14, contorno sobre formas de relieve originales; 15, primavera. Intervalo de contorno = 5 m (Tomado de Miao et al, 2001).....	101
Figura 4.16 Superficie del talud durante el deslizamiento Sale Mountain .....	104
Figura 4.17 Posición de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain ...	106
Figura 4.18 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain.	106
Figura 4.19 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain .....	107
Figura 4.20 Fotografía del deslizamiento (Wang, Sassa, & Wang, 2002) .....	108
Figura 4.21 Secciones del deslizamiento (Wang, Sassa, & Wang, 2002) .....	109
Figura 4.22 Superficie del talud durante el deslizamiento Hiegaesi .....	111
Figura 4.23 Posición de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi.....	112
Figura 4.24 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi.....	113
Figura 4.25 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi.....	113
Figura 5.1. Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Tianshui .....	116
Figura 5.2 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Sale Mountain.....	117
Figura 5.3 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Hiegaesi.....	118
Figura 5.4 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento ejemplo 1 .....	119

Figura 5.5 Análisis de sensibilidad ejemplo 2.....	120
Figura 5.6 Análisis de sensibilidad Tianshui E vs $\mu$ .....	121
Figura 5.7 Análisis de sensibilidad Tianshui Dovelas vs incremento de tiempo .	121
Figura 5.8 Análisis de sensibilidad Sale Mountain E vs $\mu$ .....	122
Figura 5.9 Análisis de sensibilidad Sale Mountain No Dovelas vs incremento de tiempo .....	122
Figura 5.10 Análisis de sensibilidad Hiegaesi E vs $\mu$ .....	123
Figura 5.11 Análisis de sensibilidad Hiegaesi No Dovelas vs incremento de tiempo .....	123
Figura 5.12 Análisis de sensibilidad Ejemplo 1 – E vs $\mu$ .....	124
Figura 5.13 Análisis de sensibilidad Ejemplo 1 – No Dovelas vs incremento de tiempo .....	124
Figura 5.14 Análisis de sensibilidad Ejemplo 2 – E vs $\mu$ .....	125
Figura 5.15 Análisis de sensibilidad Ejemplo 2 – No Dovelas vs incremento de tiempo .....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Nuevo sistema de clasificación de deslizamientos propuesto por Varnes. (Leroueil, Hungr, & Picarelli, 2013).....	27
Tabla 2.2 Escala de velocidad de deslizamientos .....	28
Tabla 2.3. Métodos de equilibrio límite. Modificado de (Universidad Politecnica de Cataluna, 2018).....	34
Tabla 3.1. Parámetros usados en el modelo simplificado .....	61
Tabla 3.2 Rango definidos bloque deslizante .....	70
Tabla 3.3 Rango definidos bloque deslizante.....	73
Tabla 3.4 Rangos definidos de variación .....	75
Tabla 4.1 Parámetros Ejemplo 1 .....	86
Tabla 4.2 Parámetros Ejemplo 2 .....	90
Tabla 4.3 Parámetros Tianshui .....	96
Tabla 4.4 Propiedades físico-mecánicas de loess y lutitas (Tomado de Liu y Wu, 1987) .....	103
Tabla 4.5 Parámetros Sale Mountain .....	104
Tabla 4.6 Parámetros del deslizamiento Hiegaesi .....	110
Tabla 5.1 Resultados análisis de sensibilidad módulo de deformación – coeficiente de viscosidad.....	126
Tabla 5.2 Resultados análisis de sensibilidad número de dovelas – intervalo de tiempo .....	126

## 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En primer lugar, es importante destacar que en Colombia se presentan múltiples deslizamientos periódicamente, los cuales afectan los elementos expuestos en diferentes magnitudes dependiendo de varios factores, entre ellos las características cinemáticas del mismo. DESINVENTAR (2019) tiene registro de más de diez mil deslizamientos que han ocurrido en los diferentes departamentos del país, y que han causado aproximadamente siete mil muertes entre 1921 y 2017, como se observa en la Figura 1.1. Dichos deslizamientos, se distribuyen en diferentes departamentos del país, ocurriendo con mayor frecuencia en la región Andina como se evidencia en la Figura 1.2.

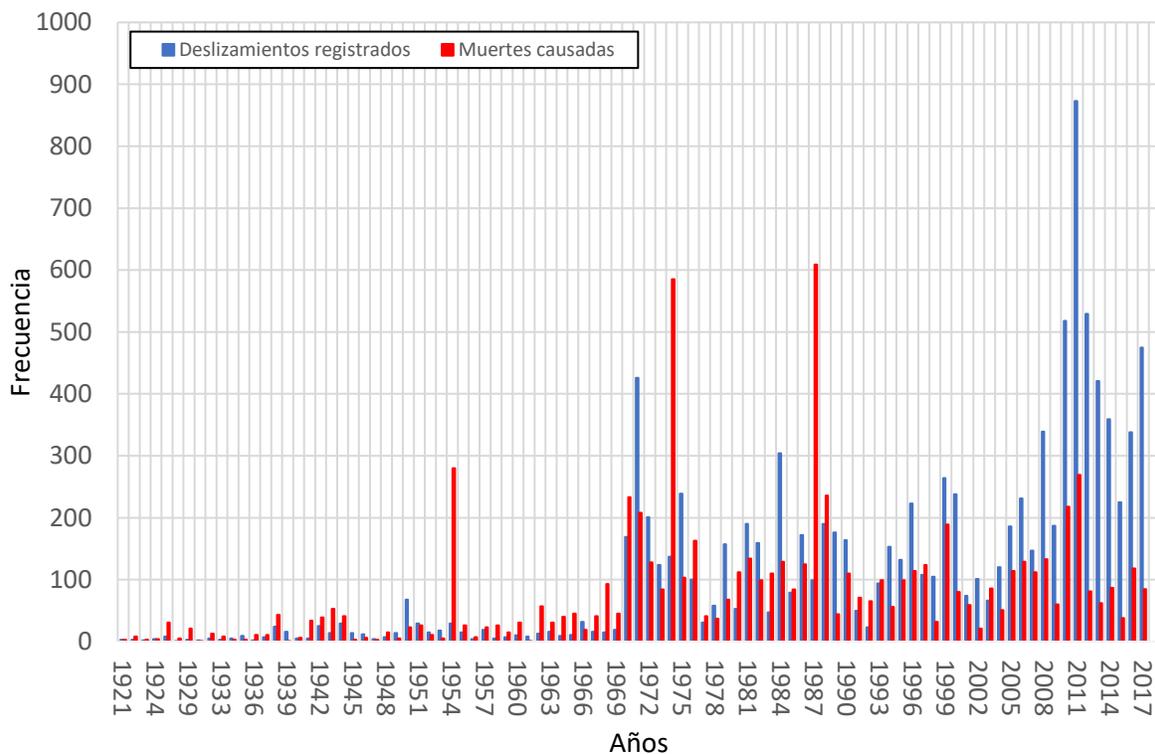
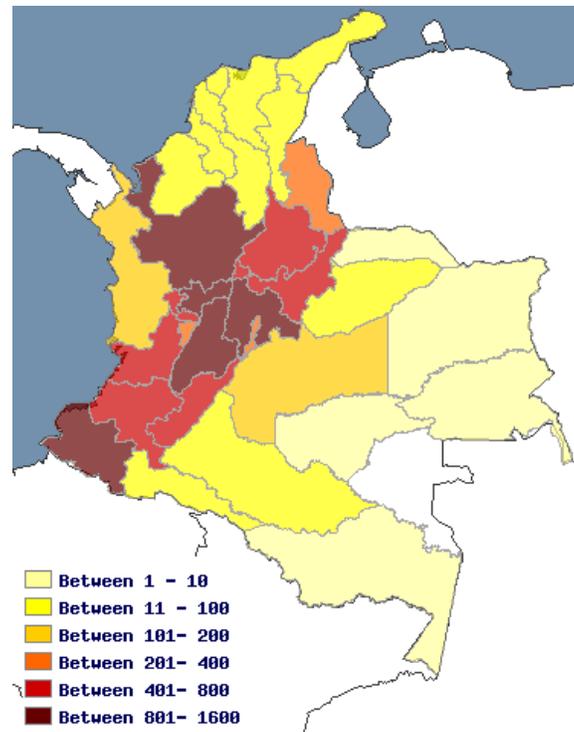


Figura 1.1 Deslizamientos registrados en Colombia de 1921 a 2017 (DESINVENTAR, 2019)

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*



*Figura 1.2 Frecuencia de deslizamientos registrados en los departamentos de Colombia. (DESINVENTAR, 2019)*

Los deslizamientos pueden llegar a afectar el tránsito de una vía, causar la destrucción de viviendas e incluso pérdidas de vidas humanas; ya que la masa deslizada logra recorrer la distancia y alcanzar la velocidad necesaria para causar afectaciones de este tipo. El evento que más ha generado pérdidas de vida entre 1970 y 2011 corresponde a los deslizamientos con 36%, y a su vez es el tercer evento que más ha causado viviendas destruidas con 10%, respecto a los eventos estudiados por el Banco Mundial (2012) -ver Figura 1.3-.

A nivel mundial, son miles de muertes cada año causadas por los deslizamientos (Petley, 2012), donde gran parte de las muertes ocasionadas por dichos movimientos en masa ocurren en zonas planas, que aun así, son áreas que hacen parte de la distancia de viaje del deslizamiento (McDougall, 2017) donde la población humana suele concentrarse y puede ocurrir el impacto de un deslizamiento a altas velocidades, muchas veces sin advertencia alguna.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

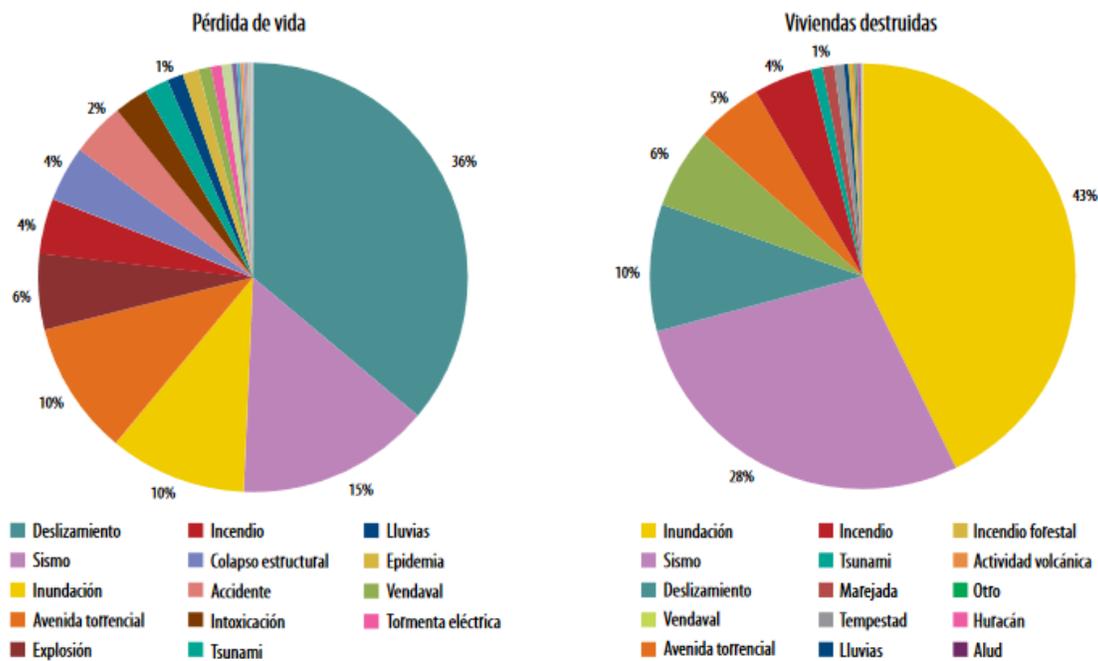


Figura 1.3 Pérdidas de vida y viviendas destruidas por tipo de evento, 1970-2011. (Banco Mundial: Colombia, 2012)

Dado que la estabilización de un talud no es siempre factible, se necesita de herramientas y métodos para predecir y analizar el comportamiento de la cinemática del deslizamiento, con el fin de definir el uso del suelo o diseñar protección en la zona de viaje y depósito del deslizamiento. El deslizamiento ocurrido en Oso, Washington, en marzo de 2014, el cual viajó más de 1 kilómetro a lo largo del valle y causó 43 muertes de la comunidad de Steelhead Haven, es uno de los muchos ejemplos existentes alrededor del mundo de esta problemática (Keaton, y otros, 2014).

De los ejemplos más recientes de deslizamiento que ha dejado desastres en Colombia fue el presentado en la vía Tuquerres – Tumaco, ocurrido el 21 de enero de 2018, el cual dejó trece personas muertas debido al derrumbe de aproximadamente 4,500 metros cúbicos que sepultó un vehículo que transitaba en el kilómetro 66 en el sector Junín, en la vía que conduce hacia Puerto Tumaco (El Universal, 2018). Otro ejemplo corresponde al deslizamiento ocurrido en El Cerro, en el sur de Montería, que sucedió el 3 de agosto de 2017, en donde se vieron

afectadas 20 casas ubicadas en sectores de alto riesgo debido a la erosión y las fuertes lluvias que se presentan constantemente (El Universal, 2017). Así como los ejemplos presentados, se evidencia que más del 50% de deslizamientos registrados en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano (SGC), corresponden a **deslizamientos en suelos**, por lo cual fueron los seleccionados para este estudio.

Por su parte, el SGC (2016) establece que para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, se hace fundamental predecir el modo de falla de las laderas y cuantificar el desplazamiento de la masa, incluyendo la **distancia de viaje y velocidad**, con el fin de obtener la descripción de su capacidad destructiva. La predicción de estos dos parámetros cinemáticos es necesaria para mitigar y prevenir los desastres ocasionados por los deslizamientos.

Es por esto, que se hace importante desarrollar una metodología que permita cuantificar la velocidad del deslizamiento y la distancia de viaje, teniendo en cuenta las variables geométricas, mecánicas y reológicas, con el fin de mitigar el riesgo de los elementos expuestos y de prevenir pérdidas humanas y económicas.

Los métodos que han sido desarrollados para predecir dichos parámetros pueden ser ampliamente agrupados en dos categorías (McDougall, 2017): **modelos empíricos-estadísticos**, los cuales son desarrollados con referencia en datos de deslizamientos reales basados en la clasificación del tipo de movimiento, sin embargo, sus estudios y correlaciones se realizan en materiales y casos específicos; y **métodos analíticos basados en modelación** (Hunter & Fell, 2003) (Glastonbury, Fell, & Mostyn, 2002), que según Miao et al. (2001) se presentan en modelos a escala física -los cuales han presentado dificultades debido a efectos geométricos- y modelos dinámicos, los cuales se encuentran categorizados en modelos de masa agrupados, modelos basados en la teoría de colisiones y modelos basados en mecánica del medio continuo.

Como afirma Hungr (1995), los modelos de masa agrupados idealizan el movimiento del deslizamiento como un solo punto; y aunque estos métodos son ventajosos por su simplicidad y pueden llegar a obtener resultados razonables del movimiento del centro de gravedad, no pueden simular el movimiento de la pata del deslizamiento y no tienen en cuenta las deformaciones internas. Los modelos basados en mecánica del medio continuo y asociados con una fórmula versátil reológica han favorecido la predicción de la distancia de viaje y parámetros relevantes. Sin embargo, la mayoría de los deslizamientos tratados han sido de tipo flujo -que no corresponden a los estudiados en este documento-, como flujo de detritos, entre otros (Chen & Lee, Numerical simulation of debris flows, 2000) (Crosta, Imposimato, & Roddeman, 2003) (Cuomo, 2014) (Hungr O. , Numerical modelling of the motion of rapid flow-like landslides for hazard assesment, 2009).

Los modelos basados en la teoría de la colisión han sido aplicados ampliamente para deslizamientos de alta velocidad con largos desplazamientos (Liao, Xu, & Zheng, 1997) -diferentes a flujo de detritos-, donde el deslizamiento es idealizado como una serie de bloques deslizantes y los bloques adyacentes intercambian energía al colisionar con otros, teniendo en cuenta la deformación interna y simulando el movimiento de la pata del deslizamiento; sin embargo, la acumulación y pérdida de la energía de deformación en el cuerpo deslizante, causada por la no homogeneidad en la pendiente y en la superficie de falla, no es tenida en cuenta (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides, 2001). Miao y otros (2001) presentan un modelo de bloque deslizante, el cual considera la no homogeneidad de la velocidad y deformación de la masa deslizada, simultáneamente con la energía de deformación y disipación de energía durante el deslizamiento; sin embargo, debido a que este modelo no considera los parámetros reológicos del suelo es posible encontrar valores de distancia de viaje y velocidad de deslizamiento de magnitudes muy elevadas a diferencia de las registradas en campo (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996).

A partir de los modelos desarrollados se evidencia la necesidad de proponer una metodología que permita estimar la distancia de viaje y velocidad de los

deslizamientos en suelos y que se acople a los análisis de equilibrio límite llevados a cabo en la práctica para la estabilidad de taludes; por lo cual, en esta investigación surge la pregunta:

*¿Es factible el desarrollo de una metodología que permita estimar la distancia de viaje y velocidad en deslizamientos en suelo a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite?*

Se plantea la siguiente hipótesis:

*Al acoplar las variables geométricas, mecánicas y reológicas en la ecuación de movimiento, es factible el desarrollo de una metodología que permita estimar la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos, partiendo de las fuerzas calculadas en un modelo de equilibrio límite.*

### **1.1. Objetivo general**

Desarrollar una metodología para el cálculo de la distancia de viaje y velocidad en deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar la ecuación de movimiento de un deslizamiento en suelo a partir de las fuerzas actuantes de un modelo de equilibrio límite.
- Proponer la metodología para la estimación de la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de la solución de la ecuación de movimiento.
- Verificar la aplicabilidad de la metodología propuesta con casos reportados en la bibliografía.

En este documento se presenta una recopilación de los modelos reportados en la literatura técnica para el cálculo de las variables cinemáticas de los deslizamientos, dónde se identifican las limitaciones de cada uno de estos. Con base en la revisión

bibliográfica, se seleccionó trabajar con el modelo propuesto por Miao et.al (2001) en busca del desarrollo de una metodología. Este modelo fue modificado añadiendo una componente de resistencia viscosa, para tener en cuenta el comportamiento reológico del material.

Sin embargo, durante el desarrollo matemático del modelo y en la verificación de su aplicabilidad, se evidenciaron fuertes limitaciones que son discutidas a lo largo del documento, las cuales conllevaron a que no fuera viable el desarrollo de una metodología que permitiera calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos. No obstante, en este documento se presenta detalladamente el desarrollo y análisis realizado al modelo, junto a recomendaciones para trabajo futuro que permitan el desarrollo adecuado de dicha metodología.

## **2. MARCOS DE REFERENCIA**

### **2.1. Marco de antecedentes**

Según McDougall (2017), los métodos que permiten predecir la distancia de viaje y velocidad de deslizamiento se encuentran agrupados en dos grandes categorías. A continuación, se presenta una recopilación de los modelos desarrollados a lo largo del tiempo, tanto para modelos empíricos como modelos analíticos (basados en la física).

#### *2.1.1. Modelos empírico-estadísticos*

Miao y otros (2001) hacen referencia a alcances empíricos que predicen los parámetros dinámicos de deslizamientos, propuestos por Scheidegger (1973) y Fang y Zhang (1988) entre otros; los cuales son desarrollados con referencia en datos de deslizamientos reales y son basados en la clasificación del tipo de deslizamiento.

En épocas más recientes, Glastonbury, Fell y Mostyn (2002) analizaron las características y el comportamiento de los detritos derivados de fallas rápidas de

macizos rocosos, a partir de análisis realizados a 184 deslizamientos rápidos derivados de macizos rocosos, haciendo énfasis en aquellas variables que determinen una mejor predicción del ángulo de viaje; realizaron múltiples análisis de regresión, llegando a una función de predicción la cual incluye los dos parámetros más relevantes en el ángulo de viaje, correspondientes al volumen deslizado y la pendiente de la superficie a lo largo del trayectoria de viaje de la masa. Hunter y Fell (2003) presentan un método para la predicción del ángulo de viaje de deslizamientos rápidos, predominantemente en suelos. El desarrollo se realizó con base en el mecanismo inicial de falla, el tipo de talud, volumen deslizado, geometría del talud y el grado de confinamiento de la trayectoria de viaje del deslizamiento; a partir de datos derivados de 350 deslizamientos, llegando a correlaciones para determinar el ángulo a partir de las variables mencionadas.

A finales de 2006, Van Asch, Van Beek y Bogaard (2007) estudiaron tres deslizamientos lentos en Europa, con el fin de predecir el movimiento de estos. Los parámetros de viscosidad del material de estos fueron determinados mediante el ensayo de corte en anillo controlado por deformación, donde se evidenció que los resultados de laboratorio son de 10 a 100 veces más bajos que las viscosidades obtenidas a partir del análisis realizado a las velocidades observadas en campo, lo cual puede ser explicado por la variación de la presión de poros. Por lo anterior, llegan a la conclusión que la predicción de los parámetros cinemáticos no se puede generalizar únicamente a partir de la viscosidad del material.

La inclusión de modelos digitales del terreno y herramientas geográficas han permitido una mejor comprensión de los deslizamientos. En 2005, Dewitte y Demoulin estudiaron el comportamiento de la cinemática de 13 deslizamientos en una zona montañosa al occidente de Bélgica; produjeron modelos 3D a partir de estereofotogrametría digital y aerofotografías, llegando a una precisión de 0.5m y calculando así los desplazamientos a partir de análisis multitemporal. En 2017, Schulz y otros implementaron la técnica geodésica espacial InSAR (Interferometría Radar de Apertura Sintética), la cual permite estimar el movimiento de la superficie del talud en escala de tiempo de días o meses; con esta técnica evalúan los

mecanismos responsables del movimiento del deslizamiento. A pesar de que estas herramientas permiten un mejor estudio del movimiento de deslizamientos lo hacen en zonas específicas, y debido a que las propiedades del material y condiciones varían según su ubicación espacial, -tal como ocurre con los modelos presentados anteriormente-, no se puede establecer una relación general empírica para la estimación del comportamiento cinemático del deslizamiento.

### *2.1.2. Modelos analíticos*

Hungr (1995) presenta un modelo (DAN) para el análisis de la distancia de viaje de flujos de tierra, de detritos y avalanchas, desarrollándolo como un medio continuo para simular las características de estos fenómenos, basado en la solución Lagrangiana de las ecuaciones de movimiento y permitiendo la selección de materiales reológicos. Años después, este modelo es presentado en tres dimensiones (DAN3D) y mejorando características como el cambio de las propiedades reológicas en el tiempo y la inclusión de material. Los modelos basados en mecánica del medio continuo y asociados con una fórmula versátil reológica han favorecido la predicción de la distancia de viaje y parámetros relevantes, incluso llegando a robustos modelos tridimensionales. A pesar de esto, la mayoría de los deslizamientos tratados han sido de tipo flujo, como flujo de lodo, flujo de detritos, entre otros (Laigle & Coussot, 1997) (Chen & Lee, Numerical simulation of debris flows, 2000) (Crosta, Imposimato, & Roddeman, 2003) (Revellino, Guadagno, & Hungr, 2008) (Cuomo, 2014); los cuales tienen un comportamiento distinto a los deslizamientos en suelo estudiados en este trabajo.

Los intentos realizados por calcular desplazamiento y velocidades de numerosos deslizamientos de bajas pendientes en materiales arcillosos usando el clásico análisis de equilibrio límite, da lugar a grandes desplazamientos y velocidades a diferencia de los registrados en campo (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996). Angeli y otros (1996), usaron un modelo visco-plástico para estudiar un deslizamiento de lodo en Italia, el cual al considerar la componente de resistencia viscosa y al ser usado con datos registrados del nivel freático, es capaz de estimar

la velocidad en los deslizamientos. Corominas y otros (2005) reafirman lo anterior a partir de la instrumentación de un deslizamiento traslacional en los Pirineos -zona montañosa al oriente de España- donde miden el nivel freático y los desplazamientos desde 1996, asegurando que según los resultados se evidencia la existencia de una fuerza viscosa. Para el desarrollo del modelo, emplean la ecuación de movimiento añadiendo la componente viscosa, llegando a resultados precisos según los datos registrados. Sin embargo, el modelo presentado no es capaz de considerar la deformación interna del suelo y de simular el movimiento de la pata del deslizamiento al considerar el movimiento como un solo punto, como ocurre con los modelos de masa agrupados (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides, 2001).

Los modelos basados en la teoría de la colisión han sido aplicados ampliamente para deslizamientos de alta velocidad con grandes desplazamientos (Liao, Xu, & Zheng, 1997) -diferentes a flujo de detritos-, donde el deslizamiento es idealizado como una serie de bloques deslizantes y los bloques adyacentes intercambian energía al colisionar con otros, teniendo en cuenta la deformación interna y simulando el movimiento de la pata del deslizamiento; sin embargo, la acumulación y pérdida de la energía de deformación en el cuerpo deslizante, causada por la no homogeneidad en la pendiente y en la superficie de falla, no es tenida en cuenta (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides, 2001). Miao y otros (2001) presentan un modelo de bloque deslizante, el cual considera la no homogeneidad de la velocidad y deformación de la masa deslizada, simultáneamente con la energía de deformación y disipación de energía durante el deslizamiento; sin embargo, debido a que este modelo no considera los parámetros reológicos del suelo es posible encontrar valores de distancia de viaje y velocidad de deslizamiento de magnitudes muy elevadas a diferencia de las registradas en campo (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996).

### *2.1.3. Modelos recomendados por el SGC (2016)*

Según la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa realizada por el SGC (2016), es posible cuantificar la distancia de viaje y velocidad de los deslizamientos con diferentes métodos empíricos y analíticos obtenidas a nivel mundial. Recomiendan que, debido a la variabilidad de las características de los materiales y las posibilidades de falla, se obtienen resultados que usualmente no son exactos; por lo cual el cálculo de estas variables se debe realizar con diferentes técnicas (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Una de las opciones propuestas por el SGC para el cálculo de distancia de viaje es mediante métodos empíricos en función de la geometría del talud, los cuales tienen como hipótesis que la distancia de viaje va a depender de la configuración geométrica teniendo en cuenta la altura y longitud de deslizamiento, como se puede observar en la Figura 2.1. Con base en esto se presentan diferentes correlaciones empíricas que incluyen la geometría del talud, con el fin de determinar el valor de distancia de viaje. Igualmente, en la Guía del Servicio Geológico Colombiano, esta variable también se puede estimar mediante la aplicación del método del bloque deslizante -descrito por el SGC para estimar la velocidad de viaje de la masa deslizada- (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

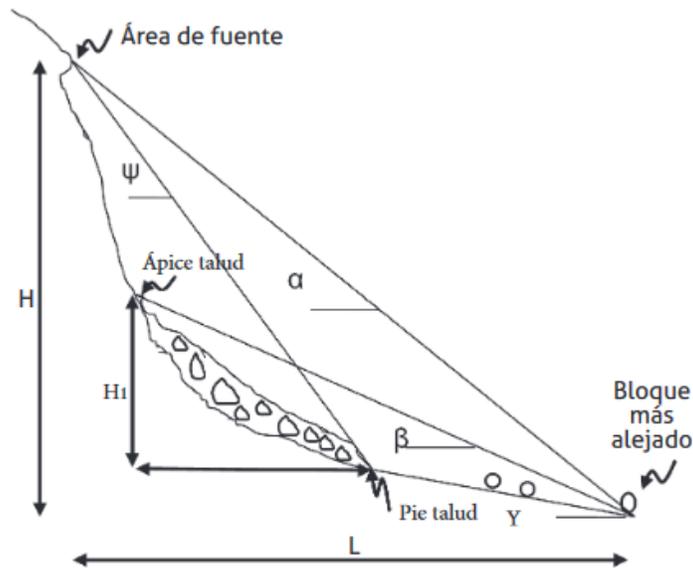


Figura 2.1 Variables geométricas para definir la distancia de viaje de un deslizamiento (Hungry, Corominas, & Eberhardt, Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity., 2005)

Por otro lado, para el cálculo de la velocidad de deslizamiento, en la Guía del SGC se propone emplear el método del bloque deslizante, en el cual se modela el movimiento de la masa deslizada como un solo bloque rígido sobre una superficie curva, tal como se puede observar en la Figura 2.2. Las suposiciones básicas son que actúa una fuerza friccionante constante y que la masa no disipa su energía cinética durante el trayecto (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Como se trató anteriormente, los métodos basados en correlaciones empíricas o modelos analíticos que consideran la masa como un cuerpo rígido y que no consideran la reología del material, no se encuentran en la capacidad de aplicarse a diferentes tipos de deslizamientos, ya que se ha evidenciado que se obtienen distancias de viaje y velocidades superiores a las registradas en campo.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

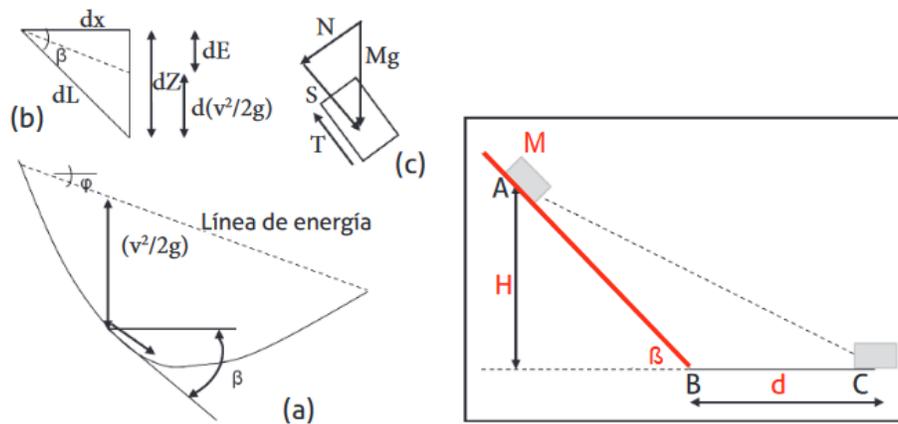


Figura 2.2 Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema (Yue, 2014).

## 2.2. Marco conceptual

En el desarrollo de esta investigación, se hace necesario tener en cuenta las siguientes definiciones, las cuales serán consideradas en la problemática planteada anteriormente. Un deslizamiento se entenderá como un movimiento en masa bajo efectos de la gravedad, que ocurre cuando el esfuerzo cortante excede el esfuerzo de resistencia del material deslizado (Cruden & Varnes, 1996).

Como se ha mencionado anteriormente, en esta propuesta investigativa únicamente se tendrán en cuenta los deslizamientos de suelos; por lo cual, según la clasificación actualizada de movimientos en masa propuesta por Varnes (Leroueil, Hungr, & Picarelli, 2013) solamente se estudiarán los siguientes deslizamientos (Véase Tabla 2.1): 11. *deslizamientos rotacionales en arcilla/limo*, 12. *deslizamientos traslacionales en arcilla/limo*, 13. *deslizamientos que generalmente alcanzan velocidades extremadamente rápidas según lo definido por Cruden y Varnes (1996) en grava/arena/detritos* y 14. *deslizamientos compuestos en arcilla/limo*.

El propósito principal de este trabajo es desarrollar una metodología para el cálculo de distancia de viaje y velocidad en deslizamientos en suelos para que ésta pueda ser aplicada en el análisis de vulnerabilidad y riesgo, por lo cual es fundamental entender estos términos. Inicialmente, distancia de viaje se interpretará como la

distancia horizontal en planta, medida desde la corona del talud hasta la pata del deslizamiento, una vez haya ocurrido (Cruden & Varnes, 1996). También es pertinente identificar la masa desplazada debido al deslizamiento, la cual se define como el material que se movió de su posición original en la ladera debido a movimientos en masa.

La velocidad de deslizamiento se referirá a la magnitud que relaciona la distancia de viaje con el tiempo que tarda en llevarse a cabo el deslizamiento (es decir, hasta que se detenga el movimiento de la masa deslizada) (Hungry O. , Numerical modelling of the motion of rapid flow-like landslides for hazard assessment, 2009); esta variable se tiene en cuenta para el análisis de vulnerabilidad ya que de esta depende el poder destructivo de los deslizamientos influyendo su intensidad. Para esto se hará uso de clasificación actualizada de movimientos en masa propuesta por Cruden y Varnes (Leroueil, Hungry, & Picarelli, 2013), en la cual se clasifican los deslizamientos según su velocidad

**Tabla 2.1 Nuevo sistema de clasificación de deslizamientos propuesto por Varnes. (Leroueil, Hungry, & Picarelli, 2013)**

**Table 5** Summary of the proposed new version of the Varnes classification system. The words in italics are placeholders (use only one)

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice</i> fall <sup>a</sup>	2. <i>Boulder/debris/silt</i> fall <sup>a</sup>
Topple	3. Rock block topple <sup>a</sup>	5. <i>Gravel/sand/silt</i> topple <sup>a</sup>
	4. Rock flexural topple	
Slide	6. Rock rotational slide	11. <i>Clay/silt</i> rotational slide
	7. Rock planar slide <sup>a</sup>	12. <i>Clay/silt</i> planar slide
	8. Rock wedge slide <sup>a</sup>	13. <i>Gravel/sand/debris</i> slide <sup>a</sup>
	9. Rock compound slide	14. <i>Clay/silt</i> compound slide
	10. Rock irregular slide <sup>a</sup>	

For formal definitions of the landslide types, see text of the paper.

<sup>a</sup> Movement types that usually reach extremely rapid velocities as defined by Cruden and Varnes (1996). The other landslide types are most often (but not always) extremely slow to very rapid

**Tabla 2.2 Escala de velocidad de deslizamientos**

**Table 2** Landslide velocity scale (WP/WLI 1995 and Cruden and Varnes 1996)

Velocity class	Description	Velocity (mm/s)	Typical velocity	Response <sup>a</sup>
7	Extremely rapid	$5 \times 10^3$	5 m/s	Nil
6	Very rapid	$5 \times 10^1$	3 m/min	Nil
5	Rapid	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/h	Evacuation
4	Moderate	$5 \times 10^{-3}$	13 m/month	Evacuation
3	Slow	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/year	Maintenance
2	Very slow	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely Slow			Nil

<sup>a</sup> Based on Hungr (1981)

Por otro lado, como se ha mencionado previamente, la componente de viscosidad es de gran importancia para la obtención de la distancia de viaje y de la velocidad de los deslizamientos, ya que tener en cuenta el modelo reológico en dicho cálculo permite aproximarse a los valores reales de las variables cinemáticas. Para esto es importante entender el concepto de reología como el estudio de las leyes de esfuerzo – deformación de los cuerpos, y como estos van variando (Folque, 1961). Y así mismo, la viscosidad se debe entender como la capacidad de un material de fluir libremente (White, 2006), y corresponde al coeficiente que relaciona el esfuerzo cortante de un material con su tasa de deformación.

### **2.3. Marco teórico**

Al evidenciar las dificultades presentadas anteriormente en los diferentes modelos desarrollados a lo largo del tiempo, se partió del modelo de bloque deslizante presentado por Miao y otros (2001) para proponer un método de cálculo que incluya la componente de resistencia viscosa al modelo. La teoría y desarrollo de este modelo, así como sus suposiciones, son presentadas a continuación.

Adicionalmente se presenta, concisamente, la teoría de los métodos de equilibrio límite, modelos constitutivos reológicos y diferencias finitas; los cuales son indispensables para el desarrollo de la metodología.

### 2.3.1. Modelo de bloque deslizante

El método del bloque deslizante ha sido usado para estimar distancias de viaje y velocidad de movimientos en masa. Consiste en que la masa se representa como bloques que se desplazan por una superficie debido a las fuerzas gravitacionales, considerando una resistencia friccional.

Miao et. al (2001) desarrollaron el modelo de bloque deslizante para la predicción de deslizamientos de altas velocidades. En este modelo, no se tiene en cuenta la causa del deslizamiento, la teoría se basa en el mecanismo de la distancia de viaje y las altas velocidades de los deslizamientos. La rápida y gran caída del centro de gravedad de la parte trasera del deslizamiento es considerada la fuente dinámica y la alta velocidad es debida a la disminución resultante de la fuerza de fricción. El modelo presentado se basa en las siguientes suposiciones:

- Los bloques se mueven continuamente, esto es, ellos no se separan a nivel de macro escala, mientras la altura y el ancho de cada bloque varían durante el transporte.
- La acumulación y liberación de la energía de deformación ocurre durante el proceso de transporte.

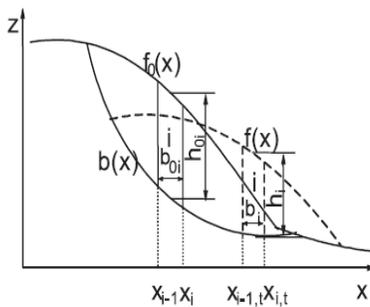


Figura 2.3. Perfil del deslizamiento. (Miao, Liu, Niu, & Ma, 2001)

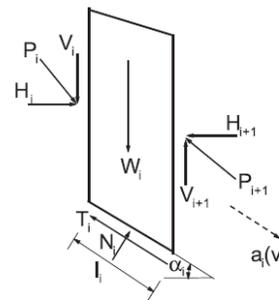
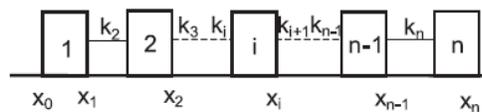


Figura 2.4. Fuerzas actuando en un bloque del deslizamiento. (Miao, Liu, Niu, & Ma, 2001)

Este tipo de deslizamiento es considerado como un problema de deformación plana, donde  $b(x)$  corresponde a la superficie de falla conocida, la superficie del talud a un tiempo 0 y un tiempo  $t$  como  $f_0(x)$  y  $f(x)$  respectivamente, como se presenta en la

Figura 2.3. La masa deslizada es dividida en n bloques contando secuencialmente desde la corona hasta la pata. Las fuerzas en un bloque dado son mostradas en la Figura 2.4, donde  $W_i$  es el peso del bloque,  $H_i$  y  $V_i$  son las componentes horizontales y verticales, respectivamente, de las fuerzas entre dovelas  $P_i$  (que se asume que es paralela a la base del bloque y actúa en el punto medio de la dovela); y  $N_i$  y  $T_i$  son la fuerza normal y fuerza de fricción en la base, respectivamente. Además,  $x_i$ ,  $v_i$  y  $a_i$  corresponden a la posición, velocidad y aceleración del bloque.

El modelo considera bloques conectados por resortes para analizar el desplazamiento del deslizamiento, como se observa en la Figura 2.5.



*Figura 2.5. Modelo de bloques simplificado por resortes. (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides, 2001)*

El cálculo del coeficiente de rigidez de los resortes que conectan las masas es calculado a partir de la siguiente expresión, obtenida al igualar la energía de deformación axial con la energía elástica.

$$k_i = E_0 \frac{h_{0i}}{b_{0i}}$$

*Ecuación 1*

Donde  $E_0$  es el módulo de deformación del suelo.  $h$  y  $b$  corresponden a la altura y la base de la dovela, respectivamente.

Mediante la ley de Hooke, se obtienen las fuerzas que actúan en las caras de las dovelas. Si la fuerza entre partículas es a tensión y el esfuerzo de tensión alcanza a la resistencia por tensión del suelo,  $\sigma_s^+$ , se generan grietas de tracción, entonces la fuerza entre partículas y la energía desaparecen, sin embargo, debido a la suposición de que los bloques se mantienen en contacto, el bloque se alargará para mantener la continuidad de la masa y las fuerzas entre tajadas se mantiene como cero.

Opuesta a la dirección de movimiento se tiene la fuerza resistente en la base de la tajada,  $T_i$ , la cual es función de la reología del material. En este caso, Miao et. al (2001) considera un modelo friccional, en términos del esfuerzo normal total:

$$T_i = N_i \tan \varphi_{di}$$

*Ecuación 2*

Donde  $\varphi_{di}$  es el ángulo de fricción dinámico entre el bloque y la superficie de falla, similar al ángulo de fricción total de Chen y Lee (2000), el cual depende del ángulo de fricción del suelo en la superficie de falla.

- Para deslizamientos rápidos, Xu (1997) y Liao et al. (1997) dividen la superficie de falla en cuatro zonas, la zona de grieta de tracción en la parte superior, la sección de deslizamiento por creep en la parte media, la sección de falla por cortante entre las dos primeras y la sección en bloque en la parte frontal, cada sección tiene un ángulo de fricción dinámico diferente. Incluyendo el ángulo en la zona de tránsito, después de que la masa abandona la superficie de falla, se requieren cinco ángulos de fricción, los cuales deben ser obtenidos experimentalmente o por análisis de deslizamientos análogos existentes
- Para cualquier bloque, la velocidad y aceleración se asumen paralelas a la superficie de falla en la base del bloque en un tiempo  $t$ . Como la fuerza entre las tajadas debe ser paralela a la base de la tajada anterior, la ecuación de movimiento del bloque se puede escribir como:

$$m_i a_i = P_i \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - P_{i+1} + W_i \sin \alpha_i - T_i$$

*Ecuación 3*

$$m_i \frac{V_i^2}{r_i} = N_i - W_i \cos \alpha_i - P_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

*Ecuación 4*

Donde  $m_i$  es la masa del bloque, y  $r_i$  el radio de curvatura de la superficie de falla. Debido que, en la mayoría de los deslizamientos, el cambio en la curvatura de la

superficie de falla es despreciable, se asume  $r_i \rightarrow \infty$ , de manera que la Ecuación 4 se transforma en:

$$0 = N_i - W_i \cos \alpha_i - P_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

*Ecuación 5*

- Si las deformaciones de todos los bloques se conocen para un tiempo  $t$ , las resultantes de las fuerzas entre tajadas,  $P_i$  y  $P_{i+1}$ , se pueden determinar fácilmente, entonces la aceleración  $a_i$  se puede calcular con la Ecuación 2, la Ecuación 3 y la Ecuación 4.
- Seleccionando un adecuado intervalo de tiempo  $\Delta t$ , y asumiendo que la aceleración es constante en el intervalo  $t$  y  $t+\Delta t$ , la velocidad  $v_{i,t+\Delta t}$ , del bloque en el tiempo  $t+\Delta t$ , está dado como:

$$V_{i,t+\Delta t} = V_i + a_i \Delta t$$

*Ecuación 6*

- La localización del bloque está dada por:

$$x_{i,t+\Delta t} = x_i + \frac{V_i + V_{i,t+\Delta t}}{2} \cdot \Delta t \cdot \cos \alpha_i$$

*Ecuación 7*

- Entonces el ancho y la altura del bloque están dados por:

$$b_{i,t+\Delta t} = x_{i,t+\Delta t} - x_{i-1,t+\Delta t}$$

*Ecuación 8*

$$h_{i,t+\Delta t} = C \cdot \frac{V_{0i}}{b_{i,t+\Delta t}}$$

*Ecuación 9*

Donde  $V_{0i} = h_{0i} b_{0i}$  es el volumen inicial del bloque y  $C$  es el coeficiente de variación de volumen, que describe la compresibilidad de la masa de suelo. Debido a que el efecto de compresibilidad es insignificante en la mayoría de los casos,  $C$  se toma como 1.0.

- Debido a que la  $a_i$  será menor que cero en algunos periodos, el valor de  $v_{i,t+\Delta t}$  calculado con la Ecuación 6 puede ser negativo, lo que en este caso daría un movimiento hacia atrás lo que no es posible, por lo tanto, en esos casos se toma como cero. El cálculo termina cuando la velocidad de todos los bloques da cero.
- Hungr (1995) considera una condición inicial de tierras en reposo, lo que desconoce las deformaciones del terreno antes de manifestarse la falla. En el modelo se asume como condición inicial las fuerzas entre las partículas que se obtienen a partir de análisis de equilibrio límite.
- Las fuerzas iniciales entre las tajadas se toman para la condición en la que el FS es igual a 1.0. En el modelo se trabaja como condición crítica  $|FS - 1| \leq 0.05$ , para tener en cuenta las incertidumbres en el método de cálculo.
- El análisis de estabilidad da las fuerzas iniciales entre tajadas  $P_{0i}$ , a partir de las cuales se calculan las componentes horizontales  $H_{0i}$ . De manera que las aceleraciones iniciales se pueden obtener de la Ecuación 2, la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

### *2.3.2. Métodos de equilibrio límite*

Los métodos de equilibrio límite han sido usados ampliamente en la investigación y en la práctica de la ingeniería civil, para llevar a cabo el análisis de estabilidad de los taludes. Las técnicas más comunes son aquellas en las que el talud se discretiza en tajadas -dovelas- (Liu, Shao, & Li, 2014) y que, al ser problemas estáticamente indeterminados, se resuelven a partir de suponer una distribución de fuerzas que actúan entre las dovelas.

Entre los métodos de equilibrio límite más concurrentes, se encuentran los propuestos por Bishop (1955), Spencer (1967), Morgenstern-Price (1965), Corps of engineers (1970), Unbalanced Thrust (1995), entre otros. Estos se diferencian por las condiciones de equilibrio estático que consideran y/o la hipótesis sobre las fuerzas que actúan entre las dovelas. En la Tabla 2.3 se resumen las consideraciones de cada modelo.

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

**Tabla 2.3. Métodos de equilibrio límite. Modificado de (Universidad Politécnica de Catalunya, 2018)**

Método	Equilibrio de fuerzas		Equilibrio de momentos	Hipótesis fuerzas entre dovelas
	Vertical	Horizontal		
Bishop (1955)	Si	Si	Si	Fuerzas entre dovelas horizontal
Spencer (1967)	Si	Si	Si	Fuerzas entre dovelas paralelas a la superficie de falla
Morgenstern Price (1965)	Si	Si	Si	La dirección de las fuerzas entre dovelas se define mediante la función predeterminada y se resuelve mediante equilibrio de fuerzas y momentos
Corps of Engineers (1970)	Si	Si	No	La dirección de las fuerzas entre dovelas se supone paralela al ángulo medio de la superficie del talud
Unbalanced thrust (1995)	Si	Si	Si	Las fuerzas entre dovelas se suponen paralelas a la superficie de falla y actúan en el punto medio de la dovela

Principalmente, los métodos consisten en determinar si la resistencia del suelo es suficiente para soportar los esfuerzos que causan la falla. Este tipo de análisis requiere información sobre los parámetros de resistencia del suelo.

Para evaluar la estabilidad de los taludes es necesario realizar la caracterización del suelo, identificar las condiciones de infiltración y del agua subterránea del talud, establecer su perfil topográfico, suponer la superficie de falla del deslizamiento y calcular el factor de seguridad. Este último corresponde a la relación entre fuerzas y/o momentos resistentes y actuantes. Supone que en el caso de una falla, en la cual las fuerzas resistentes son menores o iguales a las fuerzas actuantes, se obtiene un factor de seguridad de 1.0 o menor.

Para el desarrollo de esta metodología, se describen brevemente dos de los modelos de equilibrio límite -los cuales permiten determinar el factor de seguridad en superficies de falla no circulares- en los que el talud es dividido en dovelas, y entre estas existe una interacción mediante fuerzas en las caras laterales. Dichos modelos corresponden al propuesto por Morgenstern & Price (1965) y a uno de los métodos usados con frecuencia en China (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block

model for the runout prediction of high speed landslides, 2001) denominado “Unbalanced thrust Method”.

Morgenstern & Price (1965) es uno de los modelos de equilibrio límite preferidos, debido a que considera superficies de falla no circulares y satisface el equilibrio de fuerzas en cada dovela y el de momentos en la masa deslizada. Debido a que la solución numérica de este método es compleja, Zhu et. al (2005) proponen un algoritmo conciso y sencillo de implementar para satisfacer las ecuaciones derivadas del método Morgenstern & Price y así calcular el factor de seguridad y las fuerzas entre dovelas.

El método “Unbalanced thrust Method” (UTM) permite calcular el factor de seguridad, con una superficie de falla no circular, mediante un proceso iterativo en el cual se calculan las fuerzas entre dovelas, desde la corona hasta la pata del talud, a partir de equilibrio de fuerzas. Las ecuaciones desarrolladas para el cálculo de las fuerzas entre dovelas son presentadas a continuación

$$P_{i+1} = W_i \sin \alpha_i - \left( \frac{c_i L_i}{FS} + W_i \cos \alpha_i \frac{\tan \phi_i}{FS} \right) + \phi_i P_i$$

*Ecuación 10*

$$\phi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \phi_i}{FS} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

*Ecuación 11*

En este método se asume que las fuerzas entre dovelas actúan paralelas a la superficie de falla y que no existen fuerzas a tracción en las dovelas. El F.S. es obtenido cuando el cálculo de la fuerza entre dovelas sea cero para la última dovela.

### *2.3.3. Modelos constitutivos reológicos*

A comienzos del siglo XX el Profesor Eugene Bingham definió reología como el estudio de la deformación y el flujo de la materia (Barnes, 1989). El estudio del comportamiento reológico de los materiales ha llevado a que diferentes autores planteen modelos constitutivos en los que relacionan el esfuerzo cortante con la

tasa de deformación. Estos han sido aplicados para la modelación de movimientos en masa como flujos de detritos. Los modelos constitutivos más concurrentes son descritos por Wang (2008).

#### *2.3.3.1. Modelo fluido Newtoniano*

Puede ser usado para describir el flujo de mezclas agua-sedimento a bajas concentraciones y cuando la fase solida se pueda expresar por una viscosidad efectiva equivalente. La relación entre esfuerzo cortante y la tasa de deformación está dada por:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz}$$

*Ecuación 12*

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $\mu$  es la viscosidad efectiva equivalente y  $\frac{du}{dz}$  es la tasa de corte.

#### *2.3.4. Modelo fluido no Newtoniano*

Describe el régimen de flujo donde la viscosidad del fluido varía con la tasa de esfuerzo cortante. Una amplia variedad de relaciones no lineales ha sido desarrollada para fluidos no Newtonianos. Entre ellas está el modelo Bingham, modelo Herschel-Bulkley y modelo cuadrático; los cuales han sido aplicados para la simulación del comportamiento de flujo de detritos.

El **modelo Bingham** (modelo viscoplástico lineal) describe el comportamiento de material inicialmente sólido que no fluye hasta alcanzar un valor crítico de esfuerzo cortante, a partir de ese momento el material empieza a fluir de forma Newtoniana. El modelo Bingham tiene una forma simple y puede ser tratado fácilmente en el cálculo analítico, razón por la cual ha sido ampliamente usado para definir propiedades reológicas de lodos de grano fino a comparación de otros fluidos no newtonianos. En una dimensión, la relación entre esfuerzo cortante y tasa de deformación es:

$$\frac{du}{dz} = 0 \text{ for } \tau < \tau_o$$

*Ecuación 13*

$$\tau = \tau_o + \mu \frac{du}{dz} \text{ for } \tau > \tau_o$$

*Ecuación 14*

Estudios reológicos en laboratorio de lodos de grano fino han demostrado dependencia de esfuerzo de fluencia aparente y viscosidad en la textura y concentración de sedimentos del flujo de detritos. En general, la concentración de sedimentos afecta la magnitud del esfuerzo de fluencia y la viscosidad de lodos de grano fino, pero en general no afecta el comportamiento Bingham; la viscosidad aparente y esfuerzo de fluencia son dependientes de la tasa de corte y extremadamente sensibles a la concentración de sedimentación, ambos incrementan en un orden de magnitud sobre un angosto rango de concentración de sedimentos; y dada una concentración de sedimentos, flujos con una larga proporción de finos tienen más alto esfuerzo de fluencia y viscosidad aparente. Se ha evidenciado que los lodos de grano fino tienen propiedades de reducción del cortante, es decir, la viscosidad decrece gradualmente con el incremento de la tasa de corte; el modelo Bingham puede sobrestimar el esfuerzo cortante real del material.

El **modelo Herschel-Bulkley** (no lineal viscoplástico) ha sido propuesto para simular el comportamiento de la reducción de cortante en las mezclas de agua sedimento. La relación está dada por

$$\frac{du}{dz} = 0 \text{ for } \tau < \tau_o$$

*Ecuación 15*

$$\tau = \tau_o + \mu_\eta \left( \frac{du}{dz} \right)^\eta \text{ for } \tau > \tau_o$$

*Ecuación 16*

$\eta$  es el índice de comportamiento de flujo y  $\mu_\eta$  es el índice de consistencia. Coussot et al (1998) indicaron que este modelo es aplicable a la simulación natural de flujo de detritos con fracción de finos (<0.004mm) mayor al 10%. Un amplio rango de ensayos reométricos se han llevado a cabo, que incluyen pruebas en plano inclinado, pruebas de reómetro a gran escala y pruebas de campo para determinar los parámetros reológicos para el modelo de Herschel-Bulkley. Se ha demostrado que el modelo de Herschel-Bulkley es capaz de ajustar datos experimentales con  $\eta = 1/3$ .

O'Brien and Julien (1985) y Julien and Lan (1991) propusieron un modelo constitutivo reológico cuadrático para el comportamiento de flujos de sedimentos hiperconcentrados. El esfuerzo total cortante en el modelo incluye 4 tipos diferentes de esfuerzo: de fluencia, viscoso, turbulencia y dispersivo. El esfuerzo de fluencia tiene en cuenta la cohesión natural del grano fino de la mezcla, el esfuerzo viscoso describe la contribución de la viscosidad de las partículas del fluido al esfuerzo cortante total, el esfuerzo dispersivo y turbulento resulta del flujo turbulento y la colisión de partículas. Cuando se expresa en términos de tasa de corte, el esfuerzo de fluencia es independiente del gradiente de velocidad, el esfuerzo viscoso varía linealmente con el gradiente de velocidad, y turbulencia y dispersión incrementan con la segunda potencia del gradiente de velocidad. La relación se expresa como

$$\frac{du}{dz} = 0 \text{ for } \tau < \tau_o$$

*Ecuación 17*

$$\tau = \tau_o + \mu \frac{du}{dz} + \xi \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \text{ for } \tau > \tau_o$$

*Ecuación 18*

Donde  $\xi$  es el parámetro turbulento dispersivo.

El esfuerzo de fluencia es muy importante en modelos de fluidos no Newtonianos. En general, resulta de la cohesión de partículas finas en el flujo de detritos. Como

consecuencia, la aplicación de modelos constitutivos no Newtonianos requiere que el flujo de detritos contenga un volumen significativo de sedimento fino. El incremento de material granular altera el comportamiento constitutivo de lodos causando que el comportamiento reológico no sea el ideal. Por tanto, los modelos de fluidos no newtonianos aparentan ser aplicables para simular el comportamiento de deslizamientos o flujos en arcillas y turbas, de acuerdo con la clasificación propuesta por Hungr et al (2001).

#### *2.3.4.1. Modelo friccional de Coulomb*

Varios experimentos indican que la masa granular se comporta como un material Coulomb que obedecen esta ley.

$$\tau = \sigma \tan \varphi$$

*Ecuación 19*

Según varios experimentos realizados por Hungr y Morgenstern, el esfuerzo cortante no depende de la tasa de corte en flujos granulares. Savage and Hotter (1989) formularon el "Depth averaged model" para flujos granulares secos y en plano inclinado, asumiendo esfuerzo cortante y normal en la base del flujo, obedeciendo la ley de Coulomb. La revisión de la literatura permite decir que este modelo ha sido aplicado con éxito en varios casos históricos. En vertederos de la mina de carbón de Rocky Mountain fueron analizados por retro cálculo mediante un programa de análisis dinámico (Hungr 1995) con un modelo de fricción. El ángulo de fricción para este caso varió entre 10 y 24 grados.

#### *2.3.4.2. Modelo Coulomb viscoso*

Es la combinación del esfuerzo de fluencia y la viscosidad del lodo en los intersticios del material granular. El esfuerzo de fluencia consiste en partes de cohesión y fricción (Johnson and Rodine, 1984). La parte friccional es proporcionada por el esfuerzo normal actuando en el plano de corte. Para una dimensión, la ecuación es

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

$$\frac{du}{dz} = 0 \text{ for } \tau < \tau_c + \sigma \tan \phi$$

*Ecuación 20*

$$\tau = \tau_c + \sigma \tan \phi + \mu \frac{du}{dz} \text{ for } \tau > \tau_c + \sigma \tan \phi$$

*Ecuación 21*

Lo anterior sugiere que  $\tau_o = \tau_c + \sigma \tan \phi$ . Esto indica que las características de la velocidad son similares al modelo Bingham, por lo cual estos modelos son clasificados como viscoplásticos. Sin embargo, estos dos modelos reflejan diferente comportamiento mecánico de los flujos. El esfuerzo de fluencia de un fluido Bingham surge principalmente de la cohesión del fluido intersticial; la interacción entre partículas es insignificante. En el modelo viscoso de Coulomb, la parte de fricción tiene efectos significativos sobre el esfuerzo de fluencia total. La determinación de la resistencia al flujo total de un fluido viscoso de Coulomb requiere tener en cuenta los efectos de la fricción por contacto de partículas.

#### *2.3.4.3. Modelo de fluido Voellmy*

Ha sido usado por varios años para modelar movimiento de avalanchas de nieve. Enraizado en la teoría del flujo de canal abierto, el modelo de Voellmy supone que la resistencia al corte en la base de una avalancha viene dada por la suma de una fricción tipo Coulomb y un término de turbulencia que varía con el cuadrado de la velocidad de flujo:

$$\tau = \sigma \tan \phi + \gamma \frac{u^2}{\xi}$$

*Ecuación 22*

Donde  $u$  es la velocidad longitudinal y  $\gamma$  es el peso unitario. Los parámetros pueden ser determinados mediante retro cálculo de casos históricos, así que estos tienden a variar en un amplio rango dependiendo del material.

### *2.3.5. Método de diferencias finitas*

El MDF tiene como base las expansiones de las series de Taylor, que permiten hacer aproximaciones a las derivadas por la izquierda, por la derecha o centrada (Chapra & Canale, 2014). A continuación, se resumen las expresiones obtenidas para realizar las aproximaciones a la primera y segunda derivada de una función.

- *Aproximación por izquierda de diferencias finitas de la primera derivada*

$$f'(x_i) \cong \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h}$$

*Ecuación 23*

- *Aproximación por derecha de diferencias finitas de la primera derivada*

$$f'(x_i) \cong \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h}$$

*Ecuación 24*

- *Aproximación centrada de diferencias finitas de la primera derivada*

$$f'(x_i) \cong \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h}$$

*Ecuación 25*

Por otro lado, la segunda derivada también se desarrolla con base en las series de Taylor, permitiendo la estimación diferencial numérica (Véase Ecuación 26).

$$f''(x) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2}$$

*Ecuación 26*

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Determinación de fuerzas actuantes y resistentes en un talud

Así como en los modelos de equilibrio limite clásicos, en esta metodología el deslizamiento es considerado como un problema de deformación plana discretizado mediante dovelas; además se asume que la superficie de falla crítica es conocida.

Las fuerzas actuantes y resistentes para cada dovela, consideradas en esta investigación, se presentan en la Figura 3.1. Estas corresponden a las asumidas en el método “Unbalanced thrust Method”, donde las fuerzas entre dovelas actúan en la mitad de la dovela y en dirección paralela a la superficie de falla. Para la dovela  $i$ ,  $W_i$  corresponde al peso,  $P_i$  es la fuerza actuando entre las dovelas,  $N_i$  es la fuerza normal en la base de la dovela,  $T_i$  es la fuerza resistente que se opone al movimiento y  $U_i$  es la fuerza ejercida por la presión de poros que actúa en la base de las dovelas. Adicionalmente,  $\alpha_i$ ,  $b_i$  y  $h_i$  corresponden respectivamente al ángulo de inclinación en la base de la dovela, el ancho de la dovela y su altura respecto al punto medio de las tajadas en análisis.

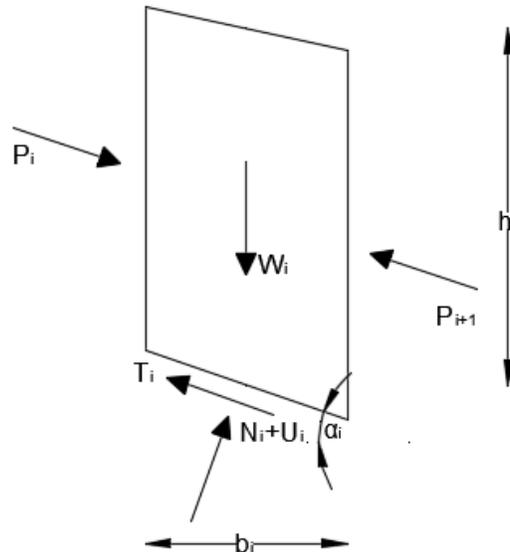
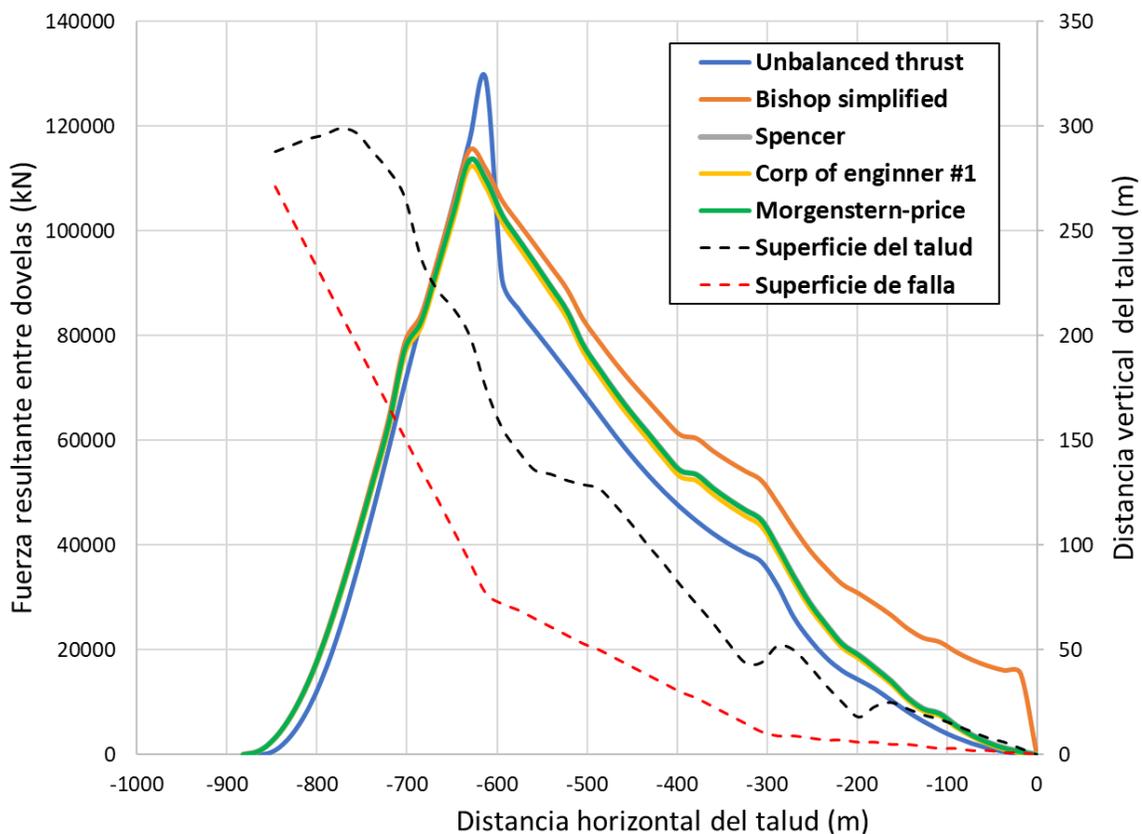


Figura 3.1 Diagrama de fuerzas actuantes en la dovela en método UTM

Se aclara que, para aplicar la metodología propuesta en esta investigación, es válido usar los diferentes métodos de equilibrio límite en los cuales el talud es discretizado en dovelas y entre ellas actúa una fuerza. Sin embargo, en caso de implementar otro modelo de equilibrio límite (diferente a UTM), se deben determinar fuerzas equivalentes a las supuestas en esta metodología.

Para observar las diferencias entre el método seleccionado (UTM) y otros métodos de equilibrio límite clásicos, se comparó la distribución de las fuerzas entre dovelas a lo largo de un talud. A manera de ejemplo, se presenta en la Figura 3.2 las fuerzas entre dovelas del deslizamiento “Sale Mountain” (descrito más adelante) por el método UTM y por otros métodos clásicos implementados en el software Slide®. Se observa que estas tienen una distribución con la misma tendencia, y así mismo, sus valores se encuentran en los mismos ordenes de magnitud.



*Figura 3.2. Comparación de fuerzas entre dovelas para métodos de equilibrio límite.*

### **3.2. Modelo modificado de bloque deslizante**

El modelo propuesto para el desarrollo de esta metodología se hizo con base en el modelo de bloque deslizante de Miao et. al (2001) para la predicción de la distancia de viaje en deslizamientos rápidos.

Los deslizamientos clasificados de rápidos a extremadamente rápidos (según Hung et. al -2013-), generalmente son formados en laderas con pendientes altas en la parte superior de la masa deslizada y pendientes bajas en la parte inferior. Una vez la parte media y trasera de la masa deslizada comienzan el movimiento a altas velocidades, la parte frontal es empujada; esta masa deslizada puede sobrepasar ríos y diferentes obstáculos, volviéndose cada vez más delgada hasta disipar totalmente su energía cinética. Algunos objetos ubicados en la masa deslizada (i.e. arboles), especialmente en la parte media o trasera, mantienen su forma a pesar de viajar varios metros, lo cual indica que, en este tipo de deslizamientos la masa deslizada mantiene una cierta cantidad de su integridad. (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001).

El modelo de bloque deslizante propuesto por Miao et. al (2001) considera como fuerza resistente una componente friccionante, sin embargo, los efectos viscosos del suelo no se consideran. En el modelo que se plantea en el presente trabajo de grado se realizaron diferentes modificaciones, con el fin de considerar efectos viscoplásticos en los deslizamientos.

El desarrollo del modelo planteado en este trabajo fue realizado en términos de esfuerzos efectivos.

#### *3.2.1. Suposiciones básicas*

Se trabajarán deslizamientos en suelos clasificados de rápidos a extremadamente rápidos. El deslizamiento se modeló como un problema de deformación plana, en el cual no se considera la causa del deslizamiento; el modelo se enfoca principalmente en el mecanismo de viaje de la masa deslizada. Este modelo parte de la condición

inicial de las fuerzas entre dovelas que actúan al momento que ocurre la falla, obtenidas a partir de un método de equilibrio límite.

Durante el movimiento, el ancho y la altura de cada dovela varían manteniendo su volumen constante. Adicionalmente, la acumulación y liberación de la energía de deformación ocurre durante el transporte y es tomada en cuenta mediante resortes que conectan las dovelas.

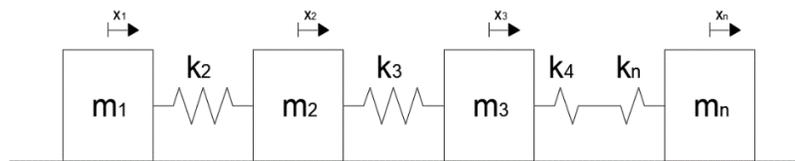
La masa deslizada se divide en  $n$  bloques, contados secuencialmente desde la corona hasta la pata del deslizamiento; en cada bloque actúan las fuerzas presentadas previamente. Así como las fuerzas entre dovelas, la aceleración se considera paralela a la superficie de falla.

Se supone que, durante el movimiento, la presión de poros actúa en la base de cada dovela como una fuerza desestabilizante. Durante el movimiento de la masa deslizada, el nivel freático se considera proporcional a la altura de cada dovela respecto a su posición inicial.

El movimiento es simplificado a un modelo de bloques conectados por resortes, y en la base de cada dovela se consideran las componentes de resistencia friccionante y viscosa, representadas mediante un sistema en paralelo de un “slider” y un amortiguador.

### *3.2.2. Modelo de masa conectado por resortes*

El modelo de bloques conectados por resortes fue utilizado por Miao et. al (2001) para modelar el movimiento del deslizamiento. En la Figura 3.3 se esquematiza el modelo simplificado de masa conectado por resortes.



*Figura 3.3 Diagrama de masas conectadas por resortes*

Los resortes representan un comportamiento elástico entre las dovelas durante el movimiento, y se relacionan con la acumulación y liberación de la energía de deformación. Las ecuaciones para este modelo se presentan a continuación:

- La fuerza horizontal ejercida sobre el bloque  $i$  por el bloque  $i-1$ , es obtenida a partir de la ley de Hooke:

$$F_i = k_i \delta_i$$

*Ecuación 27*

Donde  $\delta_i$  es la variación del ancho de la tajada (positiva compresión) y  $k_i$  es la constante de rigidez del resorte.

Para determinar la constante de rigidez de los resortes, se adoptó lo propuesto por Miao et. al (2001) y Mora (2016), donde  $k_i$  es expresado en función del módulo de elasticidad del material y de la sección de las tajadas.

- Se asume que el bloque se puede considerar como un rectángulo de ancho  $b_{0i}$  y altura  $h_{0i}$ ; el esfuerzo horizontal (por metro de profundidad) está dado por:

$$\sigma = \frac{F_i}{h_{0i}}$$

*Ecuación 28*

- La energía de deformación axial ( $e_h$ ) del bloque inducida por la fuerza horizontal entre las tajadas está dada por:

$$e_h = \frac{\sigma^2}{2E_{0i}} b_0 \cdot h_{0i} = \frac{F_i^2 b_{0i}}{2E_{0i} h_{0i}}$$

*Ecuación 29*

- La variación del ancho del bloque es obtenida a partir del módulo de elasticidad:

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

$$\delta_i = \frac{\sigma}{E_{0i}} b_{0i} = \frac{F_i b_{0i}}{E_{0i} \cdot h_{0i}}$$

*Ecuación 30*

Donde  $E_{0i}$  es el módulo elástico de deformación del bloque.

- La energía de deformación ( $e_s$ ) almacenada por el resorte equivalente con un cambio de longitud  $\delta_i$  está dada por:

$$e_s = \frac{k_i \delta_i^2}{2} = \frac{k_i (F_i b_{0i})^2}{2(E_{0i} \cdot h_{0i})}$$

*Ecuación 31*

- Haciendo  $e_h=e_s$ , se obtiene de la Ecuación 29 y la Ecuación 31

$$k_i = E_0 \frac{h_{0i}}{b_{0i}}$$

*Ecuación 32*

Entonces la fuerza horizontal entre las tajadas se puede calcular con la Ecuación 27

### *3.2.3. Modelo reológico Coulomb-viscoso*

Autores de la literatura técnica afirman que los modelos para determinar distancia de viaje de deslizamientos que consideran únicamente componentes de resistencia friccionante, dan lugar a grandes desplazamientos y velocidades a diferencia de las registradas en campo (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996). Además, se ha evidenciado la existencia de fuerzas viscosas en los deslizamientos, donde la componente viscosa, acoplada con la ecuación de movimiento, ha llevado a resultados precisos (Corominas, Moya, Ledesma, Lloret, & Gili, 2005).

A partir de observaciones de campo y experimentos en flujos de detritos, Johnson (1970) propuso que la resistencia dinámica total es una combinación del esfuerzo de fluencia y de la resistencia friccional y viscosa. Johnson (1970), realizó una

modificación al esfuerzo de fluencia del modelo de Bingham, dividiendo este en las componentes de cohesión y fricción, dando lugar al modelo Coulomb – Viscoso. (Chen & Lee, Runout analysis of slurry flows with Bingham model, 2002).

Teniendo en cuenta la suposición en la que durante el movimiento del deslizamiento no actúan fuerzas cohesivas ( $\tau_c = 0$ ), se tendrá en cuenta únicamente la componente de resistencia friccional y viscosa, mediante un sistema en paralelo de un “slider” y un amortiguador, respectivamente (Figura 3.1); tal como lo propuso Angeli et. al (1996).

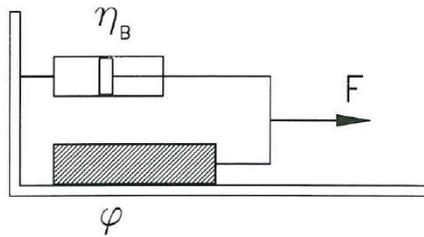


Figura 3.4 Modelo reológico (Angeli, Gasparetto, Menotti, Pasuto, & Silvano, 1996)

Este modelo (Coulomb-Viscoso) es considerado como un modelo viscoplástico (Wang X. , 2008) en el cual se encuentra la ecuación friccional de Coulomb  $T_i = N_i \tan \varphi_{di}$  y un término en función del coeficiente de viscosidad.

Este modelo reológico actuará en dirección opuesta al movimiento de los bloques, actuando como una fuerza resistente. En este caso, el termino  $T_i$  corresponde a:

$$T_i = N_i \tan \varphi'_i + \mu_i \frac{dx_i}{dt}$$

*Ecuación 33*

Donde  $\varphi'_i$  es el ángulo de fricción dinámica entre el suelo deslizado y la superficie recorrida,  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica y  $\frac{dx}{dt}$  es la velocidad de la masa.

### 3.2.4. Ecuación de movimiento

A partir de las suposiciones realizadas y de los modelos planteados, se tiene un modelo de masa conectado por resortes, con una fuerza resistente correspondiente al modelo reológico Coulomb-viscoso; esquematizado en la Figura 3.5

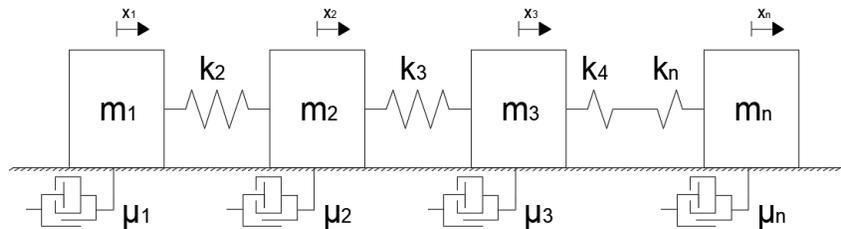


Figura 3.5 Diagrama de masa conectada por resortes y amortiguadores

Para determinar la ecuación de movimiento, se realizó el equilibrio de fuerzas para cada dovela en dirección paralela y perpendicular a la superficie de falla, considerando la segunda ley de Newton

$$\sum F = ma$$

Ecuación 34

Las ecuaciones de movimiento se desarrollaron para la primera dovela, dovelas intermedias y para la última dovela. A continuación, se observa el desarrollo de la ecuación de movimiento en cada una de las tres condiciones.

- *Diagrama y ecuación de movimiento para las dovelas intermedias*

En la Figura 3.6 se pueden observar las fuerzas actuantes en la dovela intermedia del modelo que se describió anteriormente; con base en esto se obtuvo la Ecuación 39 y la Ecuación 40. Adicionalmente, es importante mencionar que para efectos de

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

simplificar el desarrollo de las ecuaciones se tuvieron en cuenta las siguientes constantes.

$$A_i = k_i [\cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan(\varphi')]$$

Ecuación 35

$$C = \frac{\mu_i}{\Delta t}$$

Ecuación 36

$$D = \frac{m_i}{\Delta t^2}$$

Ecuación 37

$$E_i = W_i [\sin \alpha_i - \cos \alpha_i \tan \varphi'] + U_i \tan \varphi'$$

Ecuación 38

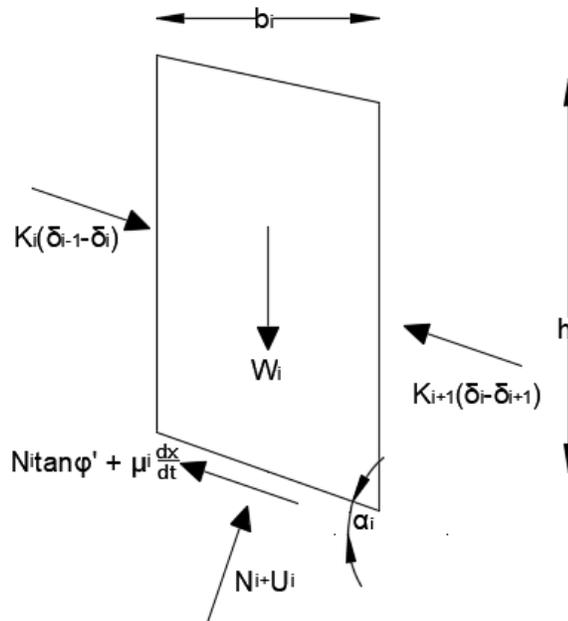


Figura 3.6 Diagrama de fuerzas dovela intermedia

Inicialmente se realizó sumatoria de fuerzas en dirección  $\hat{i}$  (paralelo a la superficie de falla) y en dirección  $\hat{j}$  (perpendicular a la superficie de falla)

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

$$\Sigma F_j = N_i - W_i \cos \alpha_i - k_i(\delta_{i-1} - \delta_i) \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + U_i L_i = 0$$

*Ecuación 39*

$$\begin{aligned} \Sigma F_i = W_i \sin \alpha_i + k_i(\delta_{i-1} - \delta_i) \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - k_{i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) - \dots \\ \dots N_i \tan \varphi' - \mu_i \frac{\partial x_i}{\partial t} + U_i \tan \varphi' = m a_i \end{aligned}$$

*Ecuación 40*

Despejando  $N$  se obtiene

$$N_i = W_i \cos \alpha_i + k_i(\delta_{i-1} - \delta_i) \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - U_i L_i$$

*Ecuación 41*

Reemplazando la Ecuación 41 en la Ecuación 40 se obtiene

$$\begin{aligned} m_i a_i + \mu_i v_i = W_i \sin \alpha_i - W_i \cos \alpha_i \tan \varphi' - k_{i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) + \dots \\ \dots k_i[(\delta_{i-1} - \delta_i) \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - (\delta_i - \delta_{i+1}) \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi'] \end{aligned}$$

*Ecuación 42*

Finalmente

$$0 = E_i - k_{i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) + (\delta_{i-1} - \delta_i)[A_i] - m_i \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \mu_i \frac{\partial x}{\partial t}$$

*Ecuación 43*

Donde

$$\delta_{i-1} = x_{i-1,t} - x_{i-1,t0}$$

*Ecuación 44*

$$\delta_i = x_{i,t} - x_{i,t0}$$

*Ecuación 45*

$$\delta_{i+1} = x_{i+1,t} - x_{i+1,t0}$$

*Ecuación 46*

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

Y  $x_{i,t0}$  corresponde a la posición inicial de la dovela  $i$ .

El procedimiento anteriormente mencionado, se siguió para la primera dovela y la última dovela; y en seguida, se pueden observar los diagramas de fuerzas en cada caso, así como las ecuaciones obtenidas.

- *Desarrollo de ecuación de movimiento para la primera dovela (corona del deslizamiento)*

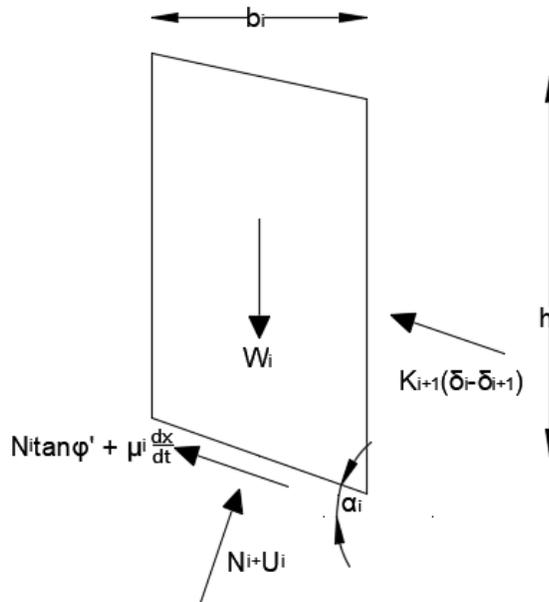


Figura 3.7 Diagrama de fuerzas primera dovela

$$\Sigma F_j = N_i - W_i \cos \alpha_i + U_i L_i = 0$$

Ecuación 47

$$\Sigma F_i = W_i \sin \alpha_i - k_{i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) - N_i \tan \varphi' - \mu_i \frac{\partial x_i}{\partial t} + U_i L_i \tan \varphi' = m_i a_i$$

Ecuación 48

$$0 = E_i - k_{i+1}(\delta_i - \delta_{i+1}) - m_i \frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2}$$

Ecuación 49

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

- Diagrama y ecuación de movimiento para la última dovela (pata del deslizamiento)

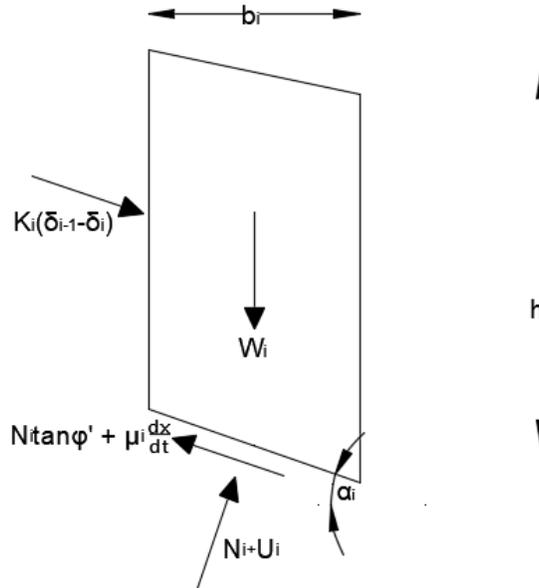


Figura 3.8 Diagrama de fuerzas última dovela

$$\Sigma F_j = N_i - W_i \cos \alpha_i - k_i (\delta_{i-1} - \delta_i) \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + U_i l_i = 0$$

Ecuación 50

$$\Sigma F_i = W_i \sin \alpha_i + k_i (\delta_{i-1} - \delta_i) \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - N_i \tan \phi' - \mu_i \frac{\partial x}{\partial t} + U_i \tan \phi' = m_i a_i$$

Ecuación 51

$$0 = E_i + (\delta_{i-1} - \delta_i)[A_i] - m_i \frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial x_i}{\partial t}$$

Ecuación 52

### 3.2.5. Limitaciones

Los deslizamientos son procesos de degradación que involucran el movimiento o transporte de masas de suelo o roca debido a la falla del material; y como se ha mencionado previamente, estos movimientos tienen un alto grado de complejidad

por lo que cada uno de los modelos existentes presenta diferentes limitaciones. En el modelo planteado para esta metodología, se enuncian inicialmente las siguientes limitaciones obtenidas a partir del planteamiento del modelo. Estas mismas serán ampliadas en el capítulo 6 de discusión de resultados, donde a partir de los resultados obtenidos se hace posible analizar en detalle dichas limitaciones.

- Al ser un modelo bidimensional (problema de deformación plana), no tiene en cuenta la topografía tridimensional de la superficie de la trayectoria del deslizamiento, donde la masa deslizada se podría separar y cambiar de dirección durante el movimiento.
- No se tiene en cuenta la causa del deslizamiento.
- Se considera que la masa deslizada no cambia de volumen en el modelo, por lo cual, no es posible tener en cuenta la acomodación de partículas que se da durante el movimiento.
- La interacción entre los bloques se da únicamente en las caras laterales
- Los bloques tienen un solo grado de libertad, correspondiente a la dirección del movimiento.
- El modelo reológico seleccionado considera que la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte es directamente proporcional. Sin embargo, en la literatura técnica se afirma que, en suelos finos, la viscosidad decrece gradualmente con el incremento de la tasa de corte. Por tanto, en este modelo se puede sobrestimar el esfuerzo cortante real del material.
- La solución de la ecuación diferencial es estimada mediante diferencias finitas. La estabilidad numérica de este método es fuertemente dependiente de la discretización y de los parámetros de la ecuación.

### **3.3. Solución ecuación de movimiento**

#### *3.3.1. Diferencias finitas*

La ecuación de movimiento obtenida es una ecuación diferencial lineal de segundo orden. El método establecido en este estudio para la solución de la ecuación es el

método de diferencias finitas (MDF), en el cual la solución es linealmente aproximada por medio de la discretización del espacio y del tiempo. Este método tiene la ventaja de que las expresiones desarrolladas para este método son sencillas de implementar algebraicamente en la ecuación de movimiento, y se pueden obtener resultados para cada intervalo de espacio y de tiempo.

Con base en lo planteado anteriormente, se determinó desarrollar la ecuación diferencial de movimiento por el método de diferencias finitas que represente una mejor aproximación a la solución. Para lo anterior, fue necesario plantear un modelo simplificado del problema, en el cual se pueda evaluar que el MDF seleccionado (por derecha, izquierda o centrado) se encuentre en la capacidad de representar numéricamente la naturaleza física del movimiento de la masa deslizada.

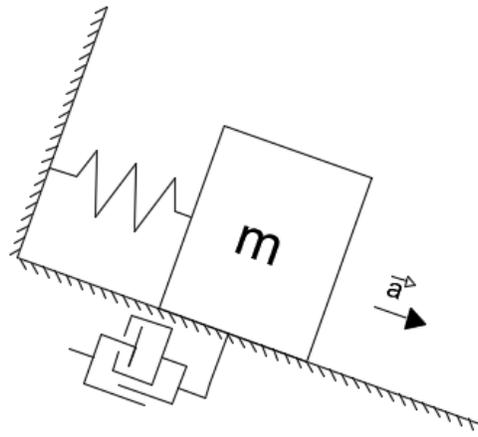
### *3.3.2. MDF en modelo simplificado*

Los métodos de diferencias finitas son fuertemente dependientes de la discretización de las variables dependientes e independientes, en este caso la discretización del deslizamiento en dovelas y el paso del tiempo. Además de estos, la cantidad de parámetros necesarios para solucionar la ecuación hacen que esta tenga cierto grado de complejidad.

Específicamente los parámetros del paso del tiempo, ancho de las dovelas, módulo de deformación del suelo y coeficiente de viscosidad dinámica deberán tener cierta magnitud y/o relación, para garantizar la estabilidad numérica del modelo y que a su vez se represente las características físicas del problema.

Debido a la complejidad de la ecuación diferencial, se planteó un modelo simplificado en el que se involucran los parámetros usados en la ecuación de movimiento, ya que es difícil obtener una relación entre los parámetros de la ecuación que permita garantizar las condiciones mencionadas anteriormente.

El modelo simplificado, presentado en la Figura 3.9, consiste en un bloque en un plano inclinado conectado a un resorte; en la base se considera la resistencia del modelo Coulomb-viscoso.



*Figura 3.9 Modelo simplificado plano inclinado*

Del modelo simplificado, es posible obtener la solución analítica de la ecuación diferencial por el método de coeficientes indeterminados, en orden de evidenciar el comportamiento del movimiento del bloque bajo diferentes parámetros. El movimiento de este sistema es caracterizado como un movimiento oscilatorio amortiguado.

#### *3.3.2.1. Movimiento oscilatorio amortiguado*

Este movimiento ha sido estudiado ampliamente, ya que permite representar y/o modelar problemas físicos y mecánicos como el amortiguador de un carro. Consiste en un oscilador sometido a la ley de Hooke ( $F = -kx$ ), con presencia de un rozamiento viscoso, que progresivamente disminuye la amplitud de las oscilaciones.

La segunda ley de Newton para un oscilador armónico con un amortiguador viscoso se escribe como la Ecuación 53.

$$ma = -kx - \mu v$$

*Ecuación 53*

Donde  $k$  es la constante de rigidez del resorte y  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica. En términos diferenciales, dividiendo por la masa y teniendo en cuenta las frecuencias de vibración de este movimiento, la ecuación se reescribe como

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + w_0^2x = 0$$

*Ecuación 54*

Donde  $w_0$  es la frecuencia propia del oscilador y  $\beta$  es la constante de amortiguamiento, ambas con unidades de Hz y expresadas como:

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

*Ecuación 55*

$$\beta = \frac{\mu}{2m}$$

*Ecuación 56*

Considerando en las ecuaciones presentadas anteriormente las fuerzas resistentes en la base y la condición que el bloque se encuentra en un plano inclinado, se obtiene la Ecuación 57, donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal, y  $\varphi'$  es el ángulo de fricción entre el bloque y la superficie.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + w_0^2x = g(\text{sen}(\alpha) - \cos(\alpha) \tan(\varphi'))$$

*Ecuación 57*

Para resolver analíticamente la anterior ecuación diferencial, se aplicó el método de coeficientes indeterminados. La solución de la ecuación es

$$x = C_1e^{\gamma_1 t} + C_2e^{\gamma_2 t} + \frac{g}{w_0^2}(\text{sen}(\alpha) - \cos(\alpha) \tan \varphi)$$

*Ecuación 58*

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes determinadas a partir de las condiciones iniciales, y:

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

$$\forall_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - w_0^2} \quad \text{y} \quad \forall_2 = -\beta - \sqrt{\beta^2 - w_0^2}$$

*Ecuación 59*

La solución analítica de la ecuación de movimiento del modelo simplificado conlleva a que dependiendo del coeficiente de amortiguamiento y de la frecuencia del oscilador, se presenten tres tipos de movimiento:

- Sobreamortiguado: Se da cuando el coeficiente de amortiguamiento es mayor a la frecuencia del oscilador.
- Subamortiguado: Ocurre cuando el coeficiente de amortiguamiento es menor a la frecuencia del oscilador.
- Amortiguamiento crítico: Es un caso particular en el cual el coeficiente de amortiguamiento es igual a la frecuencia del oscilador.

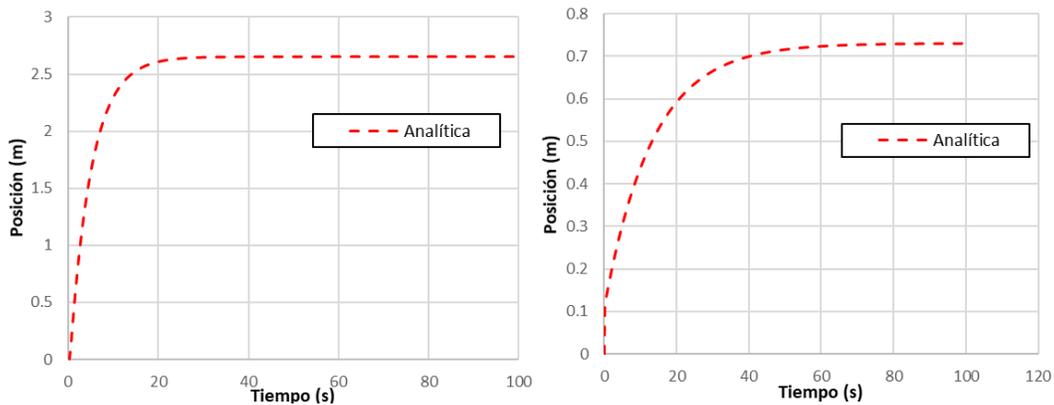
En el modelo planteado, se espera que el tipo de movimiento que ocurra sea un movimiento sobreamortiguado en el cual cada uno de los bloques tienda al reposo lentamente, y no que ocurran movimientos en los que cada bloque presente oscilaciones de su posición. Por tanto, para garantizar que el movimiento de cada una de las dovelas sea un movimiento sobreamortiguado, se debe garantizar cierta relación entre el coeficiente de viscosidad dinámica y el módulo de deformación de las tajadas, que para el caso del modelo simplificado corresponde a la relación presentada en la Ecuación 60.

$$\mu > 2\sqrt{km}$$

*Ecuación 60*

En la Figura 3.10 se muestran ejemplos de la gráfica esperada para un movimiento sobreamortiguado, donde se observa que el bloque tiende a una posición sin presentar vibraciones en el tiempo.

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*



*Figura 3.10 Ejemplos de movimientos sobreamortiguados para el modelo simplificado.*

El desarrollo de la solución analítica permite evaluar si el método de las diferencias finitas se aproxima adecuadamente a la solución analítica y al tipo de movimiento que se espera en cada una de las dovelas.

Al reemplazar las expresiones de aproximación a las derivadas por diferencias finitas (descritas en el capítulo 2.3.5), se obtuvo la solución aproximada a la ecuación diferencial del modelo simplificado. Con el fin de comparar los diferentes métodos de aproximación (derecha, centrada e izquierda), se graficaron tres ejemplos diferentes en los que se variaron arbitrariamente los parámetros, en orden de visualizar los diferentes casos que se pueden presentar.

Como se observa en la Figura 3.11, los parámetros fueron supuestos de tal forma que la solución analítica presentara un movimiento sobreamortiguado (Ver Tabla 3.1). De los tres casos ejemplificados se obtuvo lo siguiente:

- Aunque en el MDF por aproximación centrada se observa que la posición del bloque tiende a un valor, no representa la tendencia o forma de la gráfica obtenida por la solución analítica; además, numéricamente no se acerca en ninguno de los tres casos a los valores obtenidos por la solución analítica como si lo hacen las otras aproximaciones
- El MDF por aproximación por izquierda, presenta en el caso I una buena aproximación a la solución analítica, sin embargo, se evidencia que, dependiendo de la combinación de parámetros la aproximación se puede

acercar o alejar respecto a la solución analítica. En el caso III, el cual es el que más se aleja de la solución analítica, se observa que durante el primer segundo se presentan oscilaciones en la posición del bloque, lo cual no representa el tipo de movimiento sobreamortiguado.

- En el MDF por aproximación por derecha se presenta un comportamiento similar a la aproximación por la izquierda. Sin embargo, se evidenció que, para el caso III, esta aproximación es la que mejor representa un tipo de movimiento sobreamortiguado, en el cual el bloque tiende a una posición sin presentar vibraciones; a pesar de alejarse numéricamente de los resultados obtenidos mediante la solución analítica.

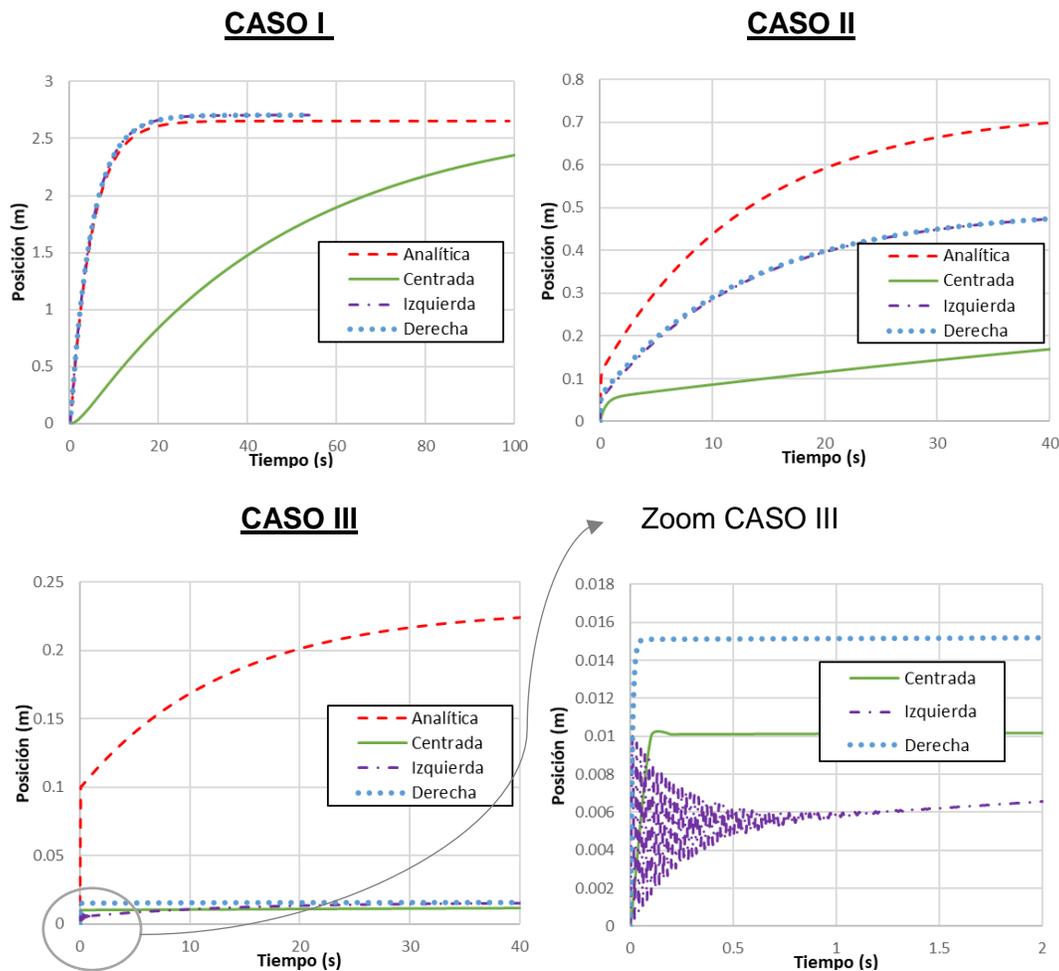


Figura 3.11. Aproximación por diferencias finitas a solución analítica.

Tabla 3.1. Parámetros usados en el modelo simplificado

Caso	I	II	III
k (kN/m/m)	2000	300	300
$\mu$ (kPa-s)	10000	4000	4000
W =mg (kN/m)	20000	2000	200
$\alpha$ (°)	30	20	20
$\varphi'$ (°)	15	15	15
$\Delta t$ (s)	0.1	0.1	0.1

Del análisis realizado, se establece el MDF por aproximación por derecha es el más conveniente para reflejar la naturaleza física del problema del movimiento de un deslizamiento. Sin embargo, se evidencia que la aproximación a la solución analítica es fuertemente dependiente de los parámetros establecidos. Para el modelo planteado en este trabajo de grado, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros con el fin de evaluar la variabilidad en los resultados. Este es presentado en capítulos posteriores.

En la Ecuación 61 se observa la expresión de la aproximación para la velocidad o la primera derivada de la posición en función de tiempo; y en la Ecuación 62 se observa la aproximación para la aceleración o la segunda derivada de la posición en función del tiempo.

$$v = \frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{x_{i,t+1} - x_{i,t}}{\Delta t}$$

Ecuación 61

$$a = \frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2} = \frac{x_{i,t-1} - 2x_{i,t} + x_{i,t+1}}{\Delta t^2}$$

Ecuación 62

### 3.3.2.2. Convergencia, consistencia y estabilidad del MDF

El implementar el MDF para obtener la solución aproximada de la ecuación de movimiento, implica que se introduzcan errores de truncación y de redondeo en cada paso del tiempo. La diferencia entre la solución exacta ( $\hat{x}_i$ ) y aproximada ( $x_i$ ) para los MDF establecidos en la primera y segunda derivada, se encuentran en

función del incremento de tiempo tal como se presenta en la Ecuación 63 y Ecuación 64.

$$\frac{\partial \hat{x}_i}{\partial t} = \frac{x_{i,t+1} - x_{i,t}}{\Delta t} + O(\Delta t)$$

*Ecuación 63*

$$\frac{\partial^2 \hat{x}_i}{\partial t^2} = \frac{x_{i,t-1} - 2x_{i,t} + x_{i,t+1}}{\Delta t^2} + O(\Delta t^2)$$

*Ecuación 64*

Lo que se espera al implementar un método de aproximación, es que sea convergente. Lo anterior significa que, al trabajar con intervalos de tiempo más pequeños la solución aproximada se debe acercar cada vez más a la solución exacta. Para que el procedimiento numérico sea convergente, debe ser consistente y estable.

Consistencia significa que en el límite  $\Delta t \rightarrow 0$ , la ecuación de diferencias que define el método numérico resulta formalmente la ecuación diferencial; y es estable cuando los errores de truncación y de redondeo, al propagarse durante el proceso, son siempre pequeños en comparación con la solución exacta (LeVeque, 2007).

La solución aproximada implementando el MDF se puede escribir matricialmente de la siguiente forma

$$x_{t+1} = Ax_t + bf(t)$$

*Ecuación 65*

Así que para el modelo simplificado se tiene que:

$$\begin{bmatrix} x_{i,t+1} \\ x_{i,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\Delta t^2} + \frac{2B}{\Delta t} - \omega_0^2 & \frac{1}{\Delta t^2} \\ \frac{1}{\Delta t^2} + \frac{2B}{\Delta t} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i,t} \\ x_{i,t-1} \end{bmatrix} + \frac{g(\text{sen}(\alpha) - \cos(\alpha) \tan(\varphi'))}{\frac{1}{\Delta t^2} + \frac{2B}{\Delta t}}$$

*Ecuación 66*

El error “e” se comporta analógicamente a la anterior ecuación, pudiéndose demostrar que:

$$e_{t+1} = \mathbf{A} * e_t$$

*Ecuación 67*

Por lo tanto, para garantizar que los errores no se propaguen, se debe garantizar que los valores propios de la matriz **A** sean menores o iguales a 1.0. Los valores propios ( $\lambda$ ) son determinados a partir de la siguiente ecuación.

$$\lambda^2 - \mathbf{A}(1,1)\lambda - \mathbf{A}(1,2) = 0$$

*Ecuación 68*

Al solucionar esta ecuación para los valores propios y desarrollar la inecuación para  $\lambda$  menor a 1, se obtienen las ecuaciones presentadas en la Ecuación 69 y Ecuación 70

$$\frac{\Delta t^2 w_0^2 - 2\beta \Delta t - 2 + \sqrt{\Delta t^4 w_0^4 - 4\Delta t^2 w_0^2 + 16\beta \Delta t + 4\beta^2 \Delta t^2 - 4\beta \Delta t^3 w_0^2 + 8}}{2\beta \Delta t + 1} \geq -1$$

*Ecuación 69*

$$\frac{2\beta \Delta t - \Delta t^2 w_0^2 + 2 + \sqrt{\Delta t^4 w_0^4 - 4\Delta t^2 w_0^2 + 16\beta \Delta t + 4\beta^2 \Delta t^2 - 4\beta \Delta t^3 w_0^2 + 8}}{2\beta \Delta t + 1} \leq 1$$

*Ecuación 70*

Las ecuaciones presentadas anteriormente son ecuaciones implícitas para  $\Delta t$ , por lo cual no es posible establecer cierta relación entre los parámetros, que satisfaga la estabilidad numérica del modelo. Sin embargo, a partir del análisis realizado se tiene certeza que la estabilidad numérica del modelo se encuentra en función de las frecuencias de vibración y el incremento del tiempo.

Por tanto, para el modelo planteado en este trabajo de grado, la estabilidad se encontrará en función del módulo de deformación, coeficiente de viscosidad e incremento del tiempo. Además, teniendo en cuenta que la masa deslizada se divide

en varias tajadas y que estas viajan por una superficie irregular, se dificulta aún más tratar algebraicamente las ecuaciones para obtener una relación entre los parámetros que garantice la convergencia del modelo.

Como se mencionó anteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad para los diferentes ejemplos presentados más adelante, en los que se discutirá bajo que valores de los parámetros la solución es estable en cada caso.

### *3.3.3. Condiciones iniciales y movimiento de la masa deslizada*

Para solucionar la ecuación de movimiento, es necesario tener como condiciones iniciales la posición en el tiempo  $t-1$  y en el tiempo  $t$ , para obtener numéricamente la posición de cada dovela en el tiempo  $t+1$ . Por esta razón, el movimiento tiene que ser analizado en dos etapas.

#### *3.3.3.1. Primera etapa*

Consiste en el primer movimiento, que se obtiene a partir del análisis de equilibrio límite. Los métodos considerados previamente, permiten obtener el F.S. y las fuerzas entre las dovelas. A partir del equilibrio de fuerzas en cada dovela, se puede obtener la aceleración, velocidad y desplazamiento; considerando como condición inicial las fuerzas obtenidas al momento que ocurre la falla.

Hungr (1995) considera una condición inicial de suelo en reposo, lo que desconoce las deformaciones del terreno antes de manifestarse la falla. En el modelo se asume como condición inicial las fuerzas entre las partículas que se obtienen a partir de análisis de equilibrio límite.

Las fuerzas iniciales entre las tajadas se toman para la condición en la que el FS es igual a 1.0. En el modelo se trabajó como condición crítica  $|FS - 1| \leq 0.05$ , para tener en cuenta las incertidumbres en el método de cálculo.

A continuación, se describe la obtención de los parámetros cinemáticos para el primer movimiento siguiendo el método "Unbalanced Thrust Method", sin embargo,

se resalta que el método de Morgenstern & Price, así como otros métodos de equilibrio límite, se pueden utilizar de manera análoga, siempre y cuando se determinen fuerzas equivalentes a las descritas en esta metodología.

El cálculo del primer movimiento es un proceso iterativo, por lo cual inicialmente se supuso un Factor de Seguridad inferior a 1.0 y se determinaron las fuerzas entre dovelas de la corona a la pata del talud, hasta que la fuerza en la última dovela sea cero.

$$P_{i+1} = W_i \sin \alpha_i - \left[ \frac{c'_i L_i}{FS} + (W_i \cos \alpha_i - U_i L_i) \frac{\tan \phi'_i}{FS} \right] + P_i \phi_i$$

*Ecuación 71*

$$\phi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \phi'_i}{FS} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

*Ecuación 72*

Una vez obtenidas las fuerzas entre dovelas, es posible calcular la aceleración, la velocidad, las coordenadas del primer movimiento y las nuevas dimensiones de las dovelas, teniendo en cuenta la suposición que el volumen se mantiene constante; para esto se hizo uso de las ecuaciones presentadas a continuación:

$$m_i a_i = P_i \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - P_{i+1} + W_i \sin \alpha_i - T_i$$

*Ecuación 73*

$$V_{i,t+\Delta t} = V_i + a_i \Delta t$$

*Ecuación 74*

$$x_{i,t+\Delta t} = x_i + \frac{V_i + V_{i,t+\Delta t}}{2} \cdot \Delta t \cdot \cos \alpha_i$$

*Ecuación 75*

$$b_{i,t+\Delta t} = x_{i,t} + (\delta_{i,t} - \delta_{i-1,t})$$

*Ecuación 76*

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

$$h_{i,t+\Delta t} = \frac{b_{i,t}h_{i,t}}{b_{i,t+\Delta t}}$$

*Ecuación 77*

Finalmente, las coordenadas obtenidas de la Ecuación 75 son el parámetro de entrada para el cálculo del segundo movimiento del deslizamiento.

### 3.3.3.2. Segunda etapa

Consiste en el movimiento de la masa deslizada por la superficie una vez ocurra el primer movimiento. Con base en lo que se ha mencionado anteriormente, y en el modelo que se planteó para el cálculo de las variables cinemáticas de los deslizamientos, se desarrolló la solución de la ecuación de movimiento con el fin de obtener las expresiones para obtener la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos.

Para comenzar es importante mencionar que se tuvieron en cuenta las constantes presentadas en el capítulo 3.2.4, con el fin de simplificar los resultados.

Haciendo uso de la Ecuación 43, se procedió a despejar explícitamente la incógnita de la ecuación diferencial, aplicando la solución por aproximación por derecha para la primera derivada, como se mencionó en el capítulo 3.3.1. A continuación, se puede observar el procedimiento numérico para la solución de la ecuación en las dovelas intermedias.

$$E_i + x_{i-1,t_0}[-A_i] + x_{i+1,t_0}[k_{i+1}] + x_{i-1,t}[A_i] + x_{i,t}[C_i + 2D_i - A_i - k_{i+1}] + \dots$$

$$\dots x_{i+1,t}[k_{i+1}] + x_{i,t+1}[-C_i - D_i] + x_{i,t_0}[A_i + k_{i+1}] + x_{i,t-1}[-D_i] = 0$$

*Ecuación 78*

$$x_{i,t+1} = (E_i + x_{i-1,t_0}[-A_i] + x_{i+1,t_0}[k_{i+1}] + x_{i-1,t}[A_i] + \dots$$

$$\dots x_{i,t}[C_i + 2D_i - A_i - k_{i+1}] + x_{i+1,t}[k_{i+1}] + x_{i,t_0}[A_i + k_{i+1}] + x_{i,t-1}[-D_i]) / [C_i + D_i]$$

*Ecuación 79*

El procedimiento se realizó con el fin de obtener las expresiones para las tres condiciones de las dovelas en las que se discretiza el deslizamiento (primera, intermedias y ultima). A continuación, se puede observar en la Ecuación 80 y la Ecuación 81 la solución de la ecuación para la primera dovela y ultima dovela respectivamente.

$$x_{i,t+1} = \frac{E_i + x_{i+1,t_0}[k_{i+1}] + x_{i,t}[C_i + 2D_i - k_{i+1}] + x_{i+1,t}[k_{i+1}] + x_{i,t_0}[k_{i+1}] + x_{i,t-1}[-D_i]}{C_i + D_i}$$

*Ecuación 80*

$$x_{i,t+1} = \frac{E_i + x_{i-1,t_0}[-A_i] + x_{i+1,t_0}[k_{i+1}] + x_{i-1,t}[A_i] + x_{i,t}[C_i + 2D_i - A_i] + x_{i,t_0}[A_i] + x_{i,t-1}[-D_i]}{C_i + D_i}$$

*Ecuación 81*

En los casos en que el valor obtenido de  $x_{i,t+1}$  es menor a  $x_{i,t}$ , indican que el bloque  $i$  estaría retrocediendo, lo cual no es consecuente con el movimiento de un deslizamiento. En los casos en que ocurra esto, se considera que el bloque mantiene su posición. Es decir:

$$\text{Si } x_{i,t+1} < x_{i,t} \text{ entonces } x_{i,t+1} = x_{i,t}$$

*Ecuación 82*

### **3.4.Desarrollo de código en Matlab®**

La ecuación obtenida, a pesar de ser una ecuación explicita, tiene un alto grado de complejidad debido a la cantidad de parámetros que intervienen en la solución. Con el fin de optimizar el tiempo que conlleva obtener un resultado para cada dovela y en cada intervalo de tiempo, fue necesario acudir a la programación.

Matlab ® es una plataforma de programación con su propio lenguaje, desarrollada para el campo ingenieril y científico, el cual cuenta con paquetes y funciones ya desarrolladas que facilitaran el desarrollo del programa. En este software se desarrolló el código en el que, a partir de la solución de las ecuaciones planteadas, se determina la distancia de viaje y velocidad de los deslizamientos.

El programa desarrollado, denominado “LAAND -Slide Runout-”, se divide en varios módulos y funciones, los cuales son descritos a continuación. El algoritmo desarrollado se adjunta en el Anexo A de este trabajo de grado.

- Input-LAAND: Es el archivo principal, en el cual se ingresan las coordenadas de la superficie del talud, superficie de falla y parámetros necesarios para el desarrollo de la ecuación.
- Slipsurface: Función que tiene por objetivo determinar las coordenadas de la superficie que deberá recorrer la masa deslizada. Dicha superficie corresponde a la superficie de falla, seguida de la superficie del talud.
- Primer: Función que calcula los desplazamientos obtenidos en el primer movimiento, a partir de las fuerzas entre dovelas resultantes del equilibrio límite. En este caso el método corresponde a “Unbalanced thrust Method”.
- LAAND: Función encargada de realizar el cálculo de las constantes de la ecuación y calcular los desplazamientos para cada dovela en el tiempo.
- Posdovela: Una vez obtenida la solución de la ecuación de movimiento para todas las dovelas y en todos los pasos de tiempo, esta función almacena y grafica los valores de posición de cada dovela en el tiempo.
- Cinetica: Similar a la anterior función, se realiza el cálculo de la velocidad y aceleración de cada dovela en el tiempo. Los resultados se presentan gráficamente.

Como salida del programa, se obtienen los desplazamientos de cada dovela en los intervalos de tiempo determinados, así como la velocidad y la aceleración. En la Figura 3.12 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

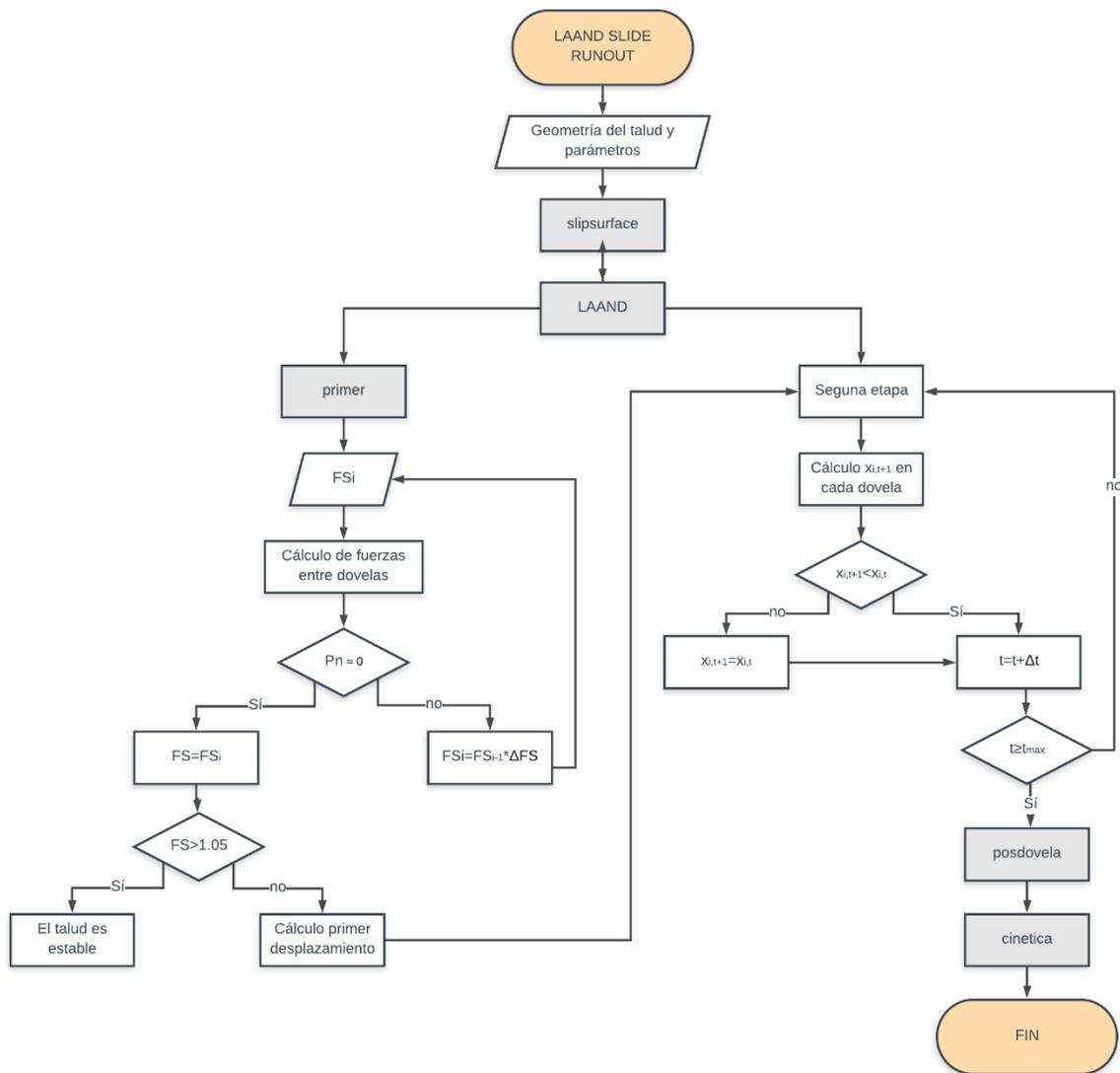


Figura 3.12 Diagrama de flujo de algoritmo “LAAND-Slide Runout”

### 3.5. Análisis de sensibilidad de los parámetros en el problema del bloque deslizante en talud infinito

Para analizar la sensibilidad que tienen los parámetros de la ecuación de movimiento, se aplicaron los métodos y modelos propuestos al problema del bloque deslizante. En este caso, consiste en un bloque rígido supuesto de 70 m de ancho y 50 m de altura que se desliza por una superficie infinita con una inclinación de 26°. El planteamiento de este problema permite normalizar la pendiente y el área de las

dovelas, al considerar una superficie del deslizamiento constante e infinita, y dovelas que tienen sus dimensiones iguales al discretizar la masa deslizada.

El análisis de sensibilidad se realizó con los parámetros  $E_0$  (módulo de deformación),  $\mu$  (coeficiente de viscosidad dinámico),  $\Delta t$  (intervalo de tiempo), número de dovelas y  $\varphi'$  (ángulo de fricción dinámico). Para esto, se establecieron dos modelos donde se establecieron parámetros constantes y se varió cada uno de estos independientemente en diferentes rangos, como se puede observar en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

En la Figura 3.13 se observa el desplazamiento de la superficie de la masa deslizada para el modelo No. 1, graficados hasta un tiempo de 60 segundos ya que el bloque deslizando no se detiene bajo los parámetros establecidos.

*Tabla 3.2 Rango definidos bloque deslizando*

PARÁMETROS BLOQUE DELIZANTE MODELO No 1	
Módulo de deformación (kN/m/m)	10,000
Coeficiente de viscosidad (kPa*s/m)	5,000
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	15

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

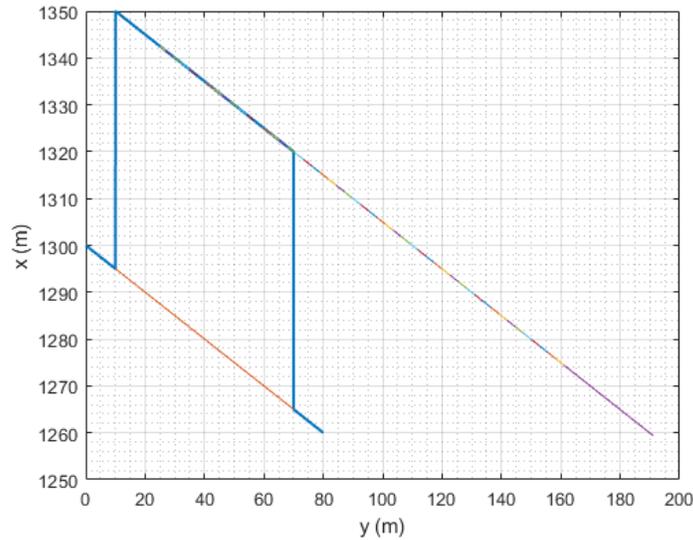


Figura 3.13 Superficie del talud durante la modelación

A partir de los desplazamientos presentados, se observa que el bloque se desliza manteniendo su sección constante. Además, se observa un cambio de posición en el tiempo constante lo que indica que la velocidad del bloque es constante. A continuación en la Figura 3.14, la Figura 3.15 y la Figura 3.16 se puede observar la posición, velocidad y aceleración respectivamente, obtenidas a partir de la modelación.

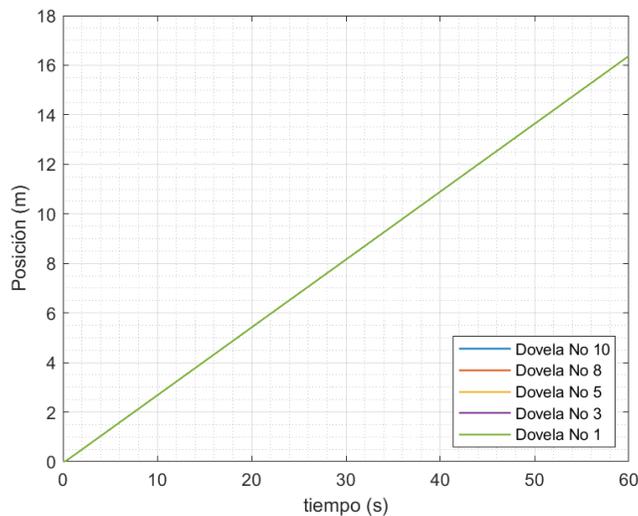


Figura 3.14 Posición del bloque deslizante Modelo 1

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

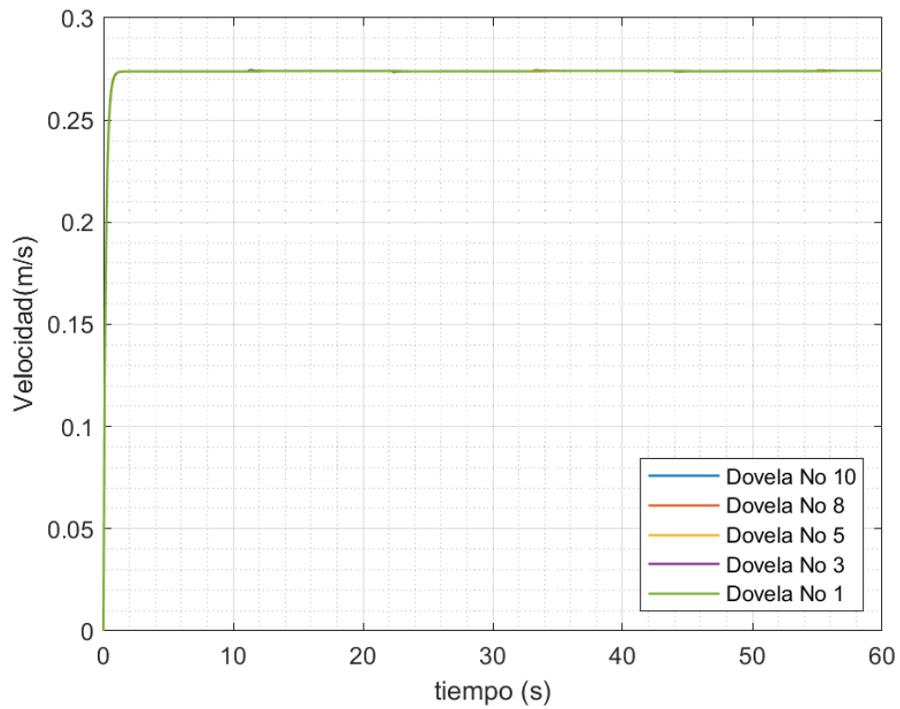


Figura 3.15 Velocidad del bloque deslizante Modelo 1

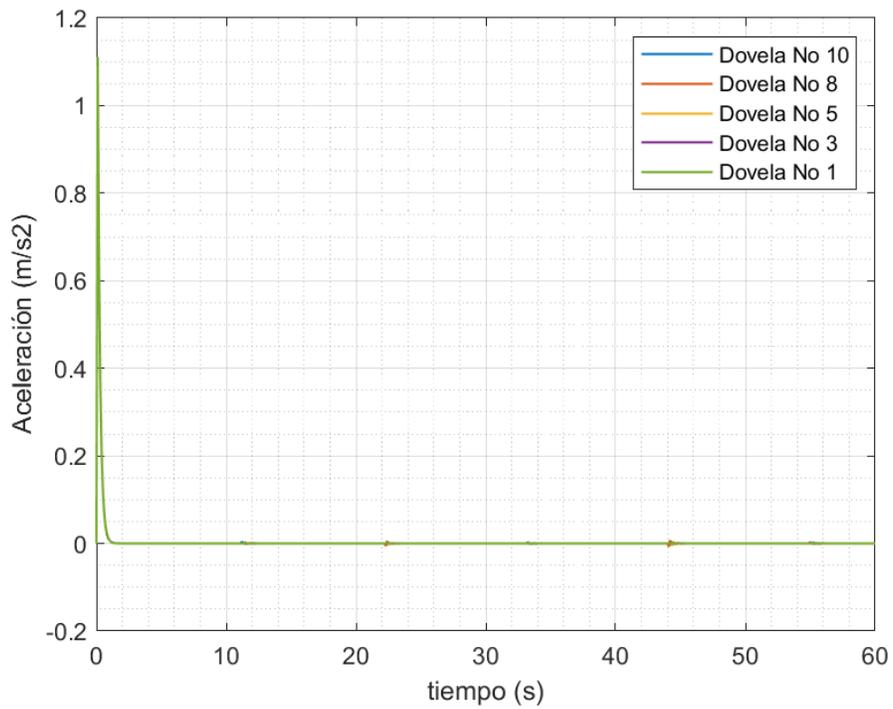


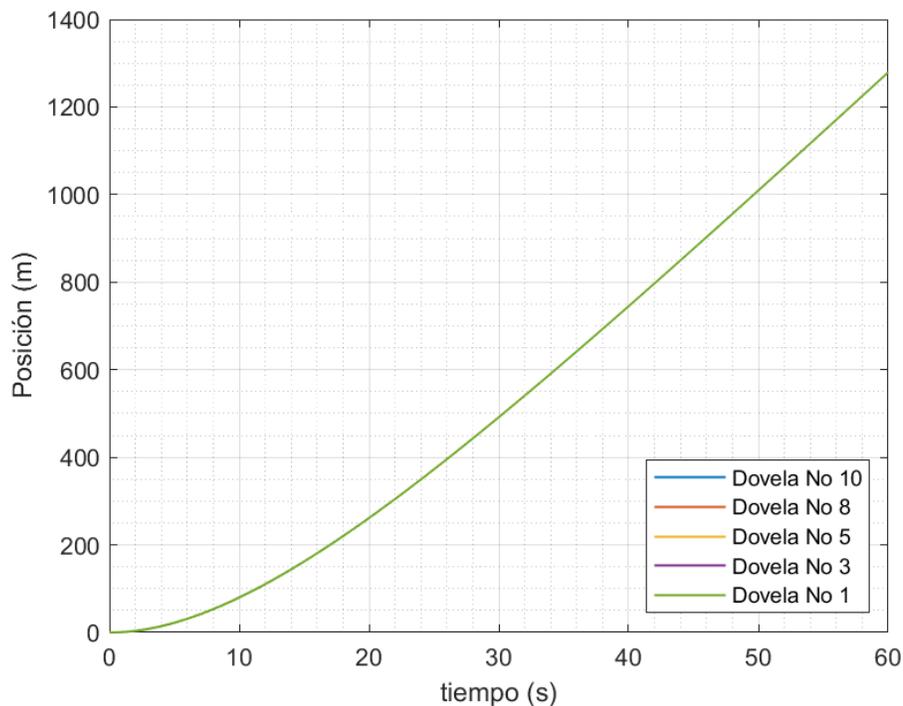
Figura 3.16 Aceleración del bloque deslizante Modelo 1

Para el modelo No. 2, se establecieron parámetros de menor orden de magnitud para el módulo de deformación y coeficiente de viscosidad, con el fin de evidenciar la respuesta y sensibilidad del modelo. Los parámetros establecidos son presentados en la Tabla 3.3.

*Tabla 3.3 Rango definidos bloque deslizante*

PARÁMETROS BLOQUE DELIZANTE MODELO No 2	
Módulo de deformación (kN/m/m)	100
Coefficiente de viscosidad (kPa*s/m)	50
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	15

Con base en esto, se obtuvieron las gráficas de posición, velocidad y aceleración (véase Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19 respectivamente).



*Figura 3.17 Posición del bloque deslizante Modelo 2*

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

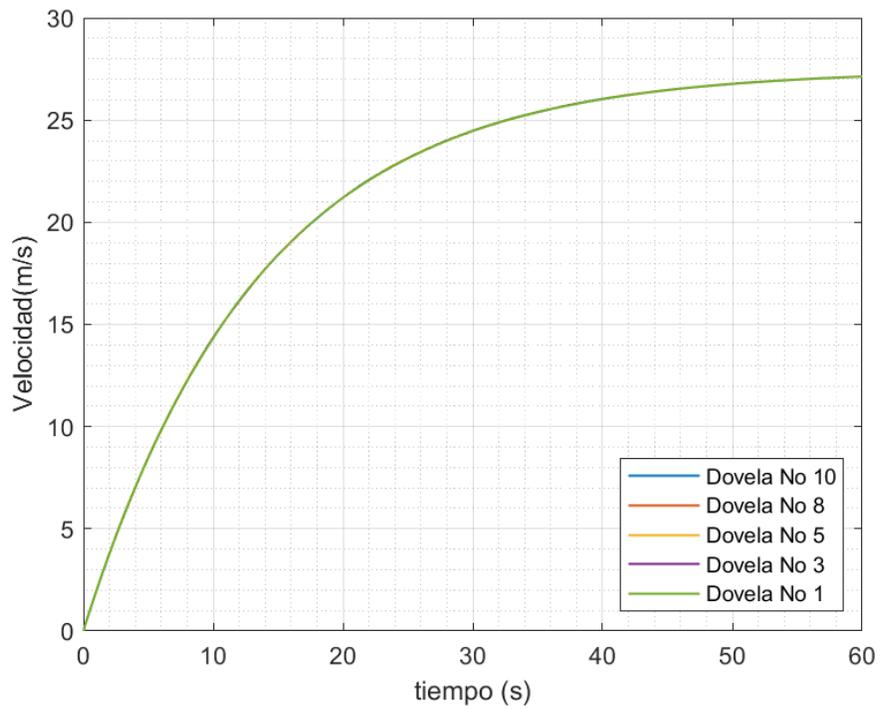


Figura 3.18 Velocidad del bloque deslizante Modelo 2

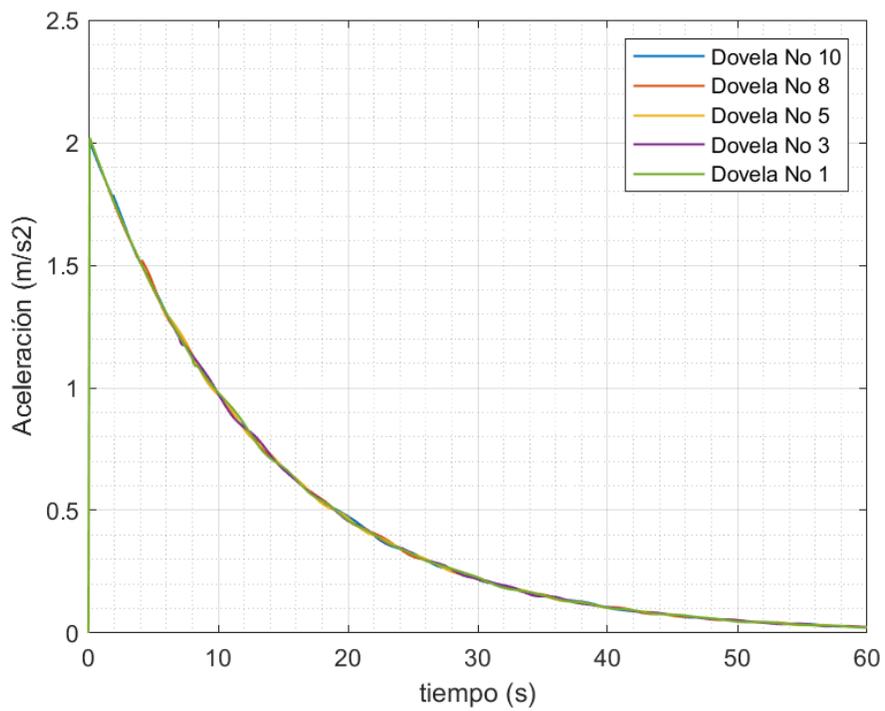


Figura 3.19 Aceleración del bloque deslizante Modelo 2

Para los dos modelos presentados anteriormente, se realizó el análisis de sensibilidad bajo los parámetros establecidos en cada modelo. El rango en el cual se variaron cada uno de los parámetros de la ecuación de movimiento, es presentado en la Tabla 3.4. El módulo de deformación, coeficiente de viscosidad e incremento de tiempo se variaron en ordenes de magnitud (presentados en las gráficas en escala semilogarítmica), mientras que el número de dovelas y ángulo de fricción dinámico se varió en unidades (presentado en las gráficas en escala aritmética).

*Tabla 3.4 Rangos definidos de variación*

RANGO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS		
Módulo de deformación (kN/m/m)	$1 \cdot 10^n$	n [-1,6]
Coeficiente de viscosidad (kPa*s/m)	$1 \cdot 10^n$	n [-1,6]
Intervalo de tiempo (s)	$1 \cdot 10^n$	n [-2,1]
Numero de dovelas	n	n [2,30]
Ángulo de fricción dinámico (°)	n	n [4,30]

Los análisis realizados para cada uno de los parámetros son presentados gráficamente en la Figura 3.20 y en la Figura 3.21. La variable independiente corresponde al parámetro que se esté variando para el análisis; mientras que la variable dependiente corresponde al promedio de la distancia de viaje de las dovelas en las que se discretizo cada caso.

Debido a que, para cierta combinación de parámetros, se obtienen resultados en los que la posición de ciertas dovelas tiende al infinito y no reflejan el comportamiento esperado del movimiento de la masa deslizada, el promedio de la distancia de viaje puede dar tanto un número muy grande ( $>1E5$  m), o simplemente coincidir con un rango de distancia de viaje considerado como plausible (i.e el caso en que una de sus dovelas haya viajado grandes distancias a comparación de las demás). Por lo anterior, se calculó la desviación estándar de la distancia de viaje de las dovelas, donde valores grandes de desviación estándar indican que el modelo obtuvo resultados que conllevaron a una inestabilidad numérica, mientras que valores cercanos a cero indican que las dovelas viajaron una distancia de viaje

similar entre sí, lo cual quiere decir que el resultado es considerado como válido. Los parámetros en los cuales se presente una distancia de viaje y una desviación estándar en los rangos definidos en las gráficas corresponden a resultados que son considerados como plausibles, es decir, razonables.

En términos generales, teniendo en cuenta que para el primer modelo se trabajaron parámetros dinámicos de mayor magnitud ( $E=10,000$  kPa y  $\mu=5,000$  kPa-s), y para el segundo modelo se disminuyeron estos parámetros ( $E=100$  kPa y  $\mu=50$  kPa-s) para cada parámetro analizado se observa lo siguiente:

- El módulo de deformación no tiene influencia en la distancia de viaje en ninguno de los modelos, ya que la distancia de viaje se mantiene constante (16 m y 1280 m, respectivamente). Sin embargo, sí tiene influencia en la estabilidad numérica del modelo, ya que solo se obtuvieron resultados válidos para valores de módulos de deformación que se encuentran entre 0.1 y 10000 kPa. Este comportamiento es justificado, ya que el módulo de deformación actúa en la interacción que hay entre las caras de las dovelas, más no es una fuerza resistente en la base de las dovelas, por lo cual, no se espera que influya en la distancia de viaje. Los valores de módulo de deformación que no se encuentren en el rango establecido, conllevan a la inestabilidad numérica del modelo, para el ejemplo modelado y bajo los parámetros establecidos.
- El coeficiente de viscosidad es el parámetro que más influye en la distancia de viaje. A pesar de ser un parámetro que al estimarlo varía en ordenes de magnitud (ver 3.6 Métodos para determinación de parámetros), tiene una relación fuertemente inversa con la distancia de viaje, es decir que a mayor coeficiente de viscosidad menor es la distancia de viaje. Así mismo, se observa que, en función de los parámetros establecidos, puede llegar a influir en la estabilidad del modelo. Para el modelo No. 1 se obtuvo estabilidad a partir de valores superiores a 3000 kPa-s, mientras que para el modelo 2 se obtuvo estabilidad a partir de 0.1 kPa-s.

- El incremento de tiempo tiene un comportamiento similar al módulo de deformación, donde este no influye en la distancia de viaje, pero si en la estabilidad numérica del modelo. Al ser un modelo de diferencias finitas, la estabilidad depende de la relación entre la discretización del tiempo, por lo cual, para los parámetros establecidos en cada modelo, será estable para incrementos de tiempo inferiores a 0.1 segundos en el primer modelo; para el segundo modelo, la discretización puede ser máximo de 1 segundo.
- El número de dovelas influye tanto en la distancia de viaje como en la estabilidad del modelo. La relación entre el número de dovelas y la distancia de viaje es de tipo exponencial negativa. Lo anterior indica que la discretización del espacio conlleva a una convergencia del modelo, donde a mayor sea el número de dovelas, el resultado de la distancia de viaje tiende a estabilizarse para un solo valor. Sin embargo, para el incremento de tiempo establecido, el modelo No 1 fue posible discretizarlo hasta un número de 11 dovelas, mientras que en el modelo No 2 se puede hacer una discretización hasta 86 dovelas; para valores superiores, el modelo es considerado como inestable numéricamente
- El ángulo de fricción dinámico influye únicamente en la distancia de viaje. El resultado indica que la distancia de viaje es inversamente proporcional al ángulo de fricción, y cuando el valor del ángulo de fricción es igual al ángulo de inclinación de la superficie, el bloque no se desplaza. El anterior resultado es consecuente con el modelo de un talud infinito, el cual cuando en ángulo de fricción es mayor, el bloque deslizante es estable (se encuentra estático).

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

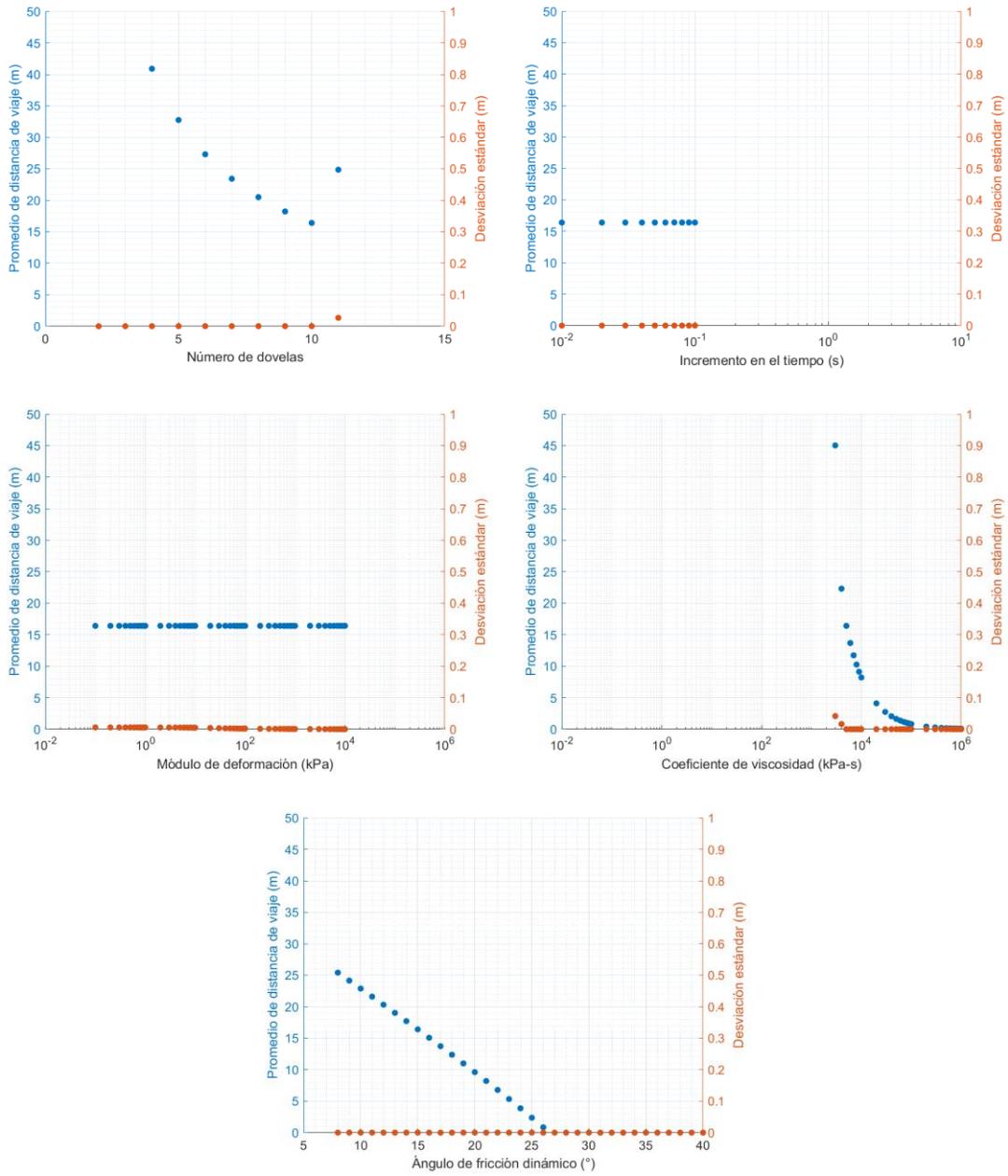


Figura 3.20 Análisis de sensibilidad bloque deslizante Modelo 1

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

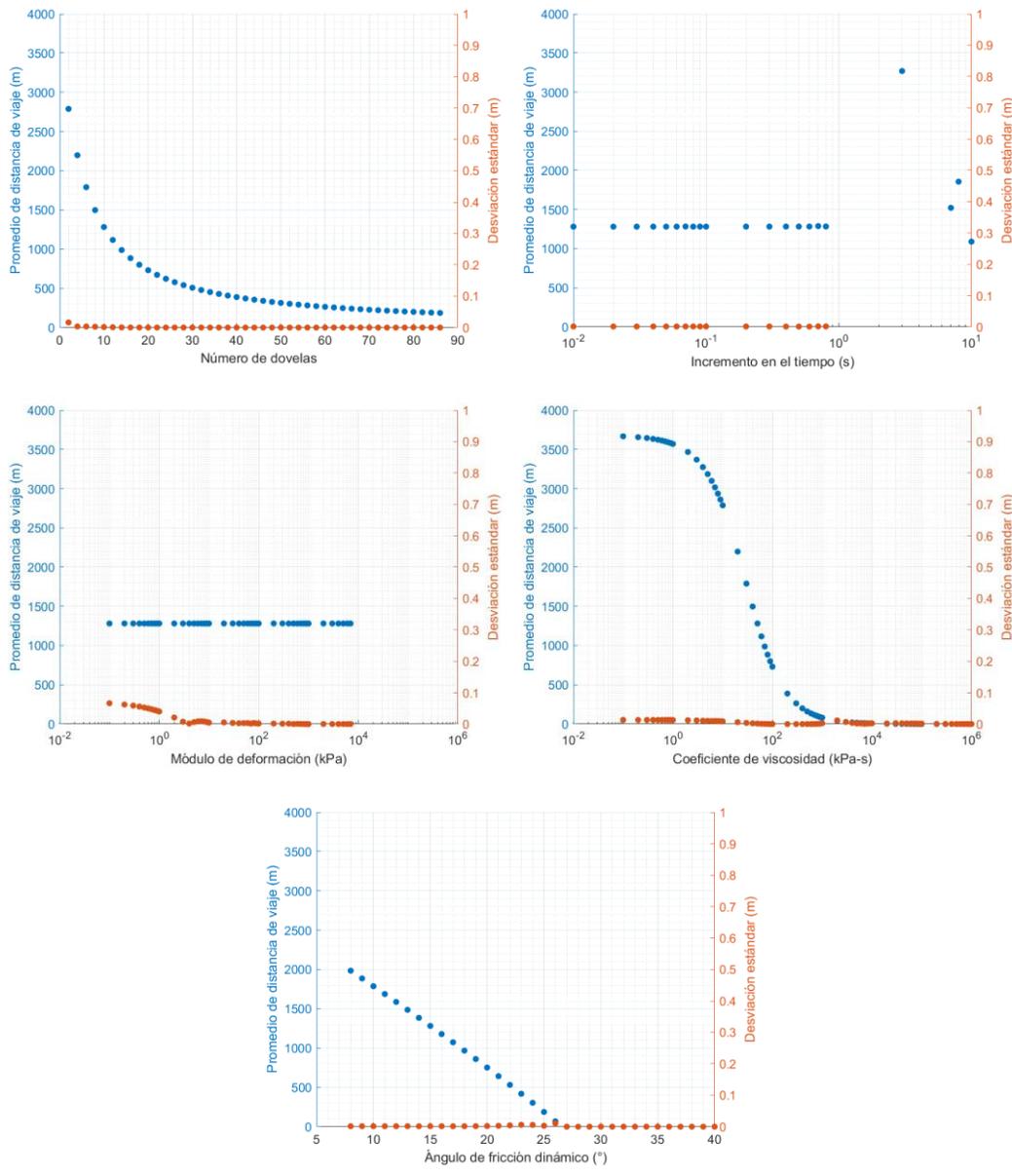


Figura 3.21 Análisis de sensibilidad bloque deslizante Modelo 2

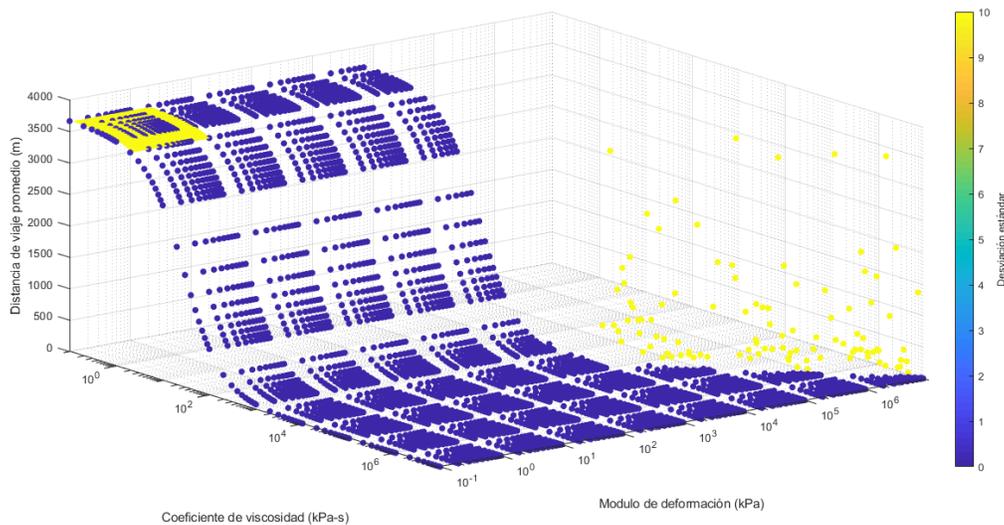
Adicionalmente, se realizaron gráficas en las que se presentan dos variables independientes simultáneamente, con el fin de observar la respuesta de los modelos con diferentes combinaciones de parámetros.

Las variables que se relacionaron fueron módulo de deformación y coeficiente de viscosidad, con el fin de evidenciar si existe alguna relación entre los parámetros, bajo las cuales se obtengan resultados considerados como válidos. Lo anterior se

planteó considerando que en función de estas variables se puede presentar un movimiento subamortiguado o sobreamortiguado, que conlleva a representar o no, el movimiento del deslizamiento

Además, se relacionaron las variables número de dovelas y el incremento de tiempo, debido a que la solución de la ecuación de movimiento por diferencias finitas depende de la relación entre la discretización del espacio y del tiempo.

La grafica que relaciona el módulo de deformación y coeficiente de viscosidad, presentada en la Figura 3.22, indica que para módulos de deformación mayores a 1E4 kPa, debe existir una relación proporcional con el coeficiente de viscosidad para obtener resultados considerados como válidos; de lo contrario, el modelo se vuelve inestable numéricamente.

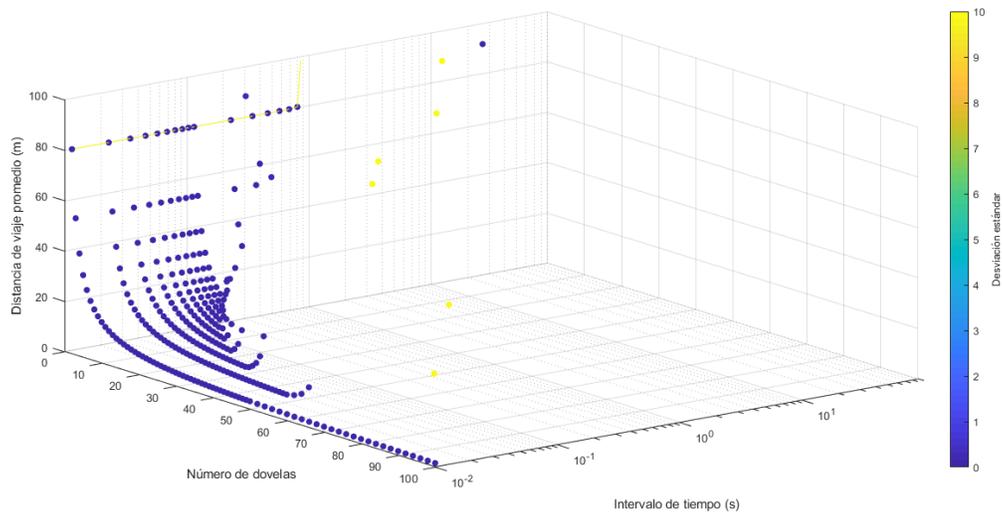


**Figura 3.22 Análisis de sensibilidad E vs  $\mu$**

En las Figura 3.23 y Figura 3.24 se presenta la gráfica que relaciona el incremento de tiempo y número de dovelas. En estas, se observa que para discretizar más el espacio (mayor número de dovelas) es necesario discretizar más el tiempo (menor incremento de tiempo); lo cual es consecuente con los criterios de estabilidad para el método de diferencias finitas.

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

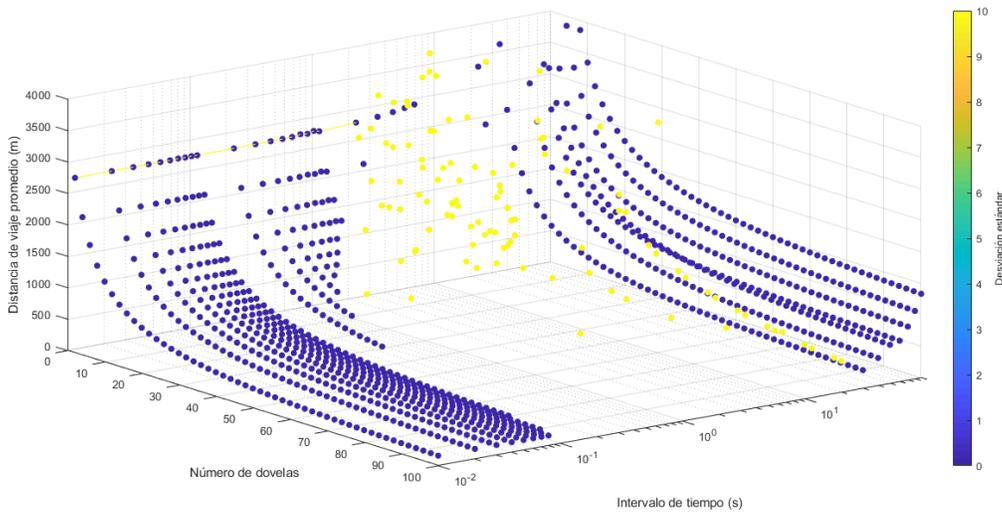
Para el modelo No 1 se evidencia que incrementos de tiempo de 0.1 segundos el modelo se puede discretizar máximo hasta 11 dovelas, al incrementar el tiempo o el número dovelas el modelo es inestable; mientras que para incrementos de tiempo de 0.01 segundos, el deslizamiento se puede discretizar en 100 dovelas.



**Figura 3.23 Análisis de sensibilidad Número de dovelas vs incremento de tiempo Modelo 1**

Por otro lado, para el modelo No 2 es posible observar que incrementos de tiempo de 0.1 segundos el modelo se puede discretizar máximo hasta 86 dovelas, al incrementar el intervalo del tiempo o el número dovelas se evidencia que el modelo ya es inestable; mientras que para incrementos de tiempo de 0.01 segundos, el deslizamiento se puede discretizar en 100 dovelas y el modelo numérico sigue siendo estable (véase Figura 3.24).

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*



**Figura 3.24** Análisis de sensibilidad Número de dovelas vs incremento de tiempo Modelo 2

Se resalta que el análisis de sensibilidad realizado corresponde para el caso del bloque deslizante en el talud infinito, en el cual la superficie que recorre la masa deslizada se mantiene constante y el área de cada una de las dovelas es la misma. La sensibilidad de los parámetros puede estar influenciada en otros casos por estas variables mencionadas, por lo cual cada caso debe ser analizado en detalle.

### 3.6. Métodos para determinación de parámetros

Para el cálculo de distancia de viaje y velocidad de deslizamientos se tendrán en cuenta parámetros de resistencia del suelo en condición estática, y diferentes parámetros en condición dinámica del suelo, tales como: ángulo de fricción residual, viscosidad dinámica y módulo de deformación.

Para evaluar la estabilidad del talud es importante contar con ensayos de laboratorio o in situ que permitan la obtención de parámetros del suelo en condición estática.

Inicialmente, los parámetros del suelo a determinar son de resistencia. Para la determinación de estos parámetros ( $c'$  y  $\phi'$ ) existen diferentes ensayos que permiten estimar la resistencia del material (parámetros Mohr-Coulomb). Uno de ellos es el

ensayo de compresión triaxial, el cual permite determinar el ángulo de fricción interna, cohesión, permeabilidad, y módulo de elasticidad entre los parámetros más relevantes. Este ensayo consiste en una muestra cilíndrica de un suelo sometida a una presión de confinamiento en todas sus caras; es uno de los más confiables para la determinación de los parámetros mencionados.

Este ensayo de laboratorio se puede realizar de cuatro diferentes formas: consolidado drenado (CD), consolidado no drenado (CU), no consolidado no drenado (UU) y no consolidado drenado (UD); sin embargo, debido a que el cálculo de la distancia de viaje y velocidad de deslizamiento se planteó en parámetros efectivos, se recomienda tener en cuenta el Triaxial Consolidado Drenado, el cual se realiza a velocidades muy bajas, con el fin de impedir generación de presión de poros, permitiendo la salida de agua en la muestra (Das, 2014). De este ensayo es posible determinar el ángulo de fricción residual del material, el cual da un indicio acerca de la magnitud del ángulo de fricción dinámico entre la masa deslizada y la superficie recorrida por la masa.

Del ensayo triaxial también es posible estimar el módulo de deformación axial del suelo, a partir del cual -según Miao et. al (2001) y Mora (2011)- se obtiene el coeficiente de rigidez de los resortes. Sin embargo, existen dos aspectos a tener en cuenta en la determinación de este parámetro:

- Teniendo en cuenta que durante el movimiento del deslizamiento se pueden presentar altas tasas de deformación que degradan el módulo de elasticidad, puede que el valor necesario para la ecuación de movimiento no corresponda al obtenido de este ensayo. Además, es importante resaltar que las tasas de deformación que ocurren durante un deslizamiento se desconocen; por lo cual existe incertidumbre acerca de la proporción que se degrada el módulo de deformación del material.
- Del análisis de sensibilidad realizado, se evidenció que este parámetro no tiene influencia en la distancia de viaje, pero si en la estabilidad numérica; y además que esta estabilidad numérica se puede presentar a módulos de

deformación bajos que no son típicos en los geomateriales. Por lo anterior, es posible que este parámetro corresponda más a un parámetro de ajuste numérico que a una propiedad física del material como fue planteado por Miao et.al. (2001) y Mora (2011). Lo anterior se discutirá luego de analizar los resultados en los que se verifique la aplicabilidad de la metodología.

Para estimar el coeficiente de viscosidad, se reportan en la literatura ensayos como el reómetro, anillo de corte o correlaciones en función de las propiedades índice del suelo; sin embargo, los resultados de estos métodos difieren entre sí, incluso en ordenes de magnitud. (van Asch, Van Beek, & T.A., 2007). Además, tal como sucede con el módulo de deformación, los valores determinados en los ensayos corresponden a valores a bajas tasas de deformación. En la literatura, no se evidenciaron ensayos o casos de estudio en los que se estime el coeficiente de viscosidad para deslizamientos rápidos.

Por lo anterior, se recomienda que el módulo de deformación y el coeficiente de viscosidad dinámica se establezcan tomando como referencia los parámetros de deslizamientos modelados previamente con esta metodología y que se puedan considerar como similares (tanto en geometría como en propiedades mecánicas y reológicas), o en caso que se tengan registros de distancia de viaje, se determinen a partir del retro cálculo, estableciendo como objetivo modelar el tiempo y/o distancia de viaje que se registra del deslizamiento.

Para este último método (retro cálculo), es necesario conocer la influencia que tienen estos parámetros en el modelo propuesto. Este análisis es presentado en el capítulo 5. Para los deslizamientos modelados en esta investigación, se establecieron los parámetros con los cuales se obtuvo una distancia de viaje similar a la registrada en la literatura, los cuales se podrán tomar como referencia.

Adicionalmente, en el análisis de sensibilidad realizado en cada caso de estudio, se estableció el rango de parámetros bajo los cuales el modelo es numéricamente estable.

## **4. Resultados: Aplicabilidad de la metodología**

La aplicabilidad de la metodología fue verificada con dos ejemplos de deslizamientos supuestos, que pueden ser considerados como deslizamientos típicos en una ladera o del corte para una vía. Los parámetros con los cuales fue ejecutado el modelo fueron supuestos a partir del análisis de sensibilidad realizado previamente.

Además, se verificó la aplicabilidad con tres casos reales de deslizamientos en suelos, que han ocurrido en años previos y que cuentan con registros de distancia de viaje y caracterización geotécnica.

La determinación de parámetros y resultados obtenidos para cada modelación son presentados a continuación.

### **4.1. Ejemplo 1**

#### *4.1.1. Topografía y características del deslizamiento*

El ejemplo planteado consiste en un talud con una topografía irregular, donde la superficie de falla se encuentra en la parte media del talud, tal como se observa en la Figura 4.1. El deslizamiento es relativamente pequeño respecto a deslizamientos registrados (como los descritos más adelante); el ancho del deslizamiento es de 12 m y la altura de 4m, representando un volumen deslizado de  $10 \text{ m}^3$  por cada metro de profundidad.

#### *4.1.2. Determinación de parámetros*

Los parámetros de resistencia supuestos para este ejemplo corresponden a valores típicos para una arena de baja densidad relativa, con  $\phi'=26^\circ$   $c'=0 \text{ kPa}$   $\gamma=16\text{kN/m}^3$ . Debido a la geometría del talud, fue necesario tener en cuenta la presencia de agua para así generar la inestabilidad de talud; entonces, el nivel freático se consideró como una altura del 75% respecto a la altura total en cada dovela, condición bajo la cual se obtuvo un F.S. menor a 1.0 para una discretización en 5 dovelas.

Los parámetros en condición dinámica fueron seleccionados arbitrariamente, a partir del rango de parámetros bajo los cuales se evidencio estabilidad numérica en el modelo. En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros con los que se ejecutó el programa.

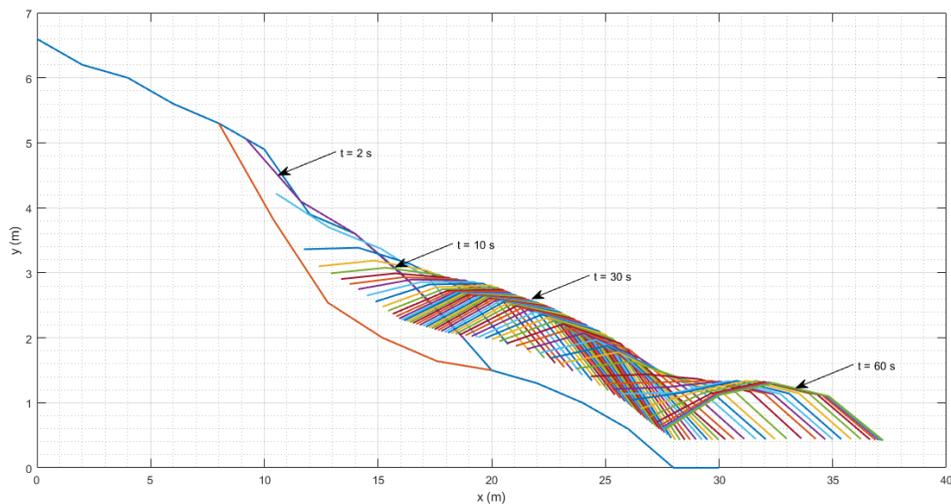
*Tabla 4.1 Parámetros Ejemplo 1*

PARÁMETROS EJEMPLO No 1	
Módulo de deformación (kN/m/m)	100
Coeficiente de viscosidad (kPa-s)	10
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	5
Ángulo de fricción dinámico (°)	5
Tiempo máximo (s)	120

#### *4.1.3. Distancia de viaje y velocidades*

Los resultados de la simulación arrojan una distancia de viaje de 18.5m que se alcanzó alrededor de los 90 segundos. En la Figura 4.1 se presenta la superficie del talud durante el movimiento cada dos segundos, en donde la línea azul corresponde a la superficie natural de la ladera y la línea roja a la recorrida registrada; donde se evidencia que la masa deslizada viajo a lo largo de la superficie irregular del talud, incluso hasta llegar a la parte plana donde finalmente se detuvo.

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*



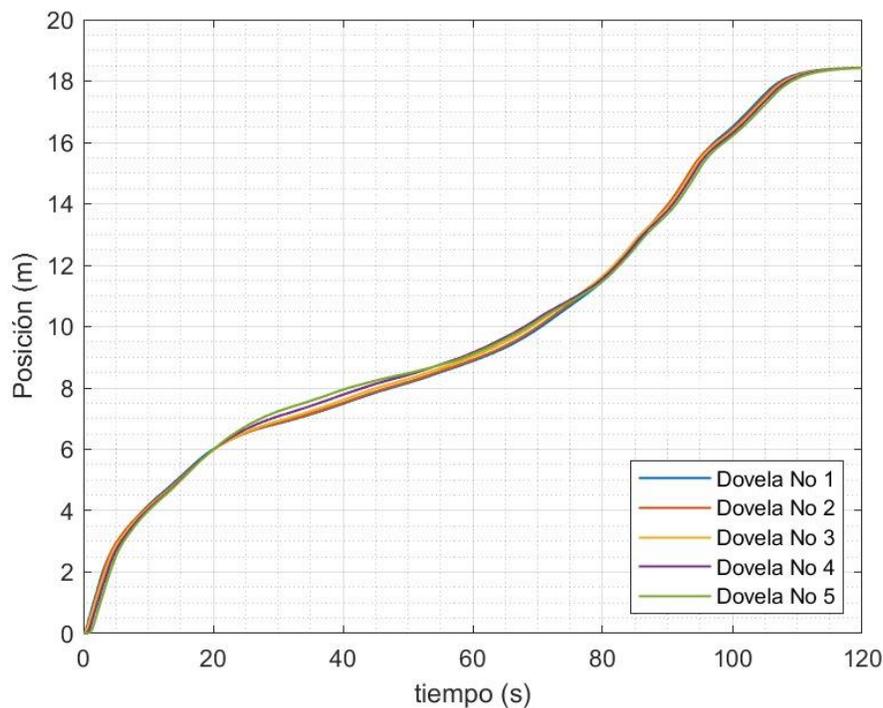
**Figura 4.1.** Superficie del talud durante el tiempo que ocurre el deslizamiento.

Para evaluar el comportamiento cinemático del deslizamiento supuesto, se graficó la posición, velocidad y aceleración de cinco de las dovelas (numeradas desde la corona a la pata del talud) existentes a lo largo del talud, estas son presentadas en la Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4; respectivamente. En estas se puede observar que:

- Todas las dovelas inician el movimiento prácticamente en el mismo instante, evidenciando un comportamiento en el cual la masa se desplaza manteniendo su integridad.
- Alrededor de los 30 segundos, se presenta un comportamiento en el cual se reduce la velocidad en las dovelas, como si fuera a detenerse el movimiento. Este comportamiento es debido a la superficie irregular por la cual tiene que viajar la masa deslizada, que corresponde a una superficie que va incrementando ligeramente la pendiente en los primeros 7m de recorrido a partir de la pata del talud; por esta razón, a partir de los 30 segundos vuelve a incrementar la velocidad de las dovelas, y así mismo a aumentar su posición.
- Las velocidades máximas alcanzadas por las dovelas son similares entre ellas durante el movimiento. La velocidad máxima es de 0.9 m/s y se da al

momento en el cual ocurre la falla. Alrededor de los 60 segundos se presenta un máximo local en la velocidad, el cual es debido al cambio topográfico en la superficie que recorre la masa deslizada, donde se alcanzan velocidades de 0.5m/s.

- En promedio, la velocidad de la masa deslizada durante su trayecto fue de 0.21 m/s que lo clasifican como un deslizamiento muy rápido, según Hungr et al. (2013)
- Las gráficas de velocidad y aceleración evidencian que durante todo el movimiento la masa deslizada mantiene su integridad, ya que las aceleraciones y desaceleraciones ocurren prácticamente al mismo tiempo.



*Figura 4.2. Posición de cada dovela durante el deslizamiento*

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

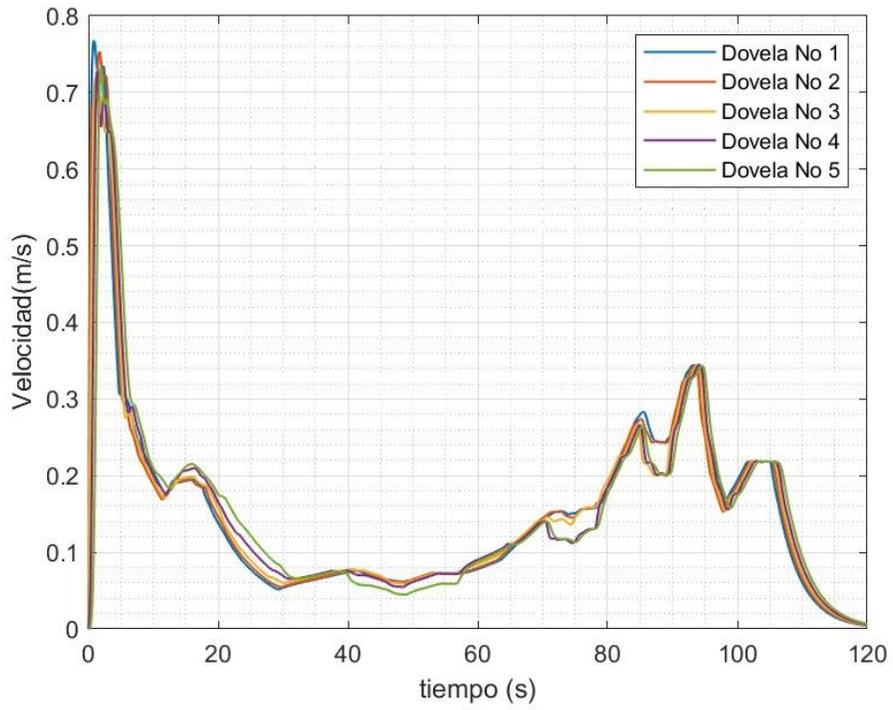


Figura 4.3. Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento

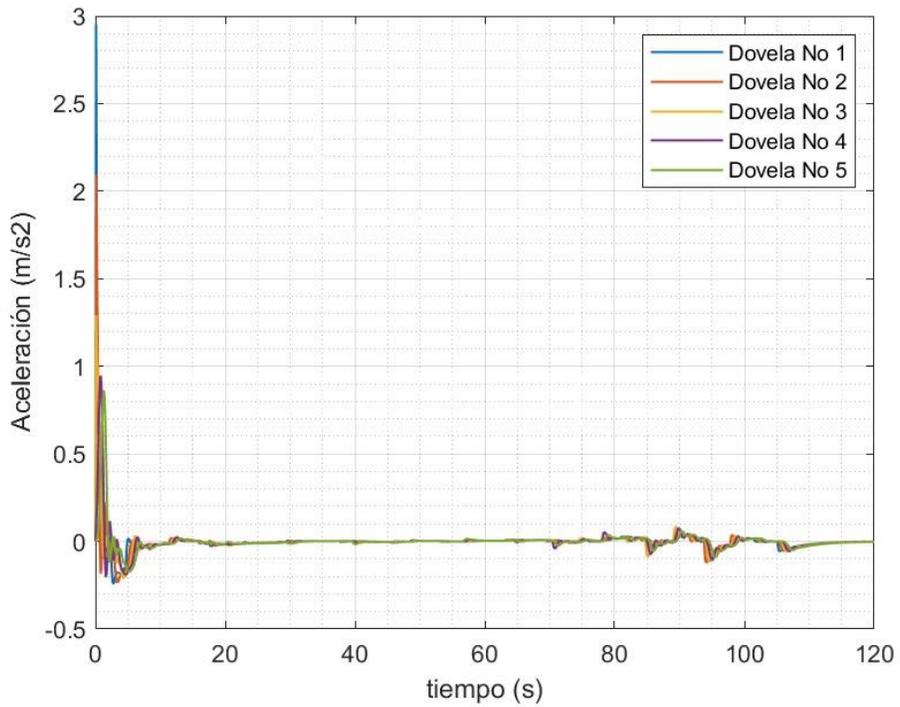


Figura 4.4. Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento

## **4.2. Ejemplo 2**

### *4.2.1. Topografía y características del deslizamiento*

El segundo ejemplo típico consiste en un talud de 50 m de ancho y 25 m de altura, el cual puede representar un corte realizado para una vía con un talud 2H:1V. La superficie de falla crítica se obtuvo en Slide® y fue la supuesta para ejecutar el modelo.

### *4.2.2. Determinación de parámetros*

Los parámetros de resistencia supuestos para este ejemplo corresponden a valores típicos de un material fino como una arcilla blanda, con  $\phi'=20^\circ$   $c'=3$  kPa  $\gamma=15$  kN/m<sup>3</sup>. No se consideró la presencia de agua. Bajo estas condiciones se obtuvo un F.S. menor a 1.0 para una discretización del talud en 10 dovelas.

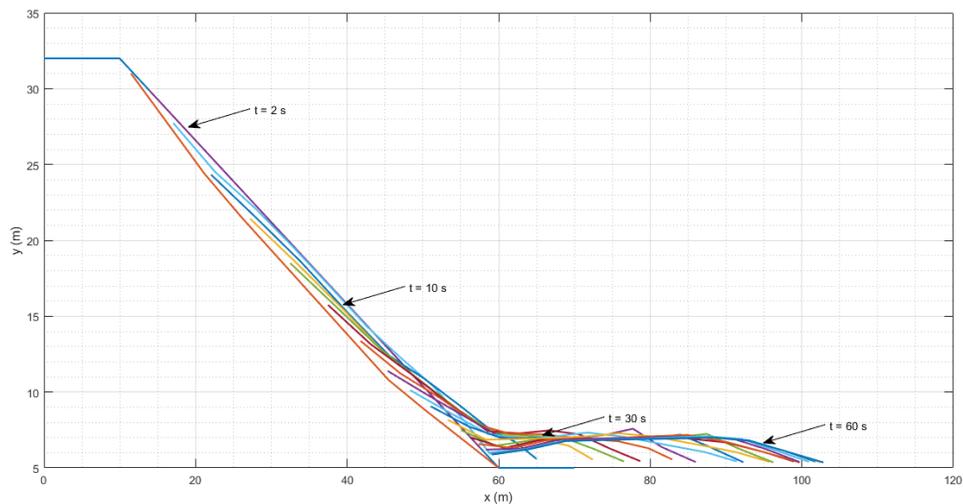
Los parámetros en condición dinámica fueron seleccionados arbitrariamente, a partir del rango de parámetros bajo los cuales se evidencio estabilidad numérica en el modelo. En la Tabla 4.2 se presentan los parámetros con los que se ejecutó el programa.

*Tabla 4.2 Parámetros Ejemplo 2*

PARÁMETROS EJEMPLO No 2	
Módulo de deformación (kN/m/m)	100
Coefficiente de viscosidad (kPa-s)	10
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	8
Tiempo máximo (s)	60

### 4.2.3. Distancia de viaje y velocidades

Los resultados de la simulación arrojan una distancia de viaje de 43 m que se alcanzó alrededor de los 20 segundos. En la Figura 4.5 se presenta la superficie del talud cada dos segundos, donde se evidencia que la masa deslizada del talud de corte se deposita en la superficie horizontal contigua.



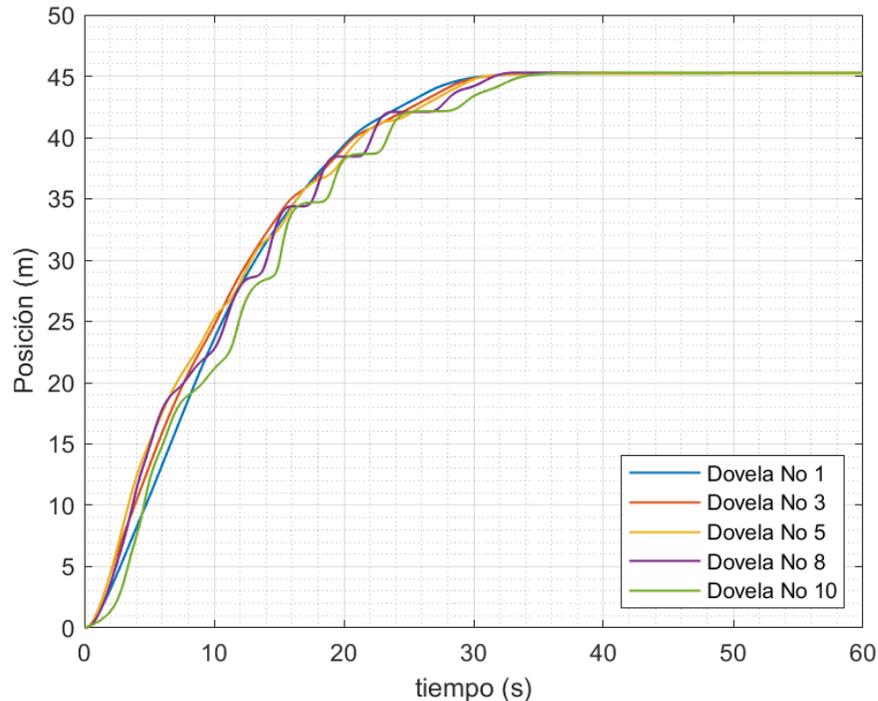
*Figura 4.5 Superficie del talud durante el tiempo que ocurre el deslizamiento.*

De manera similar a la anterior aplicación del modelo, se presenta en la Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8; la posición, velocidad y aceleración del deslizamiento en el tiempo, respectivamente. En estas se puede observar que:

- Todas las dovelas inician el movimiento en el segundo 1, en donde se evidencia un comportamiento en el cual la masa se desplaza manteniendo su integridad.
- Alrededor de los 25 segundos, se evidencia disminución de la velocidad en las dovelas, y se tiende a mantener la posición en cada una de las dovelas.
- Las velocidades alcanzadas por las primeras dovelas (Dovela No 1, Dovela No 3 y Dovela No 5) son similares durante todo movimiento, obteniéndose un valor máximo de aproximadamente 4 m/s; sin embargo, la Dovela No 8 y

No 10, presentan un comportamiento totalmente diferente, alcanzando velocidades de hasta 8 m/s.

- En promedio, la velocidad de la masa deslizada durante su trayecto fue de 1.0 m/s que lo clasifican como un deslizamiento entre muy rápido y extremadamente rápido, según Hungr et al. (2013)
- En la gráfica de aceleración, las dovelas ubicadas en la parte delantera evidencian un comportamiento vibratorio, que reflejan inestabilidad numérica en el modelo. Este comportamiento, se debe a la relación de masa, módulo de deformación y coeficiente de viscosidad.



*Figura 4.6 Posición de cada dovela durante el deslizamiento*

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

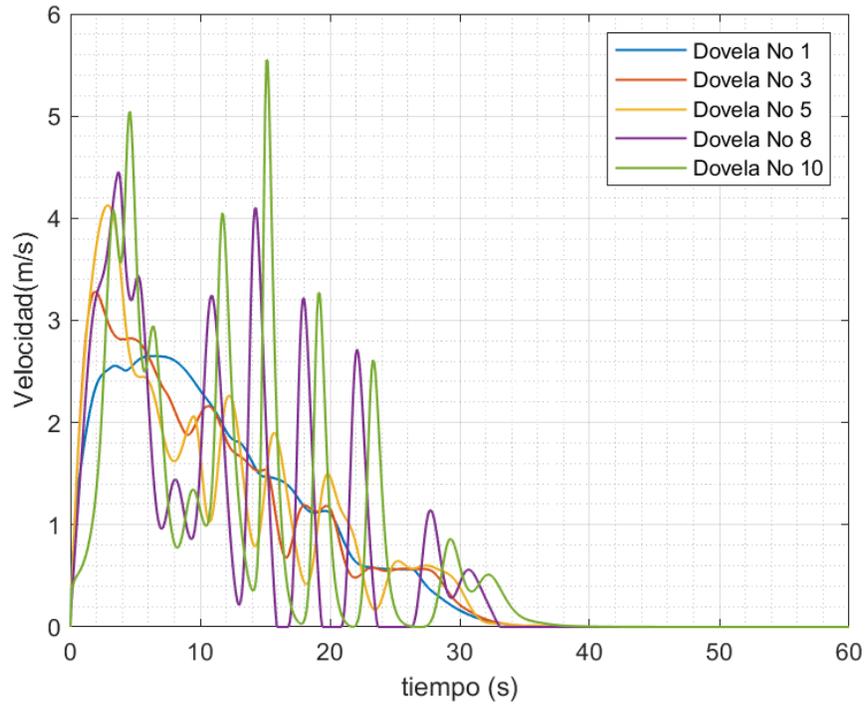


Figura 4.7 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento

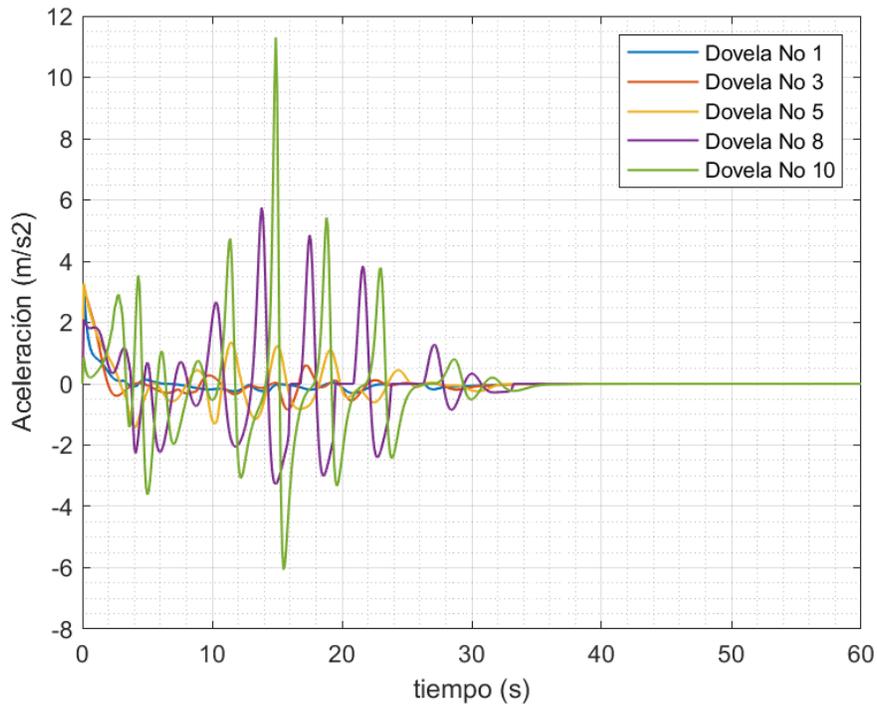


Figura 4.8 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento

### 4.3. Deslizamiento ocurrido en Tianshui, China

El deslizamiento ocurrido el día 11 de agosto de 1990, tuvo lugar al norte de la provincia Gansu en la ciudad Tianshui, China; causando la muerte de siete personas y daños severos en seis de las fábricas que se encontraban alrededor (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001).

#### 4.3.1. Topografía y características del deslizamiento

El deslizamiento es de alrededor 51,500 m<sup>2</sup> de área en planta y 95 m de altura. La masa deslizada fue de 2'000,000 m<sup>3</sup> aproximadamente y viajó una distancia de 118 m según registros topográficos como el presentado en la Figura 4.9. Personas que evidenciaron el deslizamiento afirmaron que la duración del deslizamiento se encontró entre 20 y 30 segundos, con velocidades máximas entre 7 y 9 m/s. (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001).

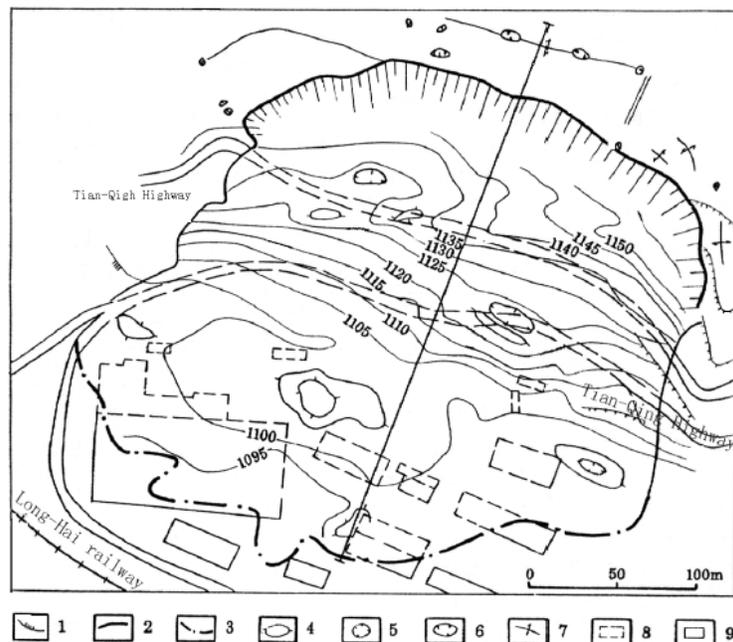


Figura 4.9. Topografía del deslizamiento ocurrido en Tianshui- Curvas de nivel cada 5m -. 1. Terraza del cuaternario. 2. Escarpe 3. Pata del deslizamiento 4. Drumlin 5. Depresión 6. Hundimiento 7. Grietas 8. Fabricas destruidas 9. Fabricas no destruidas. (Tomado de Miao et. al, 2001)

#### *4.3.2. Caracterización geotécnica*

La masa deslizada consiste en un depósito cuaternario de loess (sedimentos arcillosos de origen eólico) de 130m de profundidad según Miao et. al (2001). Subyaciendo este material se presenta una lodolita del terciario la cual decrece rápidamente su resistencia al corte con el incremento de la humedad; la superficie de falla fue formada en la parte superior de la lodolita debido a la presencia de agua subterránea. Además de la infiltración, algunos procesos de excavación en la pata del talud hicieron aumentar la pendiente natural del terreno. En 1987 se evidenció la aparición de grietas en la corona del talud que gradualmente se fueron desarrollando como hundimientos, hasta que el deslizamiento tuvo lugar el 11 de agosto de 1990.

Miao et. al (2001) referencia a Li et. al (1996) y Wen et al (1997), quienes realizaron ensayos de caracterización geotécnica del deslizamiento. En la masa deslizada, indican un ángulo de fricción interna, cohesión y peso unitario de  $32^\circ$ , 20-60 kPa y 14.1-15.6 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente; para la lodolita, en la zona de la superficie de falla del deslizamiento, obtuvieron un ángulo de fricción entre  $12.4$  y  $19.6^\circ$ , cohesión entre 6 y 9 kPa y peso unitario entre 21.1 y 21.7 kN/m<sup>3</sup>. Adicionalmente, estimaron el módulo de elasticidad de la masa deslizada entre 10 y 20 MPa.

#### *4.3.3. Determinación de parámetros*

Para el modelo planteado se deben establecer parámetros en condición estática para evaluar el factor de seguridad (F.S.) y en condición dinámica para simular el movimiento del deslizamiento.

Para evaluar la estabilidad de la ladera se discretizó la masa deslizada en 10 dovelas y se consideraron parámetros  $\phi' = 30^\circ$ ,  $c' = 6$  kPa y  $\gamma = 15$  kN/m<sup>3</sup> para el método de equilibrio límite UTM. Al no considerar la presencia del nivel freático se obtuvo que el talud es marginalmente estable (F.S = 1.07), mientras que al considerar la presencia de nivel freático por encima de la superficie de falla se obtiene un F.S < 1.0. Lo anterior es concordante con la descripción y caracterización

del deslizamiento, el cual fue desencadenado principalmente por una fuerte precipitación.

Como se discutió previamente, es difícil contar con caracterización de propiedades de los materiales en condiciones dinámicas, por lo cual, los parámetros fueron determinados mediante retro cálculo del deslizamiento. Para esto, se buscó garantizar la estabilidad del modelo para la solución planteada por diferencias finitas y a la vez obtener el resultado que mejor se ajuste al tiempo y distancia de viaje del deslizamiento.

Los parámetros obtenidos en condición dinámica son presentados en la Tabla 4.3.

*Tabla 4.3 Parámetros Tianshui*

PARÁMETROS TIANSHUI	
Módulo de deformación (kN/m/m)	1,000
Coefficiente de viscosidad (kPa-s)	500
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	19
Tiempo máximo (s)	60

#### *4.3.4. Distancia de viaje, velocidad y aceleración*

Al ejecutar el modelo con los parámetros establecidos, se obtuvo una distancia de viaje de 109 m. En la Figura 4.10 se presenta la superficie del talud cada dos segundos, durante los 30 segundos que tardó en detenerse la masa deslizada.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

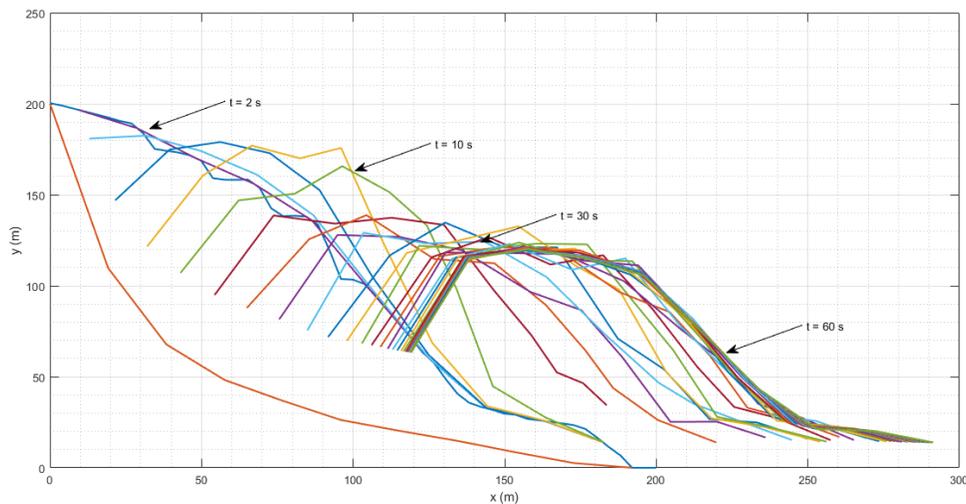


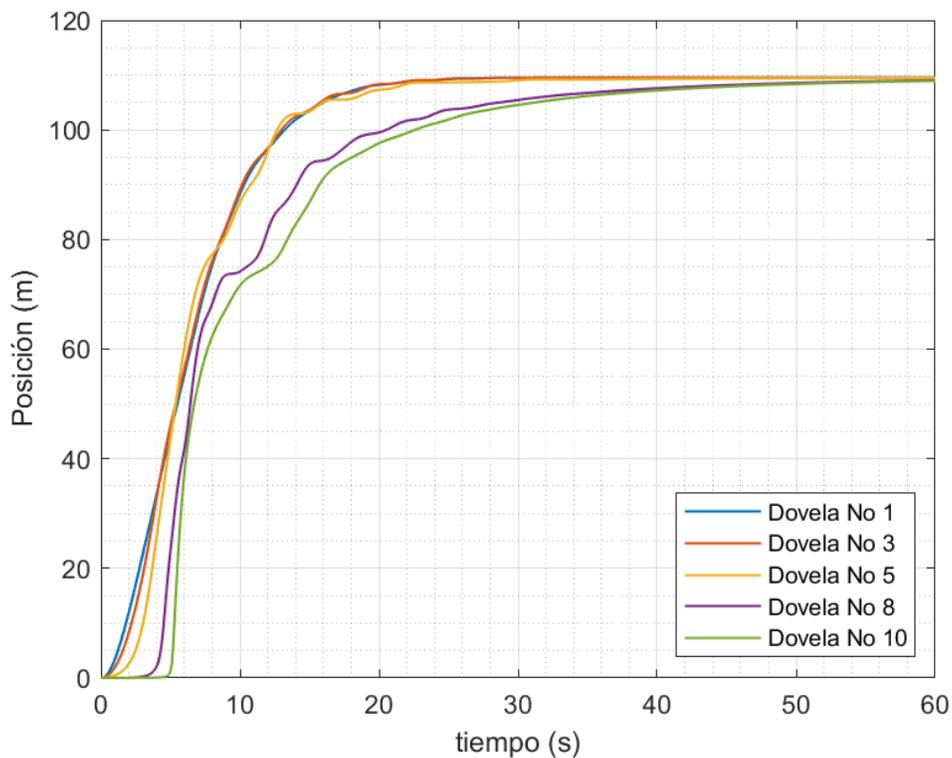
Figura 4.10. Superficie del talud durante el deslizamiento “Tianshui”

Para evaluar el comportamiento cinemático del deslizamiento, se graficó la posición, velocidad y aceleración de cinco de las dovelas (numeradas desde la corona a la pata del talud) existentes a lo largo del talud, estas son presentadas en la Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13; respectivamente. En estas se evidencia lo siguiente:

- El movimiento inicia en la parte posterior del talud (Dovela No. 1), la cual empuja a cada una de las dovelas hasta inducir el movimiento de la última dovela (pata del talud) a los 4 segundos.
- A partir de los 20 segundos, las dovelas 1, 3 y 5 tienden a mantener su posición, mientras que las dovelas 8 y 10 (parte frontal del talud) se detienen alrededor de los 30 segundos.
- La parte posterior del talud (Dovela 1) alcanzó su velocidad máxima de 9m/s alrededor de los 3 segundos; la parte media del deslizamiento (Dovela 5) alcanzó velocidades de hasta 17m/s entre 4 y 5 segundos; y la parte frontal del talud (Dovela 10) alcanzó velocidades de 19 m/s a los 6 segundos.
- La velocidad promedio durante el trayecto de la masa deslizada es de 3.17m/s, los cuales clasifican el deslizamiento como extremadamente rápido según Hungr et. al (2013)

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

- Una vez cada dovela alcanzó su velocidad máxima, tiende a disipar su energía cinética hasta detenerse, es decir, disminuir su velocidad hasta 0 m/s.
- La aceleración y desaceleración de las dovelas ubicadas en la parte frontal del talud muestran un comportamiento vibratorio que refleja inestabilidad numérica. Este comportamiento se puede dar numéricamente, debido a la relación existente entre la masa, módulo de deformación y coeficiente de viscosidad; y es reflejado únicamente en estas dovelas debido a que el área de estas (y por tanto su masa) es menor respecto a las demás.



*Figura 4.11. Posición de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui*

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

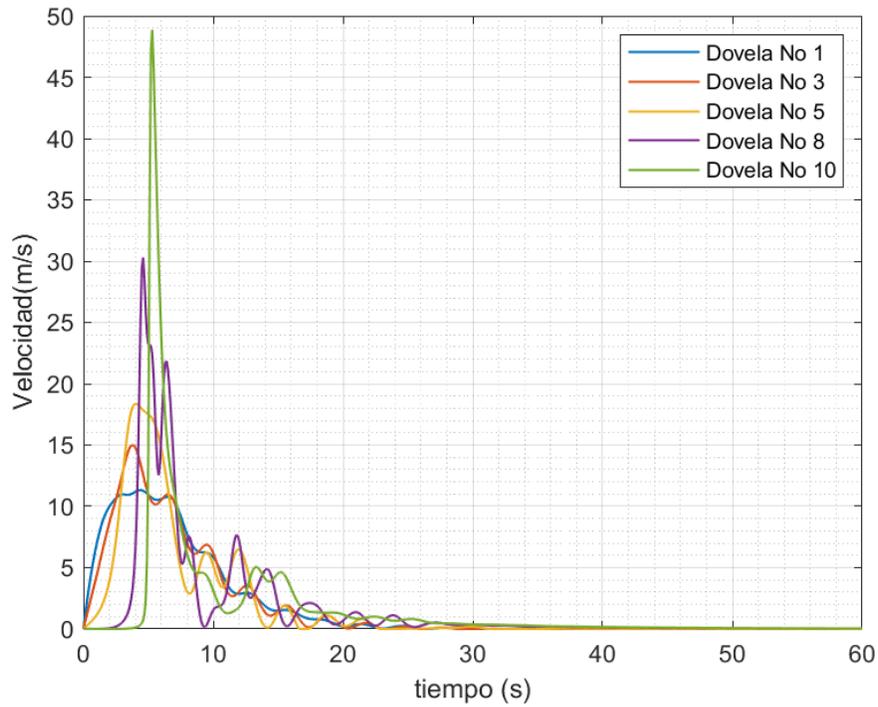


Figura 4.12. Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui

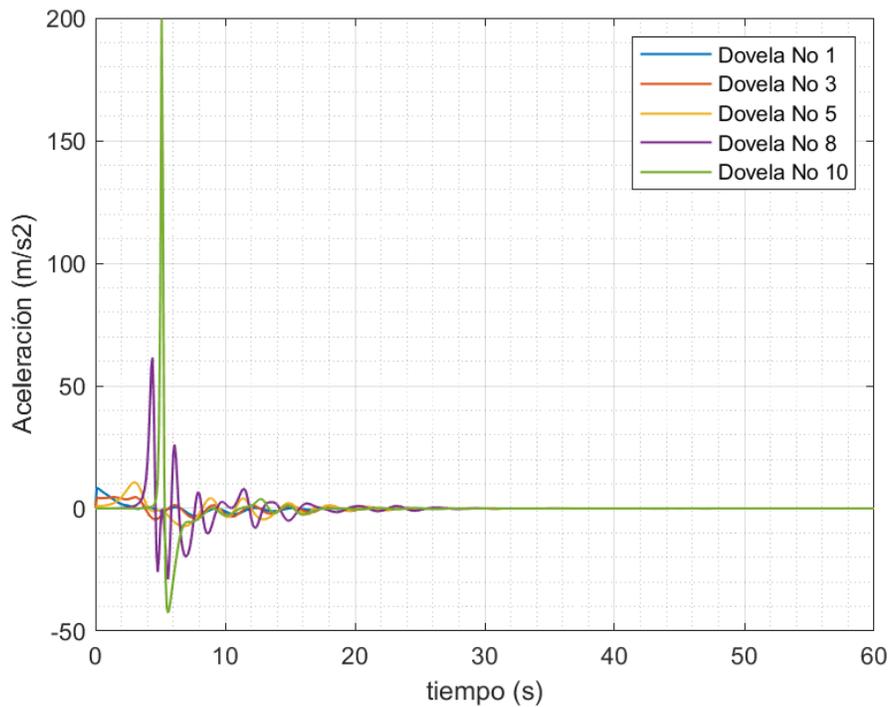


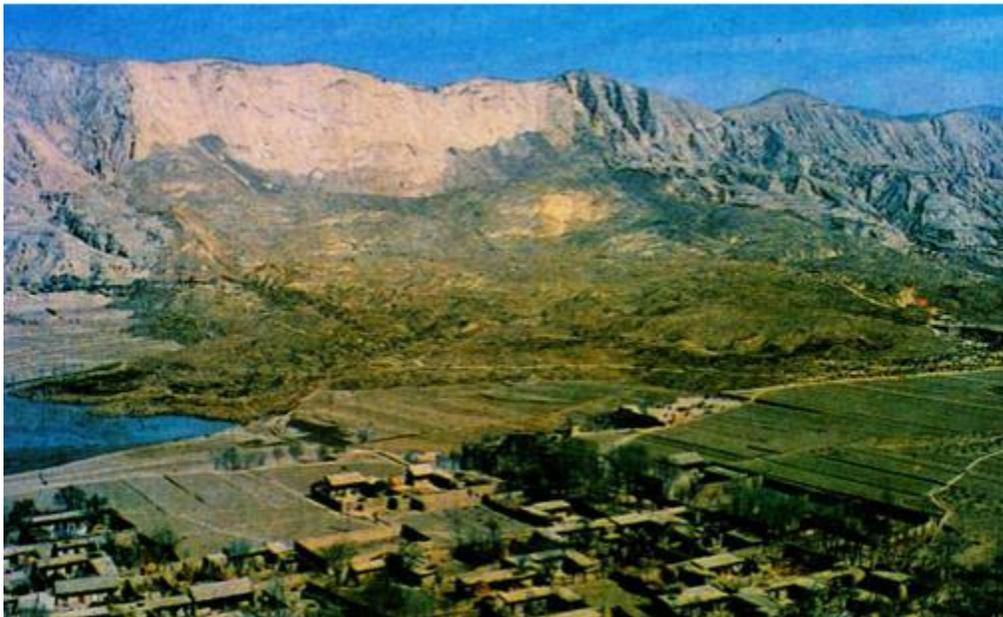
Figura 4.13. Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Tianshui

#### **4.4. Deslizamiento Sale Mountain**

El 7 de marzo de 1983, un deslizamiento ocurrió en Dongxiang, Provincia de Gansu, en la meseta de Loess en China. Las coordenadas geográficas del movimiento de remoción de tierra son 105°35'10" E, 35°33'4" N. Debido a este deslizamiento, tres comunidades fueron completamente destruidas y murieron alrededor de 237 personas, ubicadas en el segundo nivel de la terraza del río Baxic y cerca de la pata de la superficie de falla (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001).

La elevación del talud antes del deslizamiento ocurrido variaba entre 2,300 a 2,400 msnm y la elevación del lecho del río Baxic es de 1,962 msnm.

Según los estudios e investigaciones realizadas por Stephen et al. (2002), no se registraron detonantes para este proceso de remoción en masa que causó pérdidas de vidas humanas (Stephen & Jerome, 2002).

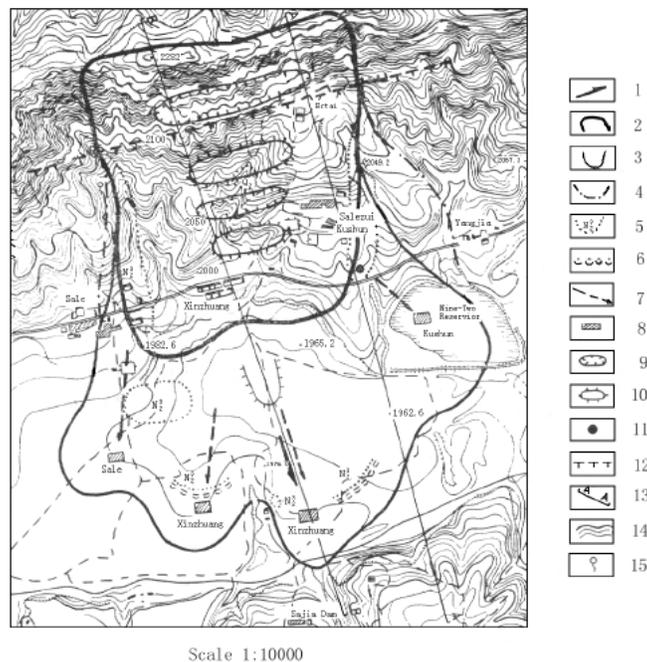


*Figura 4.14. Deslizamiento Sale Mountain. Tomado de (Hung, Leroueil, & Picarelli, The Varnes classification of landslide types, an update, 2014)*

#### 4.4.1. Topografía y características del deslizamiento

El deslizamiento ocurrido tuvo un área aproximada de 1.3 km<sup>2</sup>, una longitud de 625 m, ancho de 420 m y un volumen deslizado de 30'000,000 m<sup>3</sup>; y debido a su pronunciada pendiente se presentó repentinamente, generando entonces que la corona del talud cayera desde 2,283 msnm hasta 2,080 msnm; con una distancia de viaje vertical de aproximadamente 200 m. La pata de la masa desplazada avanzó a través del valle 1050 m antes de detenerse (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001).

Según los registros encontrados, el proceso de este deslizamiento duro entre uno y dos minutos, por lo cual tuvo una velocidad estimada de 20 m/s, catalogándolo como un deslizamiento extremadamente rápido según la clasificación de Varnes para deslizamientos (Hung, Leroueil, & Picarelli, The Varnes classification of landslide types, an update, 2014).



**Figura 4.15** Plano del deslizamiento de Sale Mountain (Zha, 1983). 1, dirección principal de viaje; 2, límite de la cama de deslizamiento; 3, límite de la acumulación; 4, límite de la zona afectada; 5, estrato y edad de los depósitos; 6, área de rodadura; 7, dirección del movimiento de la masa del suelo; 8, ubicación final del pueblo desplazado; 9, depresión; 10, drumlin; 11, punto excavado; 12, culpa; 13, línea de sección transversal; 14, contorno sobre formas de relieve originales; 15, primavera. Intervalo de contorno = 5 m (Tomado de Miao et al, 2001)

#### **4.4.2. Caracterización geotécnica**

El suelo que se encuentra en esta provincia es estéril y no existe cobertura vegetal. Se evidencia que dos de los bancos verticales que cortan la pendiente de la montaña forman los límites laterales del deslizamiento; y teniendo en cuenta que el río Baxic está en un amplio valle, su caudal alcanza un máximo de 40 m<sup>3</sup>/s y un mínimo de 0.2 m<sup>3</sup>/s, por lo cual el banco izquierdo nunca fue socavado por este caudal (Stephen & Jerome, 2002).

Según la geología regional de la provincia, en esta zona se encuentran tres niveles de terrazas fluviales dentro del valle; la primera está cubierta de aproximadamente 10 m de arena aluvial y gravas; sin embargo, después del deslizamiento, las arenas aluviales y las gravas se enterraron bajo la masa desplazada. En el segundo nivel de terraza, surgió la superficie de falla del deslizamiento Sale Mountain. Finalmente, en el tercer nivel de la terraza se encuentra un desprendimiento de tierras enterrado del Pleistoceno tardío eólico. Sobre el tercer nivel de la terraza hay otra antigua terraza deslizante (Stephen & Jerome, 2002).

Adicionalmente, según la investigación realizada por Stephen et al. en 2002, todos los estratos presentes en la zona de deslizamiento estuvieron involucrados, por lo cual se tomaron muestras y se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar la zona en la cual se presentó el deslizamiento; a partir de los resultados obtenidos, se encontró que, debido a bajas presiones de confinamiento, se comportan como materias frágiles. Por otro lado, se encontró que la relación entre la resistencia pico y la resistencia residual es alta (aproximadamente el doble); presentándose una disminución de fuerza de alrededor del 50%. La resistencia a la compresión uniaxial de la lutita de la zona con contenido de humedad natural es de aproximadamente 20 MPa, pero cuando esta se satura la resistencia disminuye a 2.2 MPa. Estos resultados ilustran claramente la disminución en la resistencia de la roca cuando se satura con agua. A continuación, se pueden observar los resultados obtenidos en laboratorio en el deslizamiento ocurrido.

**Tabla 4.4 Propiedades físico-mecánicas de loess y lutitas (Tomado de Liu y Wu, 1987)**

Litología	Porosidad (n%)	Densidad natural (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión pico (kPa)	Cohesión residual (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Loess de Malan	47.32	15.37	44.39	-	28.13
Loess de Lishi	39.73	18.39	154.64	-	30.83
Limolita	34.14	20.54	210.70	-	34.39
Lutita I	29.02	20.15	639.90	122.50	29.25
Lutita II	-	21.66	687.96	397.88	26.00

Por otro lado, en las simulaciones realizadas por Miao et al., 2001, los ángulos de fricción dinámica de las cinco partes de la trayectoria de deslizamiento se tuvieron en cuenta así: 0–10 °, 22 °, 10 °, 3–10° y 3–5 °, con referencia a Liao et al. (1997); el peso unitario del suelo usado fue 18 kN/m<sup>3</sup>, y el módulo de deformación es de 15 MPa (Miao, Liu, Niu, & Ma, A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides, 2001)

#### *4.4.3. Determinación de parámetros*

En el modelo que se realizó para la representación del deslizamiento, se definieron los parámetros en condición estática y condición dinámica; los primeros, para evaluar el factor de seguridad a partir de un modelo de equilibrio límite, y el segundo para la simulación del movimiento del deslizamiento.

Para evaluar la estabilidad de la ladera por el método de equilibrio límite se discretizó la masa deslizada en 10 tajadas y se tuvieron en cuenta parámetros  $\phi' = 18^\circ$ ,  $c' = 5$  kPa y  $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>, y no se consideró presencia de nivel freático, por lo cual se obtuvo un F.S. = 1.01, el cual, según la tolerancia establecida en esta investigación, ya se supone en condición de falla.

Como se ha mencionado anteriormente, la caracterización de materiales en condiciones dinámicas es difícil de estimar, debido a su complejidad, por lo cual, los parámetros se determinaron mediante retro cálculo del deslizamiento.

Los parámetros obtenidos en condición dinámica son presentados en la Tabla 4.5.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

Tabla 4.5 Parámetros Sale Mountain

PARÁMETROS SALE MOUNTAIN	
Módulo de deformación (kN/m/m)	7,000
Coefficiente de viscosidad (kPa-s)	400
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	8
Tiempo máximo (s)	100

#### 4.4.4. Distancia de viaje, velocidad y aceleración

Una vez determinados los parámetros con los que es estable, se obtuvo una distancia de viaje de aproximadamente 1063 m. En la Figura 4.16 se presenta la superficie del talud cada 2 segundos, durante los 100 segundos que tardó en detenerse la masa deslizada.

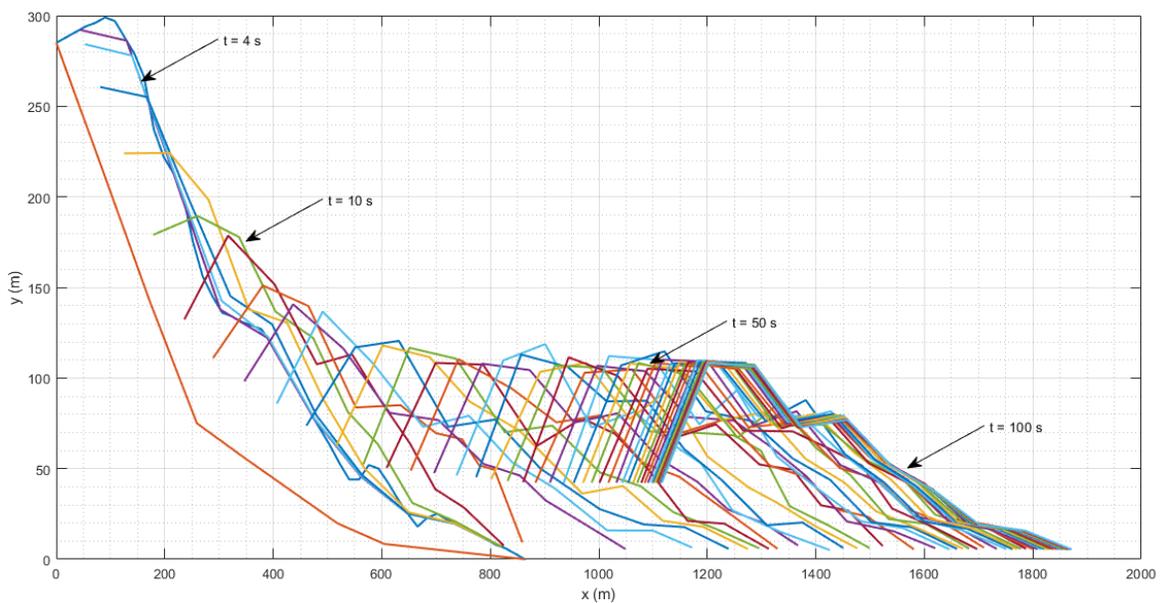


Figura 4.16 Superficie del talud durante el deslizamiento Sale Mountain

De manera similar a las anteriores aplicaciones del modelo, se presenta en la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19; la posición, velocidad y aceleración del deslizamiento en el tiempo, respectivamente. En estas se evidencia lo siguiente:

- El movimiento inicia en la parte posterior del talud (Dovela No. 1), la cual induce el desplazamiento de la pata del talud a partir de los 10 segundos.
- El deslizamiento tiende a mantener su posición, y disminuir su velocidad y aceleración significativamente alrededor de los 90 segundos.
- La parte posterior del talud alcanzó su velocidad máxima de 30m/s alrededor de los 15 segundos; la parte media del deslizamiento alcanzó velocidades de hasta 50m/s a los 10 segundos; y la parte frontal del talud alcanzó velocidades de 120 m/s entre los 10 y 15 segundos.
- La velocidad promedio durante el trayecto de la masa deslizada es de 10.62 m/s, lo cual según Hungr et. al (2013) se clasifica como un deslizamiento extremadamente rápido.
- La aceleración y desaceleración de las dovelas ubicadas en la parte delantera del talud muestran un comportamiento vibratorio, característico de un movimiento subamortiguado. Como se mencionó para el anterior caso aplicado, este comportamiento se puede dar debido a la relación existente entre la masa, módulo de deformación y coeficiente de viscosidad; y es reflejado únicamente en estas dovelas debido a que el área de estas es menor. Por tanto, al presentar estos resultados no se está representando la naturaleza física del problema en las últimas dovelas, y los resultados para estas difieren respecto a los obtenidos para la masa deslizada.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

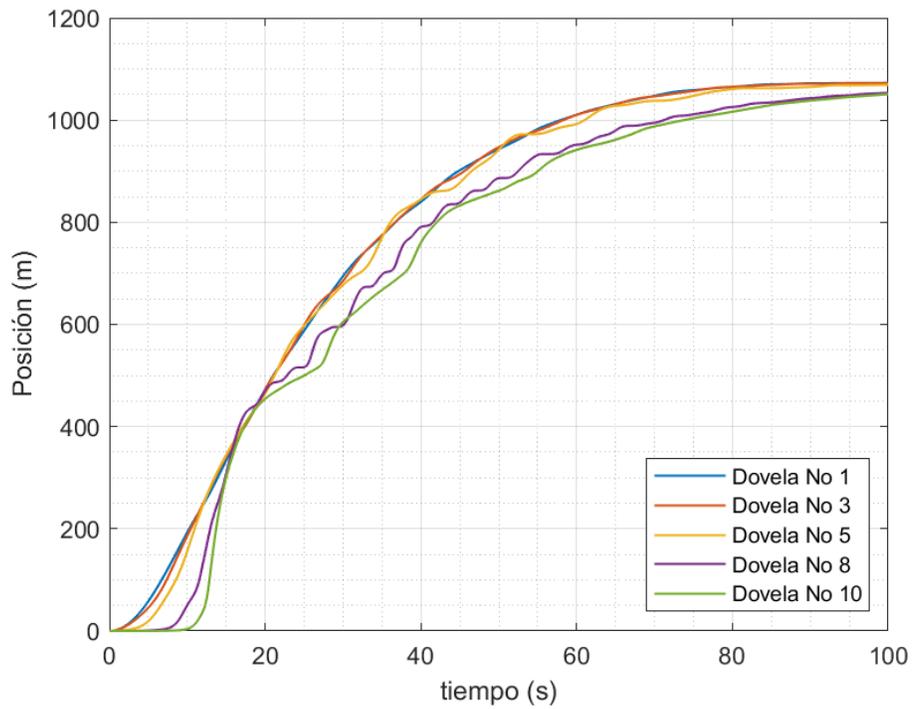


Figura 4.17 Posición de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain

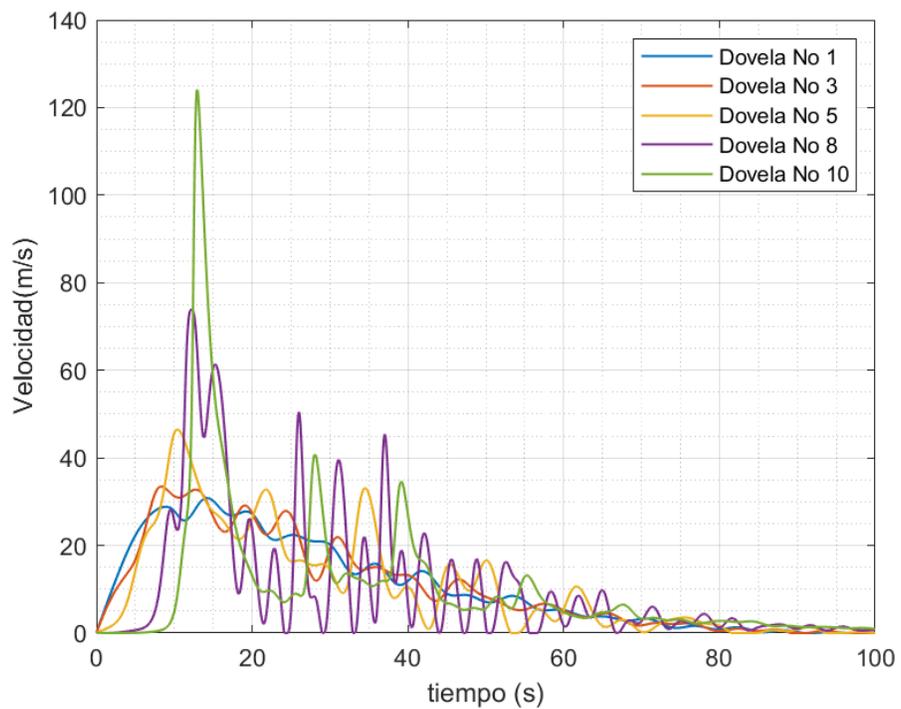
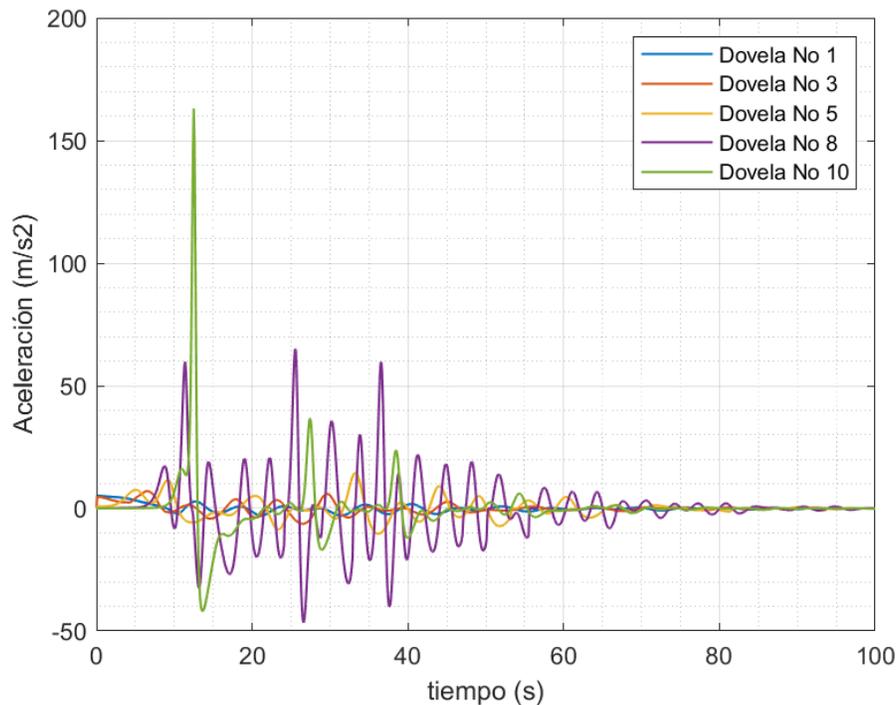


Figura 4.18 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*



*Figura 4.19 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Sale Mountain*

#### **4.5.Deslizamiento Hiegaesi**

El deslizamiento Hiegaesi ocurrió al sur de Fukushima, Japón debido a las fuertes lluvias que se presentaron del 26 al 31 de agosto de 1998, en el cual se movilizaron aproximadamente  $1,200 \text{ m}^3$  de suelo deslizado y viajó a lo largo del valle depositándose en un arrozal. Este fue un movimiento muy superficial, que se produjo debido a la presencia de agua en sedimentos volcánicos. En los registros de la lluvia se encontró precipitación continua de 17 horas desde el 26 hasta el 27 de agosto, con un valor de 227.6 mm, la precipitación máxima por hora fue de 90 mm y la precipitación acumulada antes del deslizamiento fue de 387mm (Wang, Sassa, & Wang, 2002).

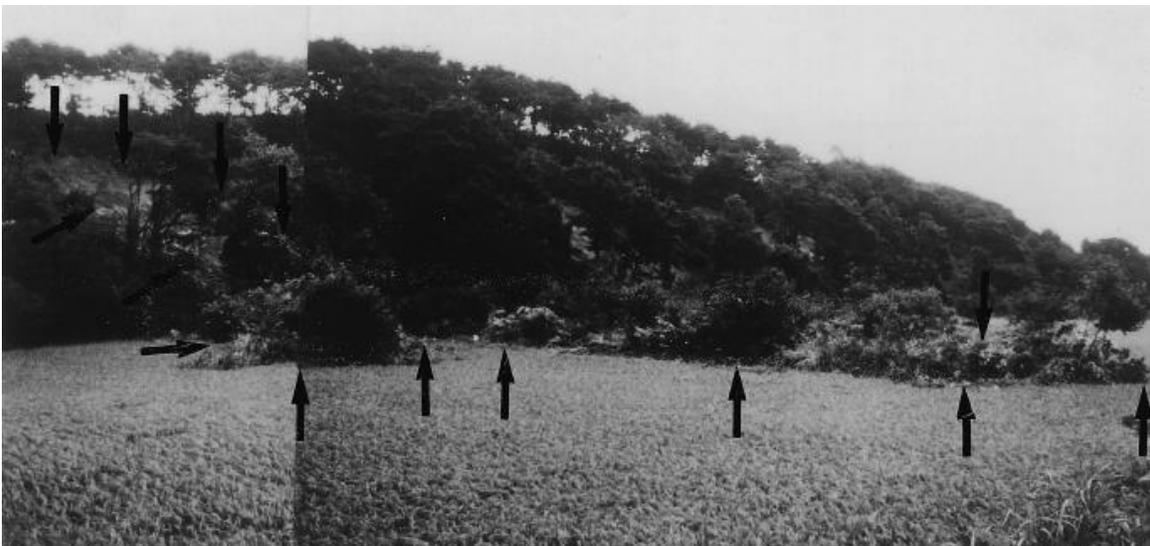
Una de las hipótesis que se tuvo en cuenta en la investigación realizada por Sassa (2000) acerca de los mecanismos de falla en materiales granulares, fue que la masa deslizada se encontraba lo suficientemente húmeda para afectar la estabilidad de

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

la ladera, catalogándolo entonces como un deslizamiento de tierra de tipo de larga trayectoria.

#### *4.5.1. Topografía y características del deslizamiento*

La dirección de deslizamiento fue hacia el occidente, evidenciándose un escarpe principal visible a la izquierda de la Figura 4.20; en la cual adicionalmente se puede observar que los árboles sobre la masa deslizada no se vieron afectados, indicando que el movimiento ocurrió como un bloque.



*Figura 4.20 Fotografía del deslizamiento (Wang, Sassa, & Wang, 2002)*

En las investigaciones realizadas, se utilizaron estaciones de monitoreo con el fin de identificar las características geométricas de la ladera una vez ocurrido el deslizamiento, en donde se obtuvo la sección longitudinal y de planta del terreno. En la Figura 4.21 se observa que las distancias de viaje máximas fueron de 67, 64 y 48 m; además se encontró que el área de origen tenía 23 m de ancho y 30 m de largo, con una altura máxima de alrededor de 3 m, y una pendiente 25°.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

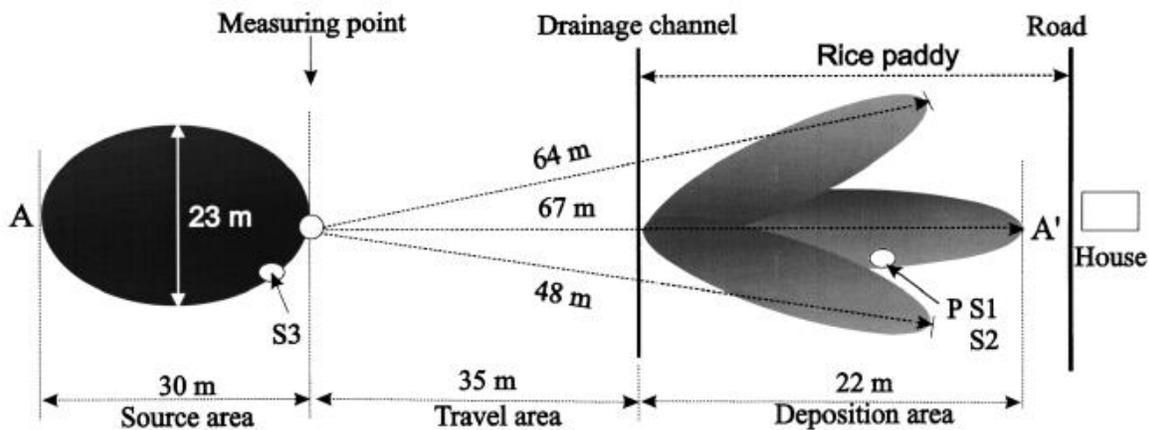


Figura 4.21 Secciones del deslizamiento (Wang, Sassa, & Wang, 2002)

#### 4.5.2. Caracterización geotécnica

Con el fin de identificar los parámetros de la masa deslizante, compuesta por una capa de ceniza volcánica franca, una capa de piedra pómez y una toba desgastada, se realizó un ensayo de corte controlado.

Se realizaron ensayos de corte drenados y no drenados con el fin de identificar las propiedades del deslizamiento. Los resultados encontrados de los ensayos de laboratorio y las observaciones de campo indicaron que el deslizamiento resultó de la licuefacción de la superficie de falla. Adicionalmente, con base en estos ensayos, fue posible determinar el ángulo de fricción residual y el ángulo de fricción a pico son  $8^\circ$  y  $41^\circ$ , respectivamente (Wang, Sassa, & Wang, 2002).

Finalmente, debido a los ensayos que se realizaron, Wang et al (2002) afirma que la zona en la que ocurrió el deslizamiento de suelo se encontraba en una condición no drenada durante el movimiento rápido, el cual fue el principal detonante del evento.

#### **4.5.3. Determinación de parámetros**

En el modelo que se realizó para este deslizamiento, se definieron los parámetros en condición estática y condición dinámica; para evaluar la estabilidad de la ladera por el método de equilibrio límite se discretizó la masa deslizada en 10 dovelas y se tuvieron en cuenta parámetros  $\phi' = 40^\circ$ ,  $c' = 0$  kPa y  $\gamma = 16$  kN/m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que el detonante de este evento fueron las fuertes lluvias presentados, por lo cual fue necesario tener en cuenta el nivel freático. Se consideró que el nivel freático se encontraba a una altura del 70% respecto a la altura de cada dovela, lo cual genera la inestabilidad de la ladera en el análisis de equilibrio límite. Con los parámetros mencionados anteriormente, se encontró un F.S. = 0.92.

Tal como se realizó en los ejemplos y casos de aplicación que se presentaron previamente, la caracterización de materiales en condiciones dinámicas es difícil de estimar, debido a su complejidad para su determinación, por lo cual, los parámetros se determinaron con retro cálculo teniendo en cuenta las características geométricas del deslizamiento.

Los parámetros obtenidos en condición dinámica son presentados en la Tabla 4.6.

*Tabla 4.6 Parámetros del deslizamiento Hiegaesi*

PARÁMETROS HIEGAESI	
Módulo de deformación (kN/m/m)	100
Coefficiente de viscosidad (kPa*s/m)	3
Intervalo de tiempo (s)	0.1
Numero de dovelas	10
Ángulo de fricción dinámico (°)	8
Tiempo máximo (s)	40

#### 4.5.4. Distancia de viaje, velocidad y aceleración

Una vez determinados los parámetros con los que el modelo es estable, se obtuvo una distancia de viaje de aproximadamente 63 m. En la Figura 4.22 se presenta la superficie del talud cada dos segundos, durante los 40 segundos que tardó en detenerse la masa deslizada.

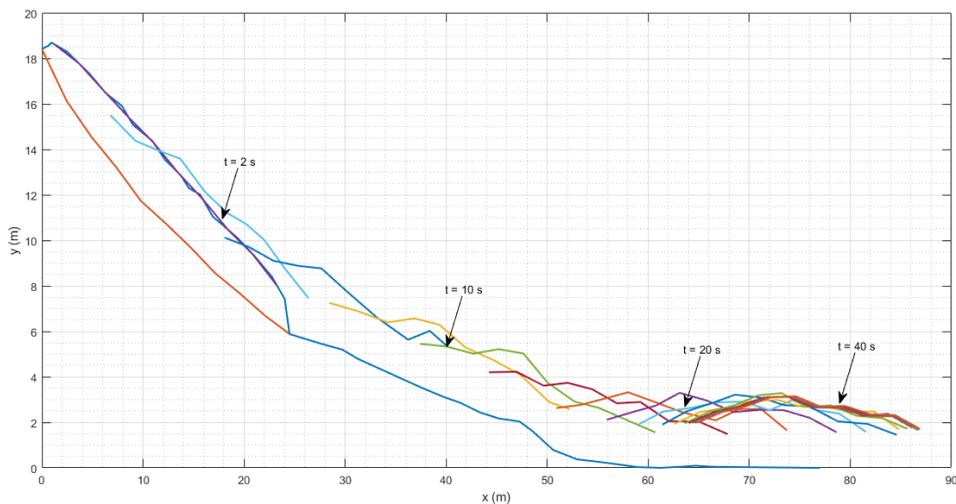


Figura 4.22 Superficie del talud durante el deslizamiento Hiegaesi

De manera similar a las anteriores aplicaciones del modelo, se presenta en la Figura 4.23, la Figura 4.24 y la Figura 4.25; la posición, velocidad y aceleración del deslizamiento en el tiempo, respectivamente. En estas se evidencia lo siguiente:

- El deslizamiento tiende a mantener su posición, y disminuir su velocidad y aceleración significativamente alrededor de los 25 segundos; evidenciándose que llega una distancia de viaje de aproximadamente 63 m.
- El deslizamiento empieza alrededor de los 2 segundos, alcanzando su velocidad máxima a los 4 segundos; y luego empieza a disminuir significativamente a los 20 segundos con velocidades de 1 m/s.
- La Dovela 1 alcanzó su velocidad máxima de 7 m/s alrededor cerca de los 5 segundos, y la parte frontal del talud alcanzó velocidades de 11 m/s en el mismo intervalo de tiempo.

- La velocidad promedio durante el trayecto de la masa deslizada es de 1.72 m/s, clasificándolo como un deslizamiento extremadamente rápido según Hungr et. al (2013).

Como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento vibratorio que se puede observar en la gráfica de velocidad y aceleración en las últimas dovelas puede ser debido a la relación de la masa, el módulo de deformación y el coeficiente de viscosidad. Por tanto, al presentar vibraciones, no se está representando totalmente la naturaleza física del problema.

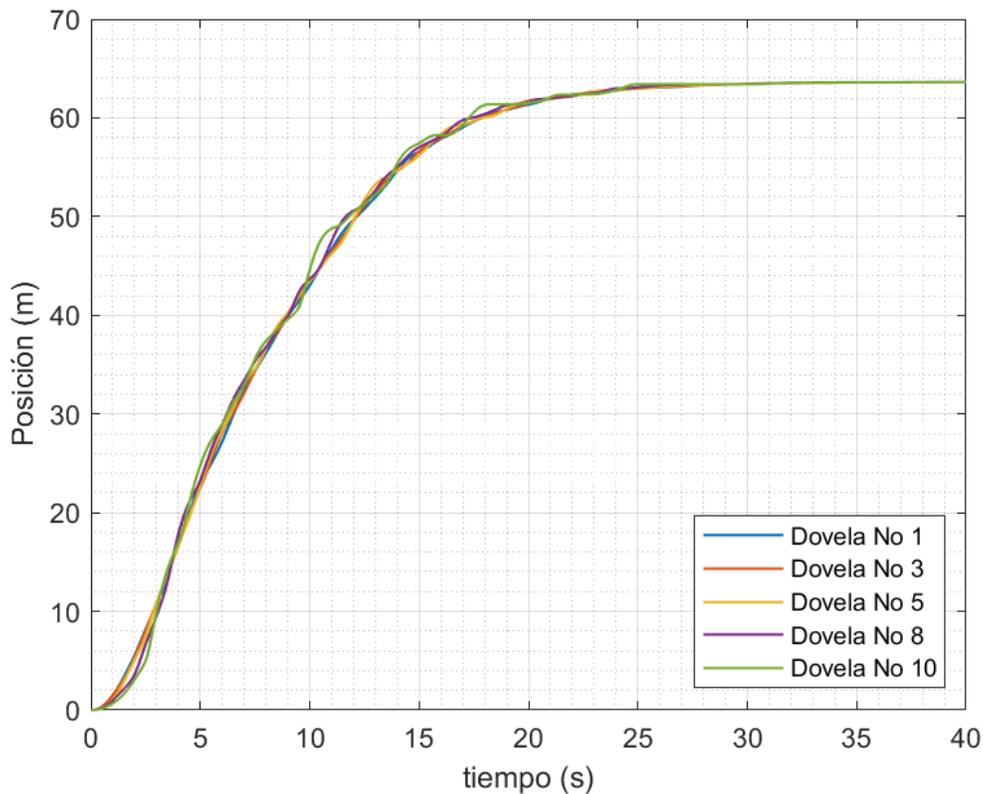


Figura 4.23 Posición de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

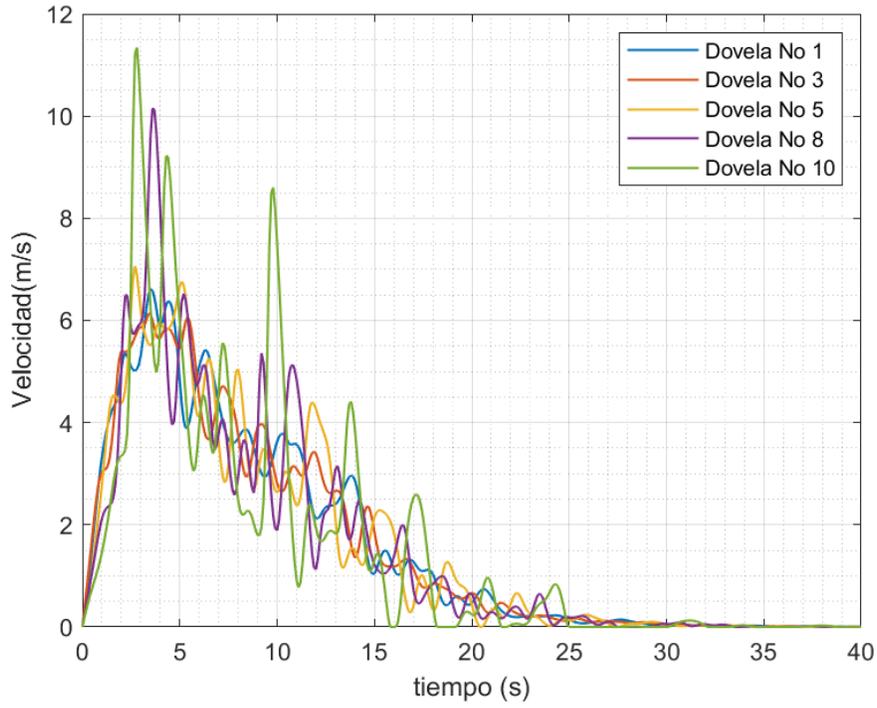


Figura 4.24 Velocidad de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi

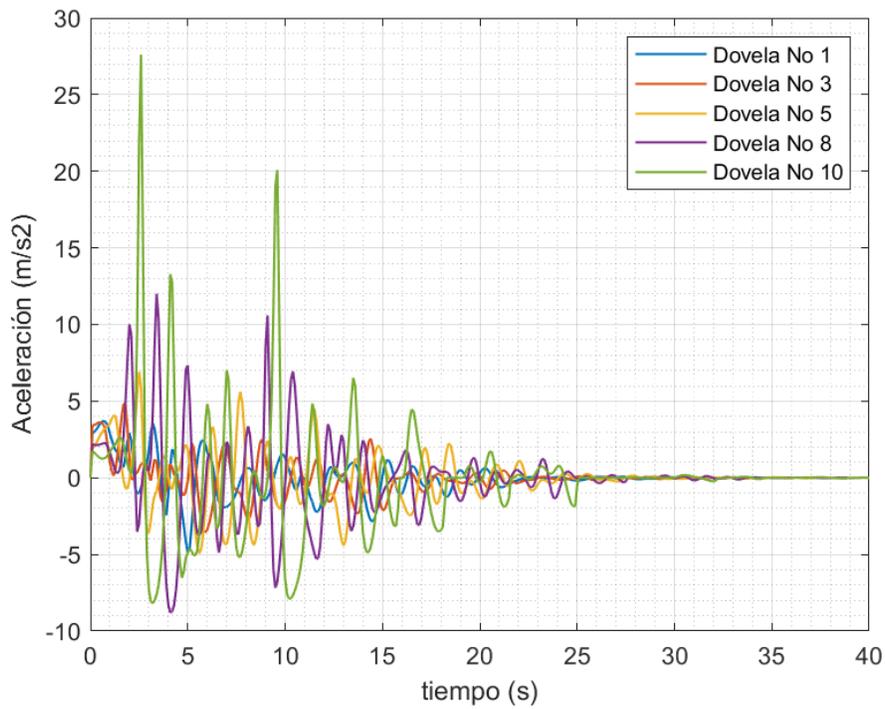


Figura 4.25 Aceleración de cada dovela durante el deslizamiento Hiegaesi

## **5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN CASOS APLICADOS**

Dado que los valores de los parámetros determinados para los diferentes casos de aplicación fueron supuestos o calculados a partir de retro cálculo, se realizó un análisis de sensibilidad para evidenciar la variación en el resultado para cada uno de los casos ejecutados.

El procedimiento llevado a cabo para el análisis corresponde al mismo presentado para el análisis de sensibilidad del bloque deslizante en el talud infinito; en el cual los parámetros establecidos (con los que se ejecutó cada ejemplo) se dejan constantes, mientras se varía únicamente el parámetro en análisis según los rangos establecidos previamente.

Los análisis realizados en cada uno de los casos de aplicación son presentados gráficamente de la Figura 5.1 a la Figura 5.5. Los parámetros en los cuales se presente una distancia de viaje y una desviación estándar en los rangos definidos en las gráficas corresponden a resultados que son considerados como plausibles, es decir, razonables.

En términos generales, para cada uno de los parámetros analizados se observaron diferencias respecto al análisis realizado con el bloque deslizante en el talud infinito.

- Así como para el bloque deslizante, el módulo de deformación no tiene influencia en la distancia de viaje, pero sí la tiene en la estabilidad del modelo. En los casos aplicados, como ocurre en Sale Mountain, se presenta un cambio ligero (menor al 10%) en la distancia de viaje al disminuir el módulo de deformación; esto puede ser debido a la irregularidad de tamaño en la masa deslizada, donde la diferencia de tamaño de cada una de las dovelas tiene influencia en los resultados obtenidos.
- La influencia del coeficiente de viscosidad en los casos aplicados es muy fuerte respecto a la distancia de viaje del deslizamiento, tal como ocurrió con el modelo del bloque deslizante. En las gráficas llama la atención que la desviación estándar presenta un incremento en determinados valores. Luego

de analizar detalladamente estos resultados, se observó que es debido a que en el tiempo máximo que se ejecutó el análisis, la masa deslizada no alcanza a detenerse, por lo cual algunas dovelas se han desplazado más que otras y es la razón por la cual se tiene un incremento en la desviación estándar donde, aun así, el modelo sigue siendo estable numéricamente y por tanto fueron considerados como resultados plausibles. La diferencia respecto al modelo del bloque deslizando radica en la pendiente de la superficie de falla, ya que esta no es constante en los casos aplicados, lo que causa desplazamientos no uniformes en las dovelas durante el movimiento de la masa deslizada

- El comportamiento reflejado para el incremento de tiempo es similar al obtenido para el modelo del bloque deslizando, donde este solo influye en la estabilidad del modelo
- Los resultados del análisis de sensibilidad indican que para los casos aplicados el máximo número de dovelas en el cual se puede discretizar la masa deslizada es 12, a excepción del ejemplo 1 donde se presentó estabilidad numérica hasta 17 dovelas. Estos valores son inferiores a diferencia del modelo 2 del bloque deslizando, y la diferencia se da principalmente por la irregularidad de la superficie de falla en los casos aplicados, lo cual conlleva a que varíe la pendiente por la cual viaja cada una de las dovelas, y así mismo, varié el tamaño de las dovelas.
- Para el ángulo de fricción dinámica, no es notable una tendencia inversamente proporcional como se observaba para el bloque deslizando. En los casos aplicados, se observan ciertos cambios bruscos en la tendencia, lo cual es debido a los cambios de pendiente de la superficie que recorre la masa deslizada. No obstante, este parámetro influye únicamente, mediante una relación inversa, en la distancia de viaje

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

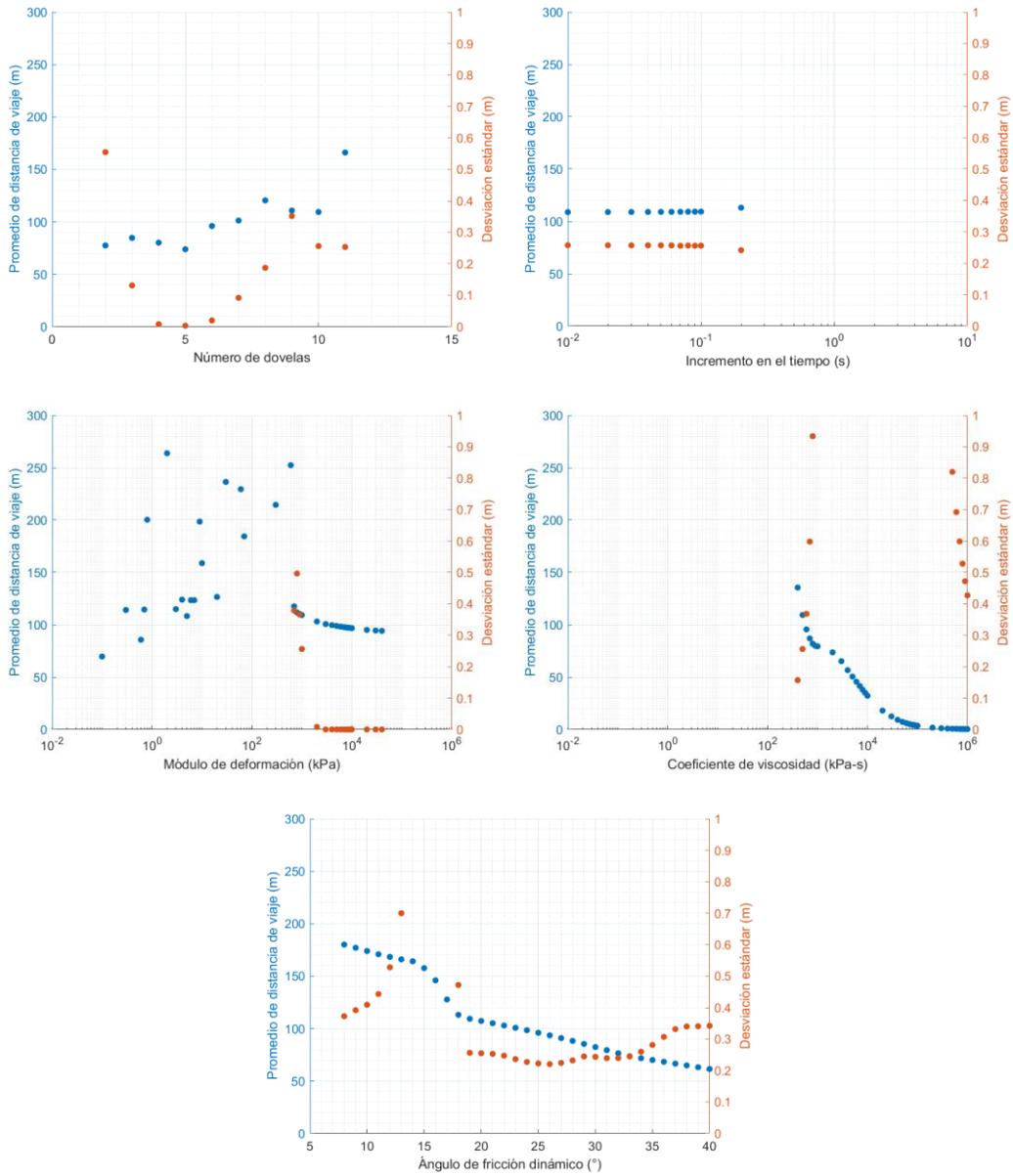


Figura 5.1. Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Tianshui

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

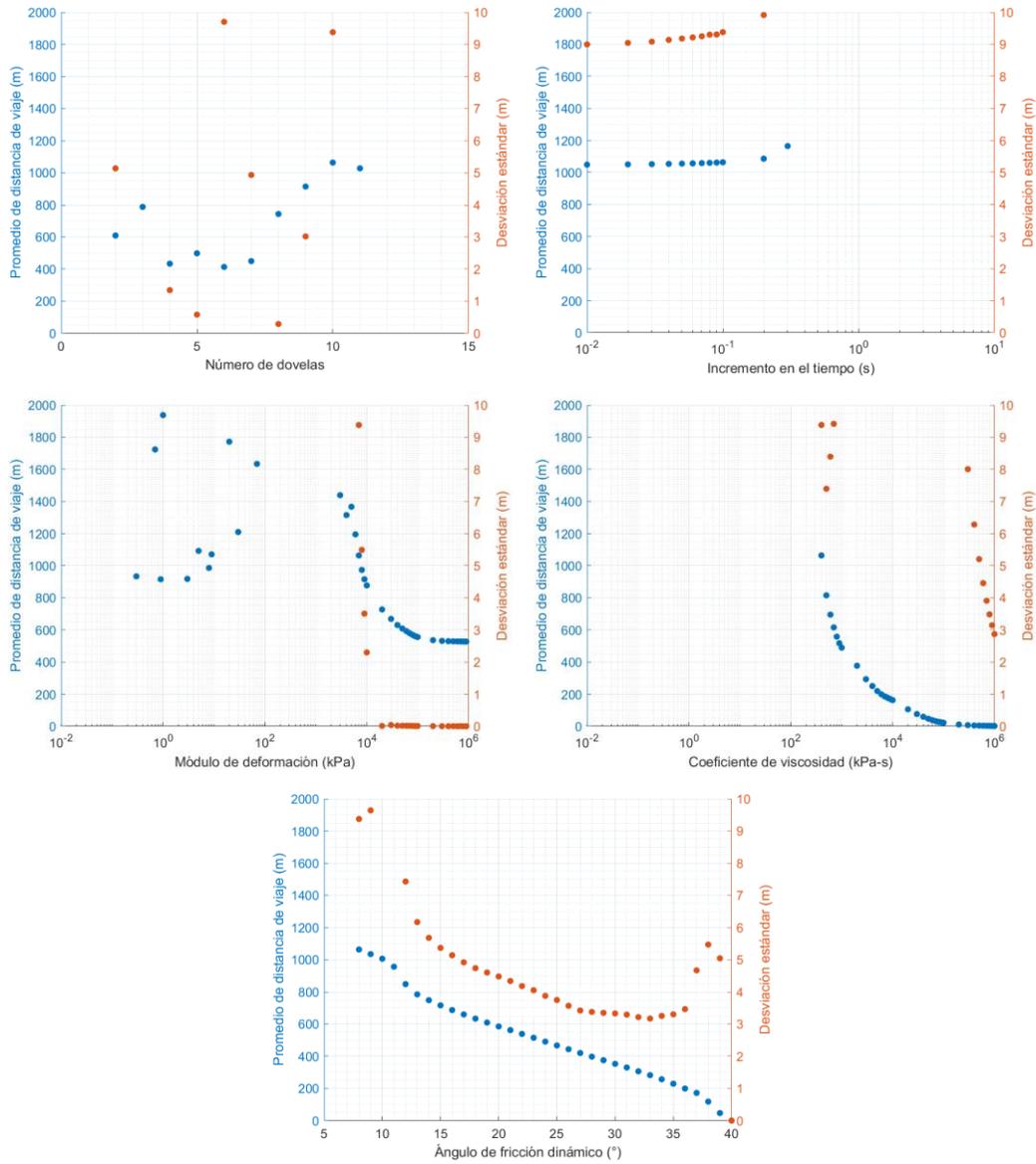


Figura 5.2 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Sale Mountain

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

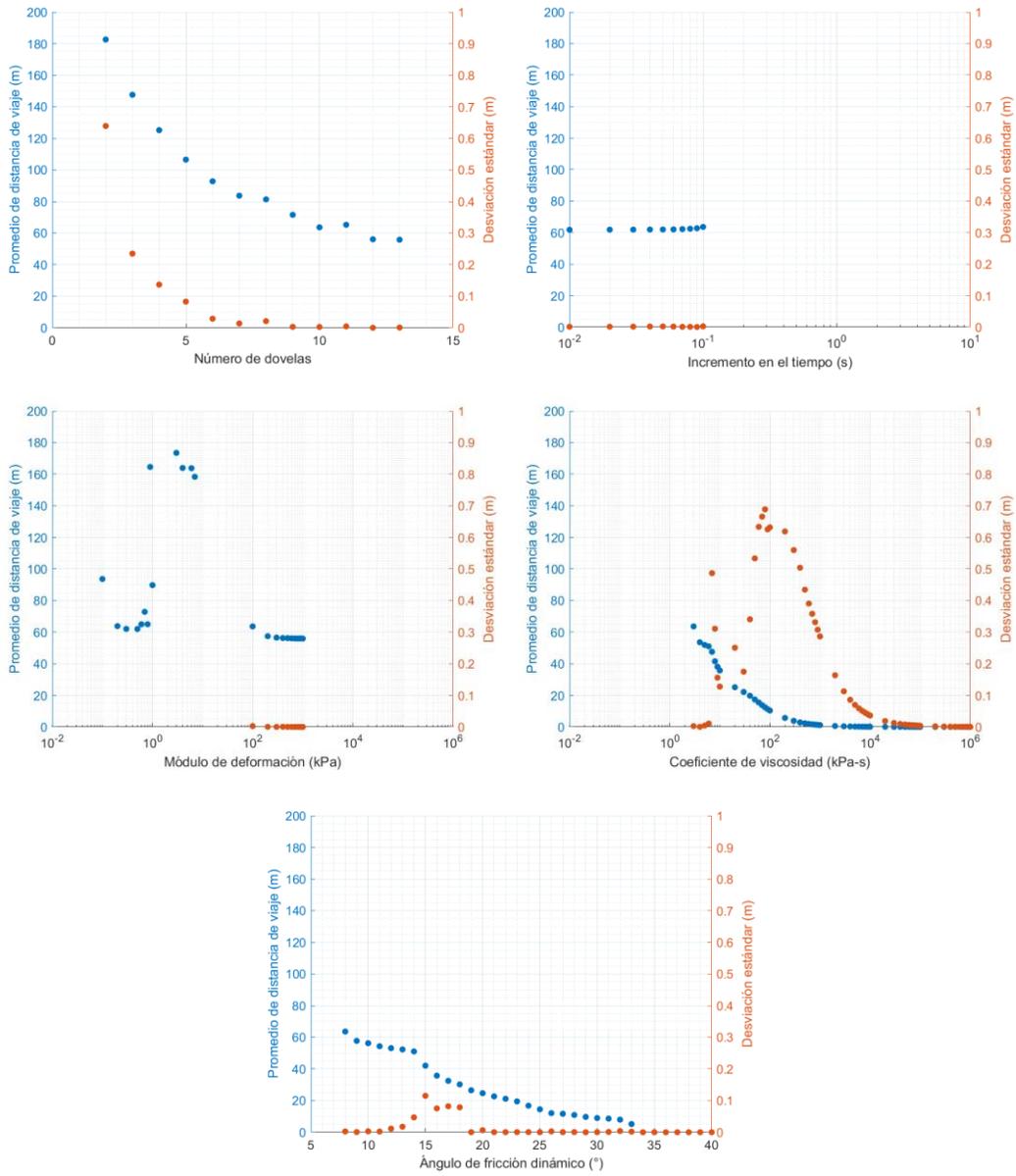


Figura 5.3 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento Hiegaesi

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

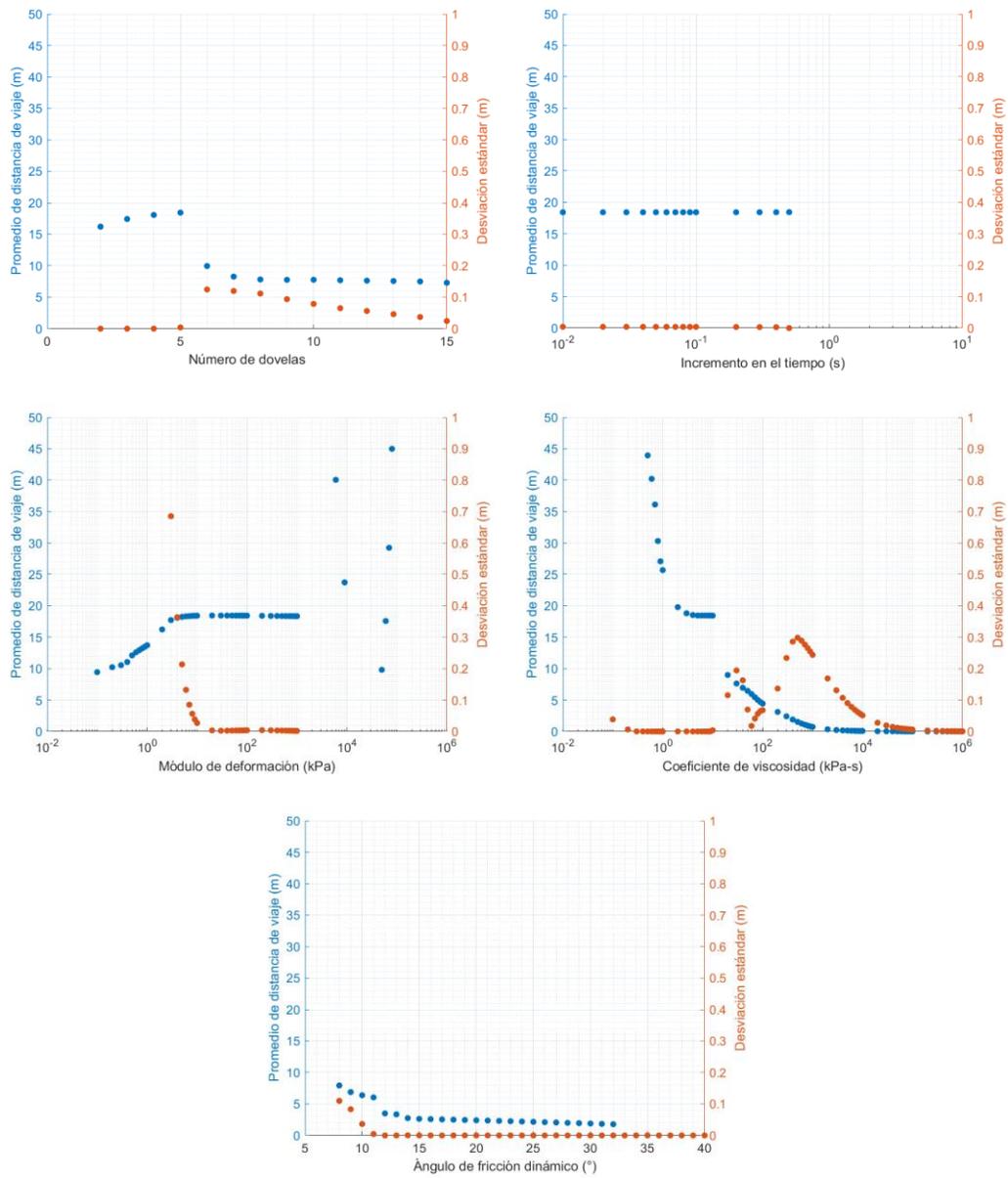


Figura 5.4 Análisis de sensibilidad para el deslizamiento ejemplo 1

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

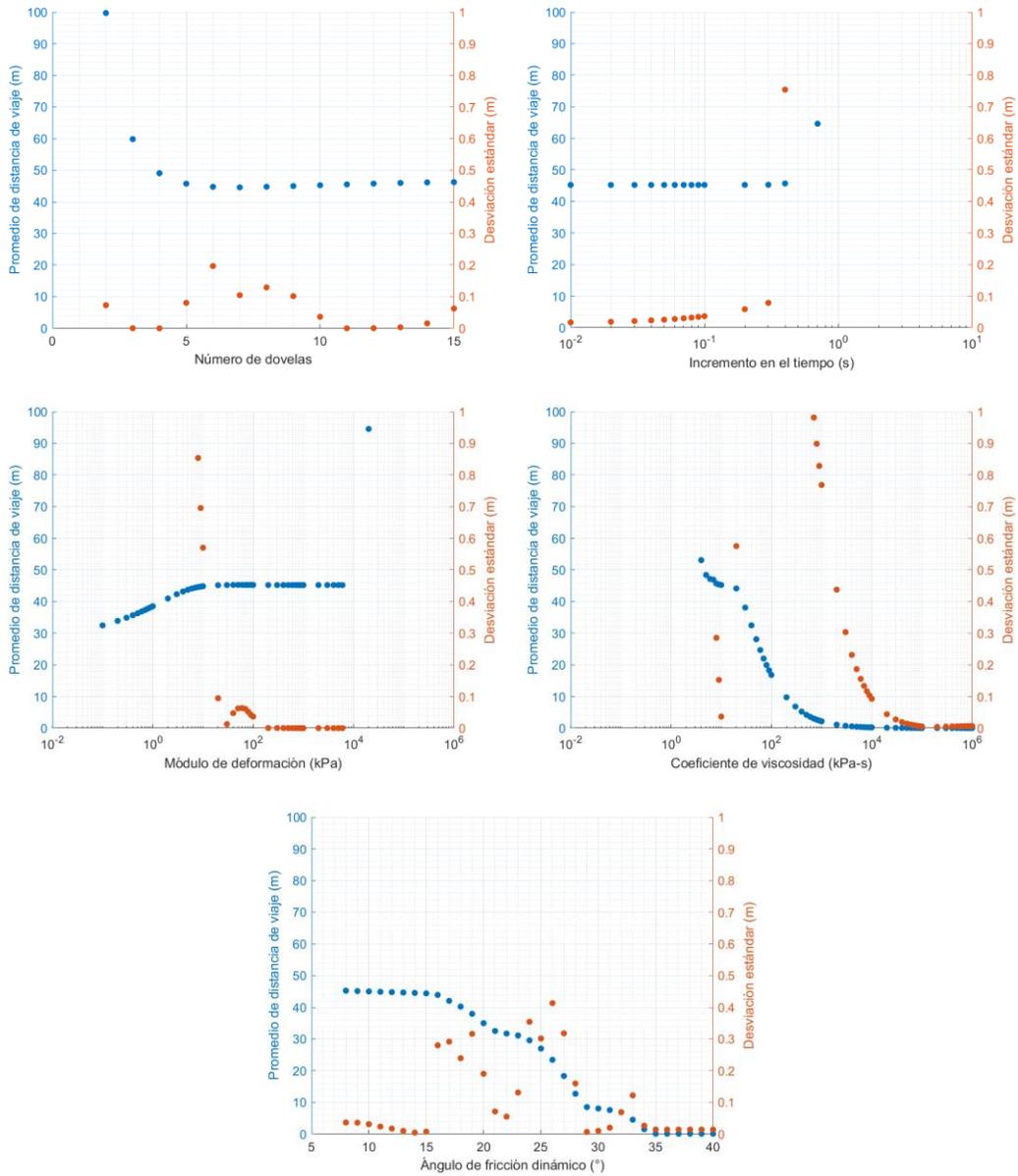


Figura 5.5 Análisis de sensibilidad ejemplo 2

Igualmente, como se presentó en el bloque deslizante en el talud infinito, se presenta de la Figura 5.6 a la Figura 5.15 la relación entre los parámetros módulo de deformación y coeficiente de viscosidad, e incremento de tiempo y número de dovelas para cada uno de los casos aplicados.

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

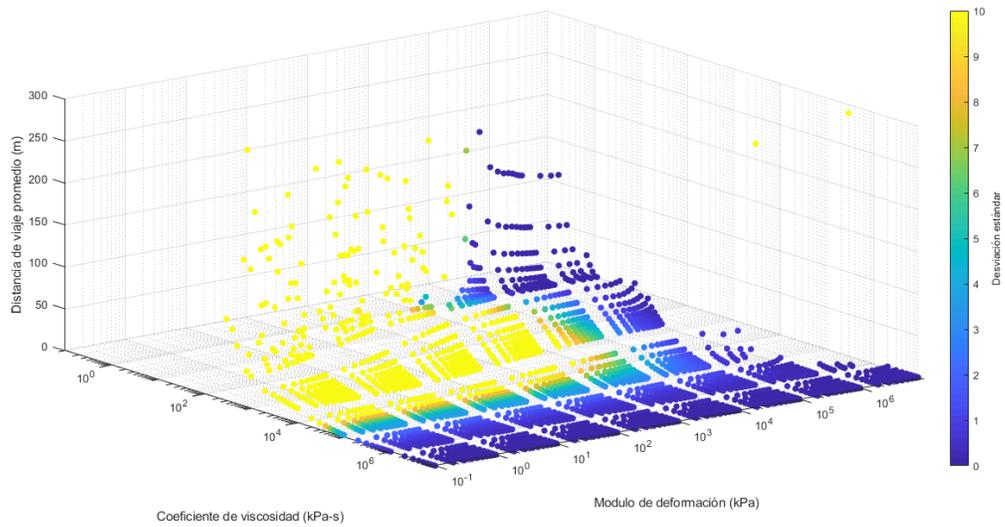


Figura 5.6 Análisis de sensibilidad Tianshui E vs  $\mu$

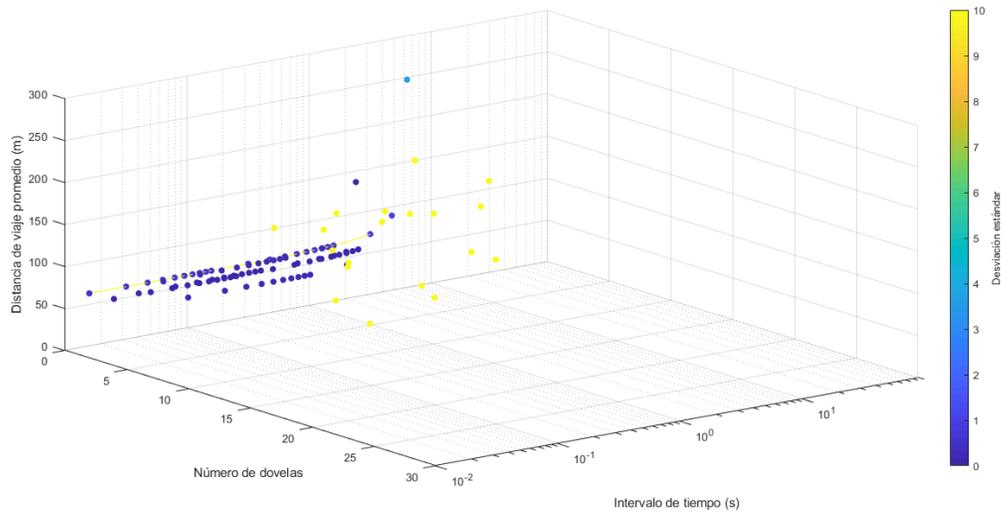


Figura 5.7 Análisis de sensibilidad Tianshui Dovelas vs incremento de tiempo

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

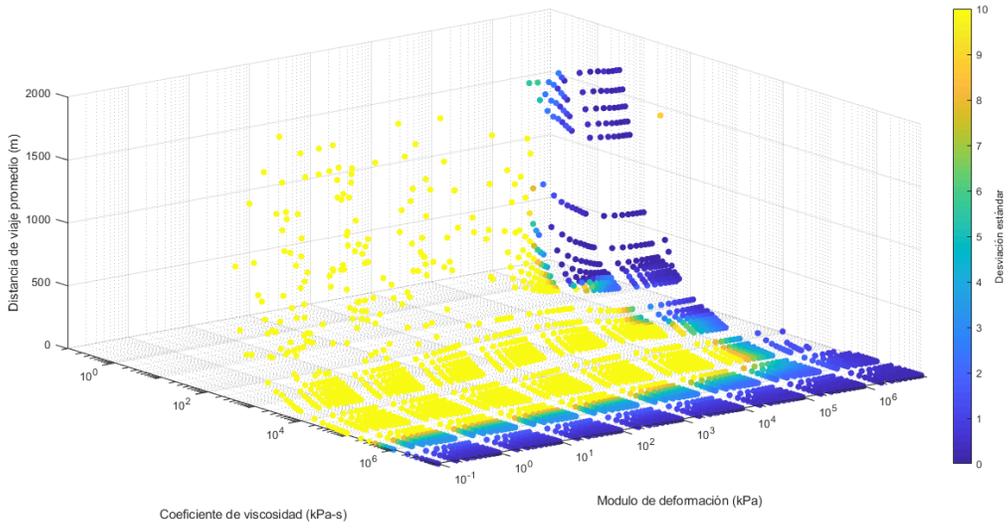


Figura 5.8 Análisis de sensibilidad Sale Mountain E vs  $\mu$

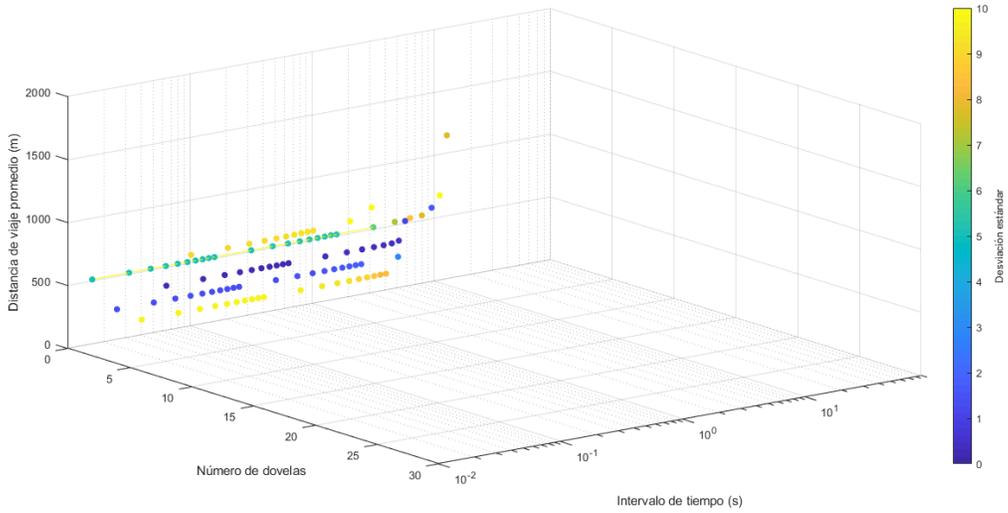


Figura 5.9 Análisis de sensibilidad Sale Mountain No Dovelas vs incremento de tiempo

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

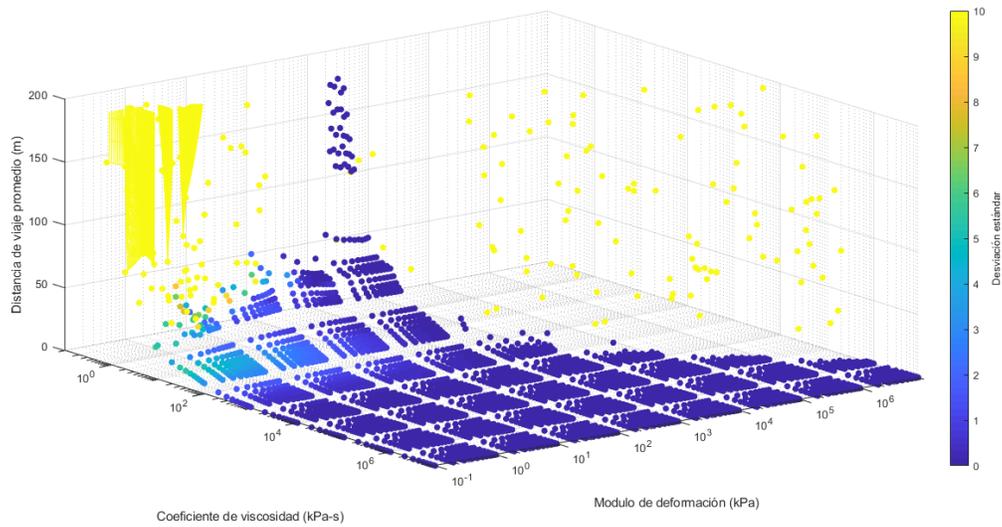


Figura 5.10 Análisis de sensibilidad Hiegesi E vs  $\mu$

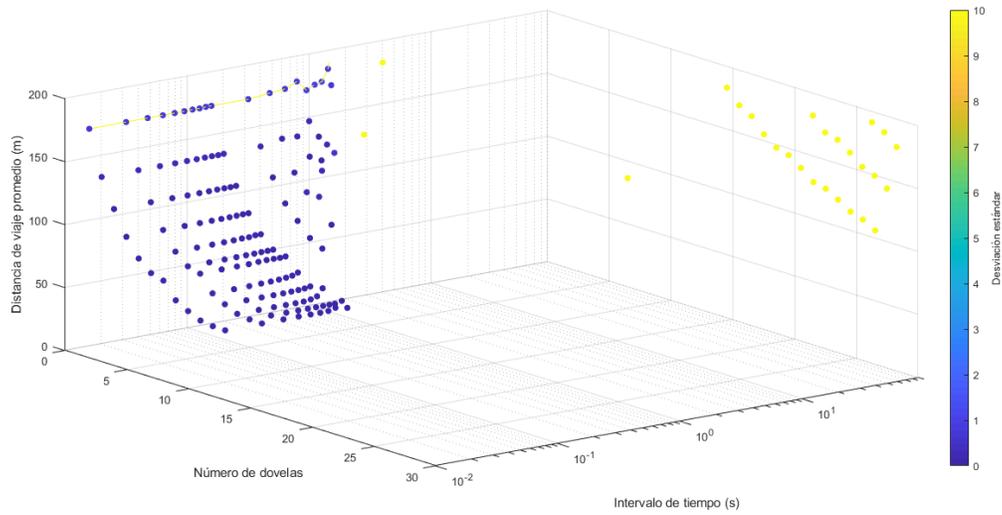


Figura 5.11 Análisis de sensibilidad Hiegesi No Dovelas vs incremento de tiempo

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

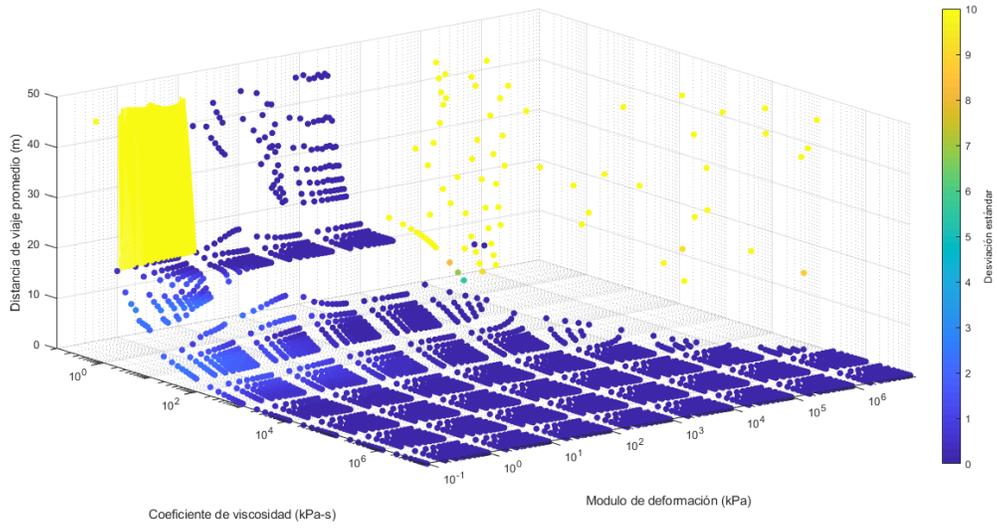


Figura 5.12 Análisis de sensibilidad Ejemplo 1 –  $E$  vs  $\mu$

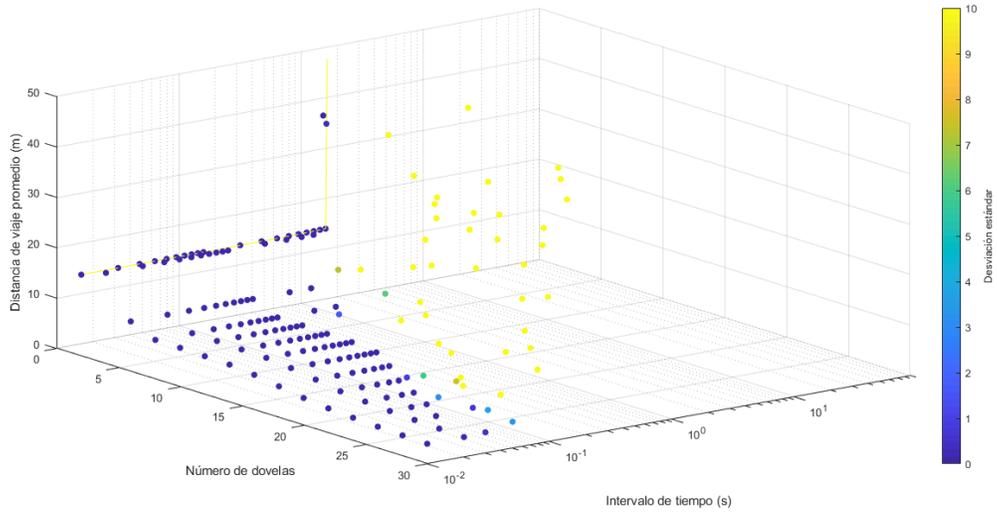


Figura 5.13 Análisis de sensibilidad Ejemplo 1 – No Dovelas vs incremento de tiempo

Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.

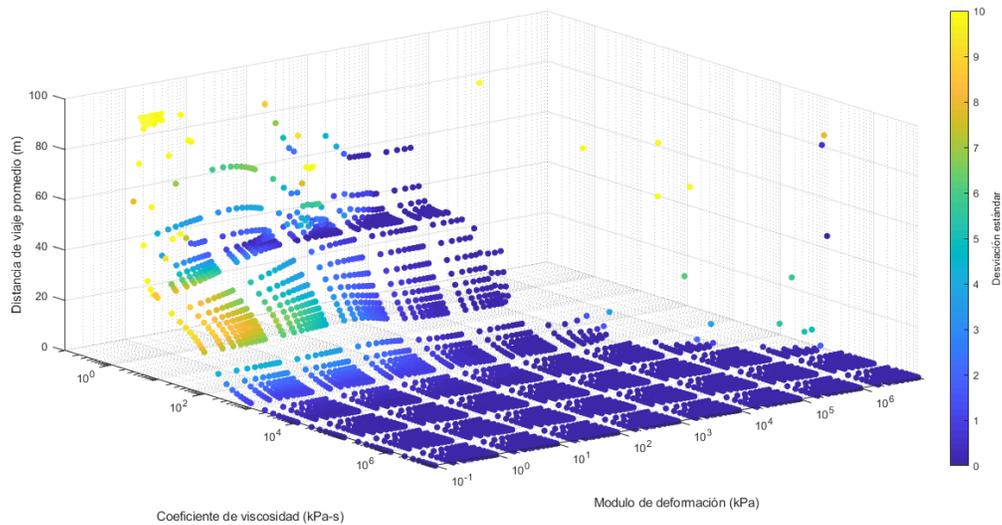


Figura 5.14 Análisis de sensibilidad Ejemplo 2 – E vs  $\mu$

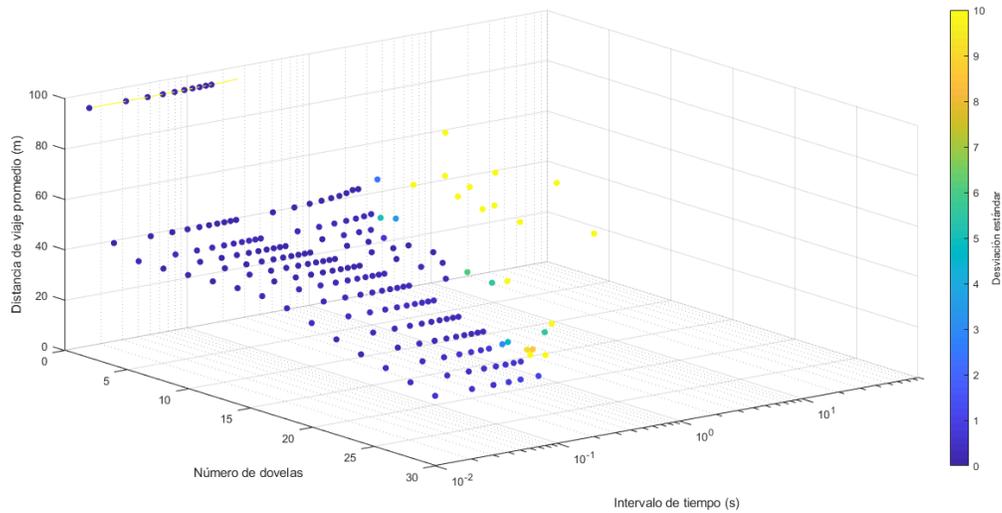


Figura 5.15 Análisis de sensibilidad Ejemplo 2 – No Dovelas vs incremento de tiempo

Una vez obtenidas las gráficas, es posible observar que la estabilidad del modelo está directamente relacionada con el coeficiente de viscosidad y el módulo de deformación con el cual se desarrolle el problema; y esto igualmente se relaciona con la magnitud del deslizamiento, ya sea área o volumen deslizado. En la Tabla 5.1 se organizaron dichos datos, con el fin de entender la influencia de estos parámetros. Como se puede observar, Sale Mountain y Tianshui – los

deslizamientos de mayor volumen deslizado – necesitan valores de módulo de deformación y coeficiente de viscosidad mayores a 1,000 kPa y 10 kPa-s respectivamente; mientras que, para los ejemplos planteados, dichos valores son de menor orden de magnitud (10 kPa y 1 kPa-s respectivamente).

En la Tabla 5.2 se presentan los rangos de número de dovelas e intervalo del tiempo, en el cual los resultados fueron considerados como válidos. Se observa que a pesar de que la máxima discretización del tiempo fue de 0.01s para los cinco casos aplicados, se obtuvo diferente discretización del espacio. Por lo anterior, se concluye que la irregularidad de la masa deslizada influye en la discretización del espacio. El caso del ejemplo 1, el cual al discretizarlo presenta un área similar en cada dovela, se puede discretizar hasta en 26 dovelas; sin embargo, el caso de los deslizamientos de gran magnitud y con irregularidades en la superficie (Sale Mountain y Tianshui), se pudo discretizar en 11 dovelas máximo debido a la diferencia en las dimensiones que tienen las dovelas entre sí.

*Tabla 5.1 Resultados análisis de sensibilidad módulo de deformación – coeficiente de viscosidad*

EJEMPLO	NÚMERO DE DOVELAS	DISTANCIA DE VIAJE	VELOCIDAD	VOLUMEN DESLIZADO	MODULO DE DEFORMACIÓN		COEFICIENTE VISCOSIDAD	
		(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /m)	(kPa)	(kPa)	(kPa-s)	(kPa-s)
Sale Mountain	10	1,020	11	45,395	1.E+04	1.E+06	1.E+01	1.E+03
Tianshui	10	95	3	12,463	1.E+03	1.E+05	1.E+01	1.E+03
Hiegaesi	10	69	1	1,200	1.E+02	1.E+03	1.E-01	1.E+06
Ejemplo 2	10	43	1	150	1.E+02	1.E+04	1.E+00	1.E+02
Ejemplo 1	5	19	0	10	1.E+01	1.E+03	1.E+00	1.E+02

*Tabla 5.2 Resultados análisis de sensibilidad número de dovelas – intervalo de tiempo*

EJEMPLO	VELOCIDAD	VOLUMEN DESLIZADO	NÚMERO DE DOVELAS	INCREMENTO DE TIEMPO
	(m/s)	(m <sup>3</sup> /m)	ACEPTABLE	(s)
Sale Mountain	11	45,395	2	8.0
			11	1.E-02
Tianshui	3	12,463	2	5.0
			10	1.E-02
Hiegaesi	1	1,200	2	0.1
			13	1.E-02
Ejemplo 2	1	150	2	1.0
			14	2.E-02
Ejemplo 1	0	10	2	1.0
			26	1.E-02

Los anteriores resultados podrán ser tomados como referencia para la selección de parámetros en el caso que se desee aplicar la metodología propuesta a un deslizamiento similar a alguno de los modelados en este trabajo de grado.

## **6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se discuten las suposiciones y limitaciones de la metodología. Específicamente, se tratan las limitaciones del modelo propuesto para calcular las variables cinemáticas, junto a la determinación de parámetros y su aplicabilidad en los casos ejemplificados.

Para iniciar es de gran importancia resaltar que en la metodología propuesta se basa en la modificación del modelo de bloque deslízate propuesto por Miao et. al (2001). Este modelo modificado consiste básicamente en discretizar el talud en bloques (dovelas), que al iniciar su movimiento se considera como un sistema de bloques conectados por resortes y en cada uno de ellos actúa una fuerza resistente friccional y viscosa. Entre las suposiciones mencionadas, se encuentra que al ser bloques conectados por resortes estos no se separan entre sí y mantienen un volumen constante durante el trayecto. Estas suposiciones hacen que el modelo sea una simplificación respecto al alto grado de complejidad que pueden llegar a tener el movimiento de los deslizamientos, donde en realidad es cada partícula de suelo la que interactúa con su alrededor, gobernada incluso por fuerzas no gravitatorias (viscosas, eléctricas, etc) que conllevan al desplazamiento y rotación de cada una de estas.

Esta complejidad del movimiento respecto al planteamiento del modelo conlleva a que se presenten diferentes limitaciones (presentadas en el capítulo 3.2.5) que deben ser tenidas en cuenta al momento de aplicar la metodología. Una vez aplicada la metodología a casos reales, se presentan los siguientes comentarios respecto a las limitaciones enunciadas:

- A partir de los tres casos reales descritos, se evidencia que por el efecto topográfico tridimensional, la masa deslizada se puede separar y cambiar su dirección durante el movimiento. Sin embargo, al ser planteado como un problema de deformación plana, no es posible tener en cuenta estos efectos en la metodología propuesta. En este caso se debe escoger una sección (bidimensional) que sea representativa de la topografía de la ladera.
- El modelo parte de una superficie de falla determinada. Para los casos aplicados, esta era conocida debido a que corresponden a deslizamientos que ya ocurrieron. Sin embargo, para predicción de deslizamientos, esta superficie de falla puede corresponder a las superficies de fallas críticas obtenidas mediante los métodos de equilibrio límite, tal como se realizó con el ejemplo 2.
- El planteamiento de un sistema de bloques conectados por resortes conlleva a que la masa deslizada mantenga su integridad durante el trayecto, es decir, que los bloques no se separan entre sí. Aunque para los casos en los que se aplicó la metodología no se cuenta con la información topográfica de la masa deslizada durante su viaje, se esperaba en los resultados que una vez la masa alcanza una superficie horizontal se empiece a elongar y disminuir su espesor. Sin embargo, en los ejemplos Tianshui y Sale Mountain se observó que una vez la masa alcanza una superficie horizontal mantiene su forma mientras se sigue desplazando, lo cual puede no estar representando el mecanismo del movimiento.
- En los deslizamientos ocurre una acomodación de partículas durante el viaje de la masa deslizada, por lo cual el volumen varía. Este cambio podría ser tenido en cuenta mediante un factor de expansión que se aplique en el cálculo de las dimensiones de cada bloque en cada intervalo de tiempo, sin embargo, no se tiene certeza de los valores que pueda tener en cada intervalo de tiempo, por lo cual se consideró un factor de 1.0 (es decir, volumen constante).

Por otro lado, se encuentra el problema de inestabilidad numérica que se da por obtener la solución mediante métodos de aproximación, como es el caso de MDF. Se demostró que para el modelo simplificado planteado en el capítulo 3.3.2, se puede obtener una expresión implícita que garantice la estabilidad numérica del modelo, y por tanto, su convergencia. Esta expresión se encuentra en función del módulo de deformación, coeficiente de viscosidad, masa de cada dovela e intervalo de tiempo. Sin embargo, dada la complejidad de la ecuación de movimiento desarrollada para esta metodología, no fue posible obtener una expresión que garantice la estabilidad numérica, empero, se conoce que esta depende de los parámetros mencionados previamente.

A pesar que en los casos en los que se aplicó la metodología, se logró obtener resultados precisos, se evidenció a partir del análisis de sensibilidad realizado que en cada caso solo se tiene estabilidad numérica bajo ciertos rangos de parámetros. Además, se observó que existe inestabilidad numérica en ciertas dovelas, lo cual es reflejado en el comportamiento vibratorio en los valores obtenidos de velocidad y aceleración.

Respecto a la determinación de parámetros, se logró establecer por medio de los análisis de sensibilidad realizados la influencia que tiene cada uno de ellos en los resultados. A continuación, se discute brevemente cada uno de ellos:

- **Módulo de deformación:** Tal como lo plantea Miao et. al (2001) y Mora (2011), corresponde al módulo de elasticidad que se puede obtener en muestras ensayos a compresión. Sin embargo, a partir de los análisis realizados en la aplicabilidad de la metodología, se observó que los valores retrocalculados para los tres casos en los que se aplicó la metodología no corresponden a valores típicos de geomateriales. Además, en el análisis de sensibilidad se observa que este parámetro no influye significativamente en los resultados, pero si lo hace en la estabilidad numérica. Lo anterior permite afirmar que este parámetro corresponde más a un parámetro de ajuste numérico que a un parámetro físico del material.

- **Coeficiente de viscosidad:** Como se ha discutido previamente, es el parámetro que más influye en el resultado de distancia de viaje, y aun así, es el parámetro que puede llegar a variar en ordenes de magnitud según como se obtenga en laboratorio. Por lo anterior, se recomienda usar valores de referencia, de deslizamientos similares, que se hayan obtenido mediante retro calculo; y así mismo tener en cuenta la fuerte sensibilidad que puede tener la variabilidad de este parámetro.
- **Angulo de fricción dinámico:** Según los valores establecidos para cada uno de los casos en los que se aplicó la metodología, se observa que pueden corresponder a los ángulos de fricción residuales que se obtuvieron a partir de ensayos convencionales.
- **Numero de dovelas:** Tanto en el modelo del bloque deslizante, como en los casos ejemplificados, se observa que la discretización del espacio afecta la estabilidad del modelo. Por esta razón, la mayoría de los casos ejemplificados se realizó con un numero de dovelas menor a 10, ya que en los casos que se intentó discretizar más el espacio (mayor número de dovelas) se generaba inestabilidad numérica en el modelo. Lo anterior, puede ser considerada como una limitación del modelo, ya que para los casos de grandes deslizamientos (i.e. Sale Mountain) puede que no sea representativo discretizar el ancho del deslizamiento en pocas tajadas.
- **Intervalo de tiempo:** Es un parámetro que influye únicamente en la estabilidad numérica del modelo, donde a mayor discretización (es decir, menor sea su valor) se puede discretizar más el espacio. Sin embargo, el hecho de discretizar el tiempo conlleva a un alto costo computacional, razón por la cual los análisis se realizaron para intervalos de tiempo mayores o iguales a 0.01 segundos.

Por último, aunque por medio de los ejemplos supuestos y los tres casos de deslizamientos ocurridos, se logró verificar que con lo propuesto en este trabajo de grado es factible representar el comportamiento cinemático de deslizamientos rápidos en suelos, se resalta que estos resultados se alcanzaron retro calculando

los parámetros, y que estos no corresponden a valores típicos obtenidos en una caracterización geotécnica. Así que, para implementar el modelo propuesto y desarrollado en este trabajo de grado en una metodología, es necesario que previamente se esclarezcan los problemas de estabilidad numérica del modelo, así como los métodos para la determinación de sus parámetros.

## **7. CONCLUSIONES**

En el presente trabajo de grado se propuso un modelo en el que a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite, fuera factible calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelo, por medio de un sistema de bloques conectados por resortes en los que actúan fuerzas resistentes friccionales y viscosas.

Sin embargo, este modelo propuesto presenta fuertes limitaciones (discutidas en el capítulo 6), predominantemente numéricas, que conllevó a que no fuera viable desarrollar una metodología que permita calcular las variables cinemáticas de los deslizamientos en suelos.

A lo largo de este documento, se presenta detalladamente el planteamiento y desarrollo del modelo propuesto. Para poder implementar este modelo en el desarrollo de una metodología, es necesario que primero se esclarezcan las limitaciones discutidas previamente.

Del desarrollo realizado para este modelo, se concluye lo siguiente:

- La ecuación de movimiento del modelo, la cual corresponde a una ecuación diferencial lineal de segundo orden, fue planteada y desarrollada a partir de la segunda ley de Newton. En esta, se tuvo en cuenta las fuerzas resultantes del método de equilibrio límite UTM, y en el caso en que el método indicase inestabilidad de la ladera, se inicia el movimiento de la masa deslizada, representada mediante bloques conectados por resortes

- Los tipos de movimiento que puede presentar el sistema de bloques planteado (subamortiguado o sobreamortiguado) fueron analizados numéricamente, estableciendo que el movimiento característico para representar la naturaleza física del deslizamiento corresponde al sobreamortiguado, en el cual cada bloque tiende a llegar a cierta posición sin vibrar durante su recorrido. Para que este movimiento ocurra numéricamente, se comprobó a partir de la solución analítica de un modelo simplificado del sistema planteado, que se debe cumplir una relación numérica, donde la constante de amortiguamiento debe ser mayor a la frecuencia propia del oscilador. Extrapolando esta afirmación al modelo que representa la cinemática del deslizamiento, se concluye que la masa de cada dovela, la rigidez del resorte y el coeficiente de viscosidad deben presentar cierta relación; para representar de manera adecuada el movimiento sobreamortiguado.
- La ecuación de movimiento fue solucionada por el método de diferencias finitas. Se comprobó que la aproximación por derecha a la primera derivada es la que representa de manera más adecuada la solución analítica del modelo simplificado para un movimiento sobreamortiguado. Reemplazando las aproximaciones del MDF a los diferenciales de la ecuación de movimiento, se desarrolló el procedimiento algebraico obteniendo una ecuación explícita para hallar la posición de cada bloque en el tiempo.
- Debido a que la solución de la ecuación diferencial requiere de condiciones iniciales, fue necesario dividir el movimiento en dos etapas. La primera consiste en evaluar por medio de un método de equilibrio límite -que discretice el talud en dovelas y considere fuerzas actuantes entre ellas- la estabilidad del talud. Con las fuerzas entre dovelas resultantes, se planteó el procedimiento para calcular el primer desplazamiento de la masa deslizada. Las coordenadas iniciales del talud y las del primer movimiento, corresponden a las condiciones iniciales para dar solución a la ecuación de movimiento planteada (segunda etapa).

- Fue necesario realizar un algoritmo en el software Matlab®, debido a la complejidad de la ecuación por la cantidad de parámetros que intervienen en la solución. Este algoritmo se anexa y queda a disposición para futuras investigaciones en el tema.
- La aplicabilidad del modelo fue evaluada con tres deslizamientos extremadamente rápidos con volumen de masa deslizada entre 1,000 y 45,000 m<sup>3</sup>/m, y velocidades promedio entre 1 y 11 m/s; en donde los resultados obtenidos por medio de retro cálculo de distancia de viaje y velocidad promedio, evidencian que el modelo planteado es capaz de simular el proceso de viaje de deslizamientos rápidos a extremadamente rápidos. Sin embargo, se resalta que no se logró relacionar los valores de los parámetros módulo de deformación y coeficiente de viscosidad obtenidos (en los casos reales) con valores típicos obtenidos de la caracterización geotécnica, por lo cual se recomienda investigar detalladamente si estos se pueden llegar a relacionarse o correlacionarse con parámetros físicos de los geomateriales
- Además, se supusieron dos ejemplos con características geométricas y mecánicas diferentes a los simulados. Aunque los parámetros fueron supuestos, los resultados plausibles de dichos ejemplos verifican que el modelo puede ser aplicado a diferentes configuraciones de deslizamientos rápidos en suelos, y que la masa deslizada es capaz de viajar por superficies irregulares como suele ocurrir en la mayoría deslizamientos.
- Para cada deslizamiento modelado se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros establecidos en la ecuación de movimiento, en los que se demostró que la sensibilidad es afectada por el volumen de masa deslizada y por la geometría de la superficie que recorre la masa deslizada. Con el análisis realizado, se estableció para cada modelo el rango de parámetros bajo los cuales la solución es estable y/o representa de manera adecuada la naturaleza física del deslizamiento.
- Con los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, se estableció que el parámetro módulo de deformación no tiene influencia en los resultados de

distancia de viaje, pero si en la estabilidad numérica del modelo. Por tanto, se estableció que este parámetro corresponde más a un valor de ajuste numérico, más que a un parámetro físico como lo proponen Miao et. al (2001).

- El coeficiente de viscosidad es el parámetro que más influye en los resultados de distancia de viaje; y, además, este tiene una gran variabilidad en su magnitud, según la forma en cómo se obtenga. Por lo anterior, para aplicar la metodología en predicción, es necesario seguir investigando acerca de este parámetro, así como de la estabilidad numérica del modelo
- El modelo desarrollado en este documento, permite modelar el comportamiento cinemático de los deslizamientos rápidos en suelos, logrando obtener desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la masa deslizada. Sin embargo, su aplicabilidad se encuentra limitada por la obtención de los parámetros y la fuerte inestabilidad numérica. Aunque se verificó su aplicabilidad con diferentes casos, no se considera factible que a la fecha pueda ser aplicado en predicción de distancias de viaje de deslizamientos, y por tanto, no pueda ser aplicado en temas de vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, hasta el momento en que se logren desarrollar a cabalidad las diferentes limitaciones discutidas previamente y se desarrolle el trabajo futuro.

## **8. TRABAJO FUTURO**

En el análisis de sensibilidad realizado a los parámetros del modelo en condición dinámica, se evidenció que existe un amplio rango de parámetros en los cuales la solución numérica es estable, y que además los resultados obtenidos en dicho rango influyen fuertemente en los resultados obtenidos.

Dado lo anterior, surge la necesidad de investigar exhaustivamente los parámetros establecidos en el modelo para la condición dinámica del deslizamiento. Se planteó que la rigidez de los resortes está relacionada con el módulo de deformación, sin embargo, se discutió que este parámetro puede corresponder más a un valor de

ajuste numérico que a un parámetro físico del suelo como el módulo de elasticidad; empero, esta afirmación necesita más soporte que se puede obtener al investigar numéricamente el modelo propuesto. En cuanto al coeficiente de viscosidad se encontró en la literatura técnica (van Asch, Van Beek, & T.A., 2007) que este ha sido determinado para deslizamientos lentos mediante ensayos como el anillo de corte, dónde aun así, los resultados obtenidos difieren de 10 a 100 veces respecto a los valores obtenido mediante retro cálculo. Para deslizamientos rápidos no se registró evidencia en la literatura técnica de magnitudes de viscosidad establecidas mediante ensayos, por lo cual se debe promover la investigación en esta área.

En caso de aplicar esta metodología (y desconocer los valores de los parámetros en condición dinámica) para la predicción de distancia de viaje y velocidades en deslizamientos rápidos, será necesario contar con parámetros, obtenidos mediante retro cálculo de deslizamientos, en lo posible con características similares de volumen deslizado, topografía y características mecánicas y reológicas del material involucrado en el deslizamiento.

En orden de tener parámetros obtenidos de casos de referencia, se recomienda modelar deslizamientos ocurridos, de los cuales se tenga información acerca de las características cinemáticas del deslizamiento. Cuando se haya simulado una cantidad significativa de deslizamientos, se podrán establecer relaciones entre características del deslizamiento con los parámetros a establecer para el módulo dinámico.

En el análisis de sensibilidad se evidenció que el modelo es capaz de obtener velocidades de deslizamientos muy bajas (i. e. m/día) bajo cierta combinación de parámetros. Por lo anterior, se recomienda explorar la aplicabilidad del modelo en deslizamientos lentos, y verificar si una vez calculados los parámetros mediante retro cálculo, se pueda predecir el movimiento de los deslizamientos lentos.

El algoritmo desarrollado tiene acoplado el modelo de equilibrio limite Unbalanced Thrust Method -del cual se considera posible optimizar el algoritmo-. Se recomienda

acoplar más modelos de equilibrio límite (i.e. Morgenstern-Price) que permitan obtener las fuerzas entre dovelas; así como acoplar algoritmos de optimización que permitan obtener la superficie de falla crítica de un deslizamiento.

En el desarrollo de esta metodología, se supuso una interacción elástica entre las dovelas considerando que la masa deslizada mantiene su integridad durante el movimiento. Sin embargo, existen diferentes modelos constitutivos que pueden representar de manera más adecuada el comportamiento del suelo, como el modelo viscoelástico. Este modelo conlleva a la solución de sistemas de ecuaciones no lineales, el cual debido a su mayor complejidad podría llevar o no a la inestabilidad del modelo al solucionarlo por MDF; se requiere investigar.

El modelo desarrollado fue planteado como un problema de deformación plana. Sin embargo, el registro de deslizamientos evidencia que el efecto topográfico (tridimensional) influye en el comportamiento cinemático del deslizamiento. Se plantea que el modelo desarrollado se puede llevar a un modelo tridimensional al suponer más grados de libertad en cada dovela y así mismo la interacción en todas las caras en cada bloque.

## **9. BIBLIOGRAFIA**

Angeli, M.-G., Gasparetto, P., Menotti, R. M., Pasuto, A., & Silvano, S. (1996). A visco-plastic model for slope analysis applied to a mudslide in Cortina d'Ampezzo, Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.*, 233-240.

Banco Mundial: Colombia. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá: GFDRR.

- Barnes, H. H. (1989). *An Introduction to Rheology*. Elsevier.
- Bishop, A. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique, Great Britain*, 7-17.
- BSI (British Standards Institution). (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*. Edingburgh: British Standard.
- Chapra, S., & Canale, R. (2014). *Numerical Methods for Engineers*. New York: McGraw-Hill .
- Chen, H., & Lee, C. (2000). Numerical simulation of debris flows. *Canadian Geotechnical Journal v. 37* , 146-160.
- Chen, H., & Lee, C. F. (2002). Runout analysis of slurry flows with Bingham model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1032-1042.
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A., & Gili, J. A. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, 83-96.
- Crosta, G., Imposimato, S., & Roddeman, D. (2003). Numerical modelling of large landslides stability and runout. *Natural Hazards and Earth System Science*, 523-538.
- Cruden , D., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. *Special report-National research council, Transportation research board*, 36-75.
- Cuomo, S. (2014). New advances and challenges for numerical modeling of landslides of the flow type. *Procedia Earth and Planetary Science* 9, 91-100.
- Das, B. (2014). *Advanced Soil Mechanics*. New York: CRC Press.
- DESINVENTAR. (14 de 04 de 2019). *DESINVENTAR Online*. Obtenido de Inventory system of the effects of disasters: <https://online.desinventar.org/>

El Universal. (3 de Agosto de 2017). Obtenido de Avalancha en El Cerro del sur de Montería: <http://www.eluniversal.com.co/regional/avalancha-en-el-cerro-del-sur-de-monteria-259234>

El Universal. (21 de Enero de 2018). Obtenido de Al menos 10 muertos en deslizamiento de tierra en la vía Pasto – Tumaco: <http://www.eluniversal.com.co/colombia/al-menos-10-muertos-en-deslizamiento-de-tierra-en-la-pasto-tumaco-270520>

Folque, J. B. (1961). *Reologia de solos nao saturados*. Lisboa.

Glastonbury, J., Fell, R., & Mostyn, G. (2002). *Report On The Post-Collapse Behaviour Of Debris From Rock Slope Failures*. Sydney, Australia: The University of New South Wales.

Hervás, J. A. (25 de Enero de 2018). *Matemática*. Obtenido de [https://www.matematicasypoesia.com.es/metodos/melweb08\\_Brookfield.htm](https://www.matematicasypoesia.com.es/metodos/melweb08_Brookfield.htm)

Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 610-623.

Hungr, O. (2009). Numerical modelling of the motion of rapid flow like landslides for hazard assesment.

Hungr, O. (2009). Numerical modelling of the motion of rapid flow-like landslides for hazard assesment. *Geotechnical engineering*, 281-287.

Hungr, O., & McDougall, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. *Computer Geosciences*, 978-992.

Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *International Conference on Landslide Risk Management* (págs. 99-128). Vancouver: Balkema.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*.
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal* V. 40, 1123-1141.
- Keaton, J., Wartman, J., Anderson, S., Benoit, J., deLaChapelle, J., Gilbert, R., & Montgomery. (2014). *The 22 March 2014 Oso Landslide, Snohomish County, Washington*. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association.
- Laigle, D., & Coussot, P. (1997). Numerical Modeling of Mudflows. *Journal of Hydraulic Engineer*, 617-623.
- Leroueil, S., Hungr, O., & Picarelli, L. (2013). The Varnes Classification of landslides types, an update. *Landslides, Journal of the International Consortium on Landslides*, 249-278.
- LeVeque, R. J. (2007). *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*. Seattle, Washington: University of Washington.
- Liao, X., Xu, J., & Zheng, J. (1997). Dynamic analysis and movement simulation of high-speed and long-distance landslides. *In Proceedings of Landslide. Vol. 12*, 45-49.
- Liu, S., Shao, L., & Li, H. (2014). Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods. *Computers and Geotechnics*, 291-298.
- McDougall, S. (2017). 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis - current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, V. 54, 605-619.
- Miao, T., Liu, Z., Niu, Y., & Ma, C. (2001). A sliding block model for the runout prediction of high speed landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 217-222.

- Miao, T., Liu, Z., Niu, Y., & Ma, C. (2001). A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 217-226.
- Mora Molano, C. (2011). *Contención de taludes en estado viscoplástico*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Moreno Montoya, R. H. (2016). *Cinética de taludes en suelos compresibles viscoplásticos*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Morgenstern, N., & Price, M. (1965). The analysis of stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 1965.
- O. Chao-Jun, W. Z., Si-Ming, H., Dong-Po, W., Shu, Z., Hui-Cong, A., Zhong-Wen, W., & Duo-Xiang, C. (2017). Numerical modeling and dynamic analysis of the 2017 Xinmo landslide in Maoxian County, China. *Engineering analysis with boundary elements*, 172-183.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology Vol. 40*, 927-930.
- Petterson, K. (1955). The early history of circular sliding surfaces. *Geotechnique*. 275 - 296.
- Revellino, P., Guadagno, F. M., & Hungr, O. (2008). Morphological methods and dynamic modelling in landslide hazard assessment of the Campania Apennine carbonate slope. *Landslides*, 59-70.
- Sassa, K. (2000). Mechanism of Flows in Granular Soils. ? *International conference on geotechnical and geological engineering*, (págs. 1671-1702). Melbourne.
- Scheideger, A. (1973). On the prediction of the research and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 231-236.

- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá: SGC.
- SGC. (2017). *GUIA METODOLOGICA PARA LA ZONIFICACION DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:25.000*. Bogota D.C.: Servicio Geologico Colombiano.
- Sonora, U. d. (2006). Recimentación del Claustro del Exconvento de Santa Rosa de Viterbo.
- Stephen, G., & Jerome, V. (2002). *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms*. Geological Society of America.
- Universidad Politecnica de Cataluna. (4 de Abril de 2018). *UPCommons*. Obtenido de Método del equilibrio límite: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- van Asch, T., Van Beek, L., & T.A., B. (2007). Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering Geology*, 46-55.
- Wang, F., Sassa, K., & Wang, G. (2002). Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan. *Engineering Geology*, 169-185.
- Wang, W., Zhang, H., Zheng, L., Zhang, Y., Wug, Y., & Liu, S. (2016). A new approach for modeling landslide movement over 3D topography using 3D discontinuous deformation analysis. *Computers and Geotechnics*, 87-97.
- Wang, X. (2008). *Geotechnical Analysis of Flow Slides, Debris Flows, and Related Phenomena*. Alberta: University of Alberta.
- White, F. (2006). *Viscous Fluid Flow*. Singapur: McGram Hill.

- Yue, Z.-q. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distances under dense gas expanding power . *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 233-240.
- Zengeni, B. T. (2016). Bingham yield stress and bingham plastic viscosity of homogeneous non-newtonian slurries. *Cape Peninsula*.
- Zhu, D., Lee, Q., Qian, & Chen, G. (2005). A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method. *Canadian Geotechnical Journal*, 272-278.

*Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite.*

## **ANEXO A**

### **“LAAND-Slide Runout” – Algoritmo**

```
%-----En este archivo se deben escribir los datos de entrada,  
%correspondientes a la geometría del talud y de la superficie de falla, y  
%parámetros de las ecuaciones-----  
clc  
close all  
clear all  
global suptalud supfalla g phi co gamma miu k_res Eo dt numdovelas tmax dovela slip ✓  
tiempo damp dxo phi_s  
global pos M_Vel M_Acel F1 F2 F3 F4 Coordx deltax k_res M_A M_alpha M_altura M_base M_C  
global M_D M_dx M_hw M_k M_long M_miu M_supfalla M_suptalud M_W M_weight prom Vel Acel ✓  
Posicion Velocidad Pore gamma_w  
%% Ingresar los datos de entrada para el programa  
  
%% Matriz de superficie de terreno  
% suptalud debe contener en la primera columna las coordenadas en X y en la segunda las ✓  
coordenadas en el eje Y  
%NOTA: En las últimas filas se deben colocar coordenadas que permita extrapolar la ✓  
superficie del talud  
suptalud = [0,18.41214  
0.63241,18.55399  
0.94862,18.69584  
2.37154,18.32232  
2.52964,18.28082  
3.79447,17.7245  
3.95257,17.65496  
4.74308,17.30727  
5.37549,16.97303  
6.32411,16.47169  
6.95652,16.2496  
7.90514,15.91648  
8.37945,15.55766  
9.01186,15.07924  
10.11858,14.67424  
10.90909,14.38495  
11.3834,14.07119  
12.17391,13.54826  
13.12253,13.13103  
13.75494,12.85287  
14.54545,12.29489  
15.65217,12.0184  
15.96838,11.77418  
16.917,11.04152  
17.54941,10.80342  
18.02372,10.62484  
18.97233,10.25433  
19.44664,10.06908  
20.71146,9.46179  
21.18577,9.23405  
22.45059,8.56559  
22.7668,8.39847  
24.03162,7.4216
```

```
24.50593,5.8812
25.77075,5.46507
27.50988,5.47117
29.72332,5.19855
31.30435,4.78353
33.35968,4.37017
35.41502,3.95682
37.47036,3.54346
39.68379,3.13066
41.42292,2.85638
43.32016,2.44247
45.21739,2.16874
47.27273,2.03576
48.53755,1.61963
50.59289,0.78571
52.96443,0.37346
55.49407,0.24214
58.97233,0.03377
61.18577,0.00134
63.24111,0.04873
64.66403,0.0939
66.40316,0.04695
76.40316,0
76.5,0
77,0
];
```

% supfalla es la matriz de las coordenadas de la superficie de falla.

% Primera columna "X" y segunda "Y"

```
supfalla = [0,18.41214
0.63241,17.01249
0.94862,16.86066
2.37154,16.17746
2.52964,16.07988
3.79447,15.29927
3.95257,15.20169
4.74308,14.65929
5.37549,14.22537
6.32411,13.80813
6.95652,13.52998
7.90514,12.78564
8.37945,12.41347
9.01186,12.10982
10.11858,11.57844
10.90909,11.23075
11.3834,11.02213
12.17391,10.77001
13.12253,10.46747
13.75494,10.15816
14.54545,9.77153
15.65217,9.23023
15.96838,9.07558
```

```

16.917,8.65834
17.54941,8.38019
18.02372,8.24166
18.97233,7.96461
19.44664,7.73688
20.71146,7.12959
21.18577,6.97832
22.45059,6.57493
22.7668,6.4682
24.03162,6.04129
24.50593,5.8812
];

```

```

%slip surface es la función que se encarga de unir los vectores para determinar las
coordenadas de la superficie que debe recorrer la masa deslizada.
%Tener en cuenta que, para esta función, las coordenadas de X que se encuentren en
supfalla, se deben encontrar
%también en suptalud
slip = slip surface(suptalud,supfalla);
%----- PARÁMETROS A INGRESAR-----
g = 9.81; %aceleración de la gravedad (m/s2)
co = 0; %Valor de cohesión efectiva -Parámetro Mohr Coulomb- (kPa)
gamma = 16; %Peso unitario de la masa deslizada (kN/m3)
gamma_w=9.81 %Peso unitario del agua (kN/m3)
phi_static = 40 %Ángulo de fricción efectivo de la masa deslizada -Parámetro Mohr
Coulomb- (°)
phi_d = 8; %Ángulo de fricción en condición dinámica entre la masa deslizada y la
superficie recorrida (°)
miu = 2.5; %Coeficiente de viscosidad dinámico (kPa-s)
Eo=1000; %Módulo de deformación axial en condición dinámica (kPa)
Pore=.7 % Valor entre 1 y 0. Indica a que proporción de la altura de la dovela se
encuentra el N.F. Ej: 1.0 indica que el N.F se encuentra en la superficie, 0.5 el N.F se
encuentra en el punto medio entre la superficie del talud y superficie de falla.
dt=0.1; %Incremento de tiempo para el cálculo (s)
numdovelas=10; %Número de dovelas en los que se desea discretizar la masa deslizada
tmax = 40; %Tiempo (del problema) máximo para realizar el cálculo. (s)

%Convertir ángulos en radianes
phi=phi_d*pi/180;
phi_s=phi_static*pi/180; %Ángulo de fricción estático EN RADIANTES
k_res=Eo
%----Función para simular la cinemática del deslizamiento----
LAAND
dxfinal=Coordx(:,size(Coordx,2))-Coordx(:,1); %Calcula la distancia de viaje de cada
dovela
%Es necesario volver a llamar las funciones globales para las siguientes funciones
global Coordx M_A M_alpha M_altura M_base M_C M_D M_dx M_hw M_k M_long M_miu M_supfalla
M_suptalud M_W M_weight

%Funciones que grafican y/o calculan la posición, velocidad y aceleración en cada
incremento de tiempo, para cada dovela

```

```
%El vector dovela debe ser de 5 posiciones e indica el número de las dovelas que se desea graficar. ↵
```

```
dovela = [1,round(numdovelas/4),round(numdovelas/2),round(numdovelas*3/4),numdovelas]; % ↵  
Dovela para graficar posición en el tiempo;  
posdovela(dovela);  
cinetica;
```

```
%Función que crea archivo .gif de animación del deslizamiento
```

```
%%giff('Nombre_del_archivo.gif', intervalo de tiempo (s) en el que desea graficar la ↵  
superficie del talud)  
giff('Hiegasi.gif',1)
```

```
function s=slipsurface(suptalud,supfalla)
%Para esta función es necesario que las x que se encuentren en supfalla, estén en suptalud

slip(:,1)=union(suptalud(:,1),supfalla(:,1)); %Uniando las coordenadas x de ambos  ↙
vectores
slip(:,2)=0
for i=1:size(slip,1)
    i;
    for j=1:size(suptalud,1) %Llenar las coordenadas que corresponden a supfalla
        j;
        if slip(i,1)==suptalud(j,1)
            slip(i,2)=suptalud(j,2)
        end
    end
end
for j=1:size(supfalla,1) %Llenar coordenadas que corresponden a suptalud
    j;
    if slip(i,1)==supfalla(j,1)
        2
        slip(i,2)=supfalla(j,2)
    end
end
end
end

s=slip ;
end
```

```
function LAAND
%% HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE DISTANCIA DE VIAJE Y VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO

%% Lectura de datos
global suptalud supfalla g phi co gamma miu k_res Eo dt numdovelas tmax slip x F1 deltax
FOS stalud sfalla
global Coordx M_A M_alpha M_altura M_base M_C M_D M_dx M_hw M_k M_long M_miu M_supfalla
M_suptalud M_E M_weight Pore gamma_w
tic
Coordx=zeros(numdovelas,1); M_A=zeros(numdovelas,1); M_alpha=zeros(numdovelas,1);
M_altura=zeros(numdovelas,1); M_base=zeros(numdovelas,1); M_C=zeros(numdovelas,1);
M_D=zeros(numdovelas,1); M_dx=zeros(numdovelas,1); M_hw=zeros(numdovelas,1); M_k=zeros
(numdovelas,1); M_long=zeros(numdovelas,1); M_miu=zeros(numdovelas,1); M_supfalla=zeros
(numdovelas,1); M_suptalud=zeros(numdovelas,1); M_W=zeros(numdovelas,1); M_weight=zeros
(numdovelas,1); %Inicializa en ceros las matrices
%Discretizar x en número de dovelas
deltax=(supfalla(size(supfalla,1),1)-supfalla(1,1))/(numdovelas);
for i=1:numdovelas+1
    x(i,1)=supfalla(1,1)+deltax*(i-1);
end

%Interpolar suptalud y supfalla para los valores de x
stalud=interp1(suptalud(:,1),suptalud(:,2),x,'linear','extrap');
sfalla=interp1(supfalla(:,1),supfalla(:,2),x,'linear','extrap');
%% Grafica
plot (suptalud(:,1),suptalud(:,2),x,sfalla,'linewidth',1.5);
hold on
%% Geometría de cada dovela (i) del deslizamiento
for i=1:numdovelas
    matriz(i,1)=(x(i+1,1)+x(i,1))/2 ;%coordenada x en el punto medio de cada dovela
    matriz(i,2)=interp1(suptalud(:,1),suptalud(:,2),(x(i+1,1)+x(i,1))
/2,'linear','extrap'); %Punto medio coordenada sup talud
    matriz(i,3)=interp1(supfalla(:,1),supfalla(:,2),(x(i+1,1)+x(i,1))
/2,'linear','extrap'); % Punto medio sup falla
    matriz(i,4)=(-x(i,1)+x(i+1,1)); %Base de dovela i
    matriz(i,5)=matriz(i,2)-matriz(i,3); %Altura de dovela i
end

%PRIEMRA ETAPA: Se evalúa la estabilidad del talud (FOS) y se obtiene el primer
desplazamiento de cada dovela
dxo=primer(matriz,numdovelas)
xt1=matriz(:,1)+dxo(:,1); %Primer desplazamiento del equilibrio limite

% SEGUNDA ETAPA
t=0;
j=2; %Contador desde 2 para calcular después del primer movimiento
while t<tmax
    t=(j-1)*dt
    j;
    %Se crean matrices para cada variable: Numero de filas corresponde al número de
```

dovelas y Numero de columnas corresponde a intervalos de tiempo hasta tmax

```

%Matriz para coordenadas X
Coordx(:,1)=matriz(:,1);
Coordx(:,2)=xt1(:,1);
%Matriz para sup falla
M_supfalla(:,1)=matriz(:,3);
M_supfalla(:,j)=interp1(slip(:,1),slip(:,2),Coordx(:,j),'linear','extrap');
%Matriz para desplazamiento en x
M_dx(:,j)=Coordx(:,j)-Coordx(:,j-1);
M_dx(:,1)=0;
%Matriz para base
M_base(:,1)=matriz(:,4);
%La base se calcula en función de la diferencia del desplazamiento relativo de cada
dovela. Se supone que la primera dovela no se deforma
for i=1:numdovelas
    if(i==1)
        M_base(i,j)=M_base(i,j-1);
    else
        M_base(i,j)=M_base(i,j-1)+((M_dx(i,j)-M_dx(i-1,j)));
    end
end

%Matriz para altura
M_altura(:,1)=matriz(:,5);
for i=1:numdovelas
    M_altura(i,j)=M_altura(i,j-1)* M_base(i,j-1)/M_base(i,j); %Calculo manteniendo
Área constante
end
%Matriz para sup talud
M_suptalud(:,1)=matriz(:,2);
M_suptalud(:,j)=M_supfalla(:,j)+M_altura(:,j);

for i=1:numdovelas

    %Matriz para alpha
    M_alpha(i,1)=atan((interp1(slip(:,1),slip(:,2),Coordx(i,1),'linear','extrap')-
interp1(slip(:,1),slip(:,2),(Coordx(i,1)+(M_base(i,1))/2),'linear','extrap'))/(M_base(i,
1)/2));
    M_alpha(i,j)=atan((interp1(slip(:,1),slip(:,2),Coordx(i,j),'linear','extrap')-
interp1(slip(:,1),slip(:,2),(Coordx(i,j)+(M_base(i,j))/2),'linear','extrap'))/(M_base(i,
j)/2));
    %Matriz para longitud
    M_long(i,j)=M_base(i,j)/cos(M_alpha(i,j));
    %Matriz coef de rigidez de resorte K y coef de viscosidad miu
    if i==1
        M_k(i,1)=0;
    else
        M_k(i,j)=Eo*M_altura(i-1,j)/M_base(i-1,j);
    end

    if i+1<=numdovelas

```

```

        M_k(i+1,j)=Eo*M_altura(1,j)/M_base(i,j);
end

M_miu(i,1)=miu;
M_miu(i,j)=miu;

%Matriz para peso de dovelas
M_weight(i,j)=gamma*M_base(i,j)*M_altura(i,j);

%Matriz para altura del agua
M_hw(i,j)=Pore*M_altura(i,j);

%Constante A --> A=ki*(cos(ai-ai-1)-tan(phi)sen(ai-ai-1))  a=alpha
if i==1
    M_A(i,j)=0;
else
    M_A(i,j)=M_k(i,j)*(cos(M_alpha(i-1,j)-M_alpha(i,j))-tan(phi)*sin(M_alpha(i-1,
j)-M_alpha(i,j)));
end
if M_A(i,j)<0
    M_A(i,j)=0;
end
%Constante E
M_E(i,j)=M_weight(i,j)*(sin(M_alpha(i,j))-cos(M_alpha(i,j))*tan(phi))+M_hw(i,j) ✓
*gamma_w*M_long(i,j)*tan(phi);
if M_E(i,j)<0
    M_E(i,j)=0;
end
%Constante C
M_C(i,j)=M_miu(i,j)/(dt);
%Constante D
M_D(i,j)=(M_weight(i,j)/g)/dt^2;

%Coordenadas en x(t+1)
%Para primera dovela (corona)
if i==1
    Coordx(i,j+1)=(M_E(i,j)+M_k(i+1,j)*(Coordx(i,1)-Coordx(i+1,1))+Coordx(i,j)*(-
M_k(i+1,j)+M_C(i,j)+2*M_D(i,j))+Coordx(i,j-1)*-M_D(i,j)+Coordx(i+1,j)*M_k(i+1,j))/(M_C(i,
j)+M_D(i,j));
else
    %Para ultima dovela (pata)
    if i==numdovelas
        %Coordx(i,j+1)=(Coordx(i-1,j-1)*(-M_A(i,j))+Coordx(i,j-1)*(M_A(i,j)-M_D
(i,j))+Coordx(i-1,j)*M_A(i,j)+Coordx(i,j)*(-M_A(i,j)+2*M_D(i,j)+M_C(i,j))+M_W(i,j))/(M_D
(i,j)+M_C(i,j));
        Coordx(i,j+1)=(M_E(i,j)-M_A(i,j)*(Coordx(i-1,1)-Coordx(i,1))+Coordx(i-1,
j)*M_A(i,j)+Coordx(i,j)*(-M_A(i,j)+M_C(i,j)+2*M_D(i,j))+Coordx(i,j-1)*-M_D(i,j))/(M_C(i,
j)+M_D(i,j));
    else
        %Dovelas intermedias
        Coordx(i,j+1)=(M_E(i,j)-M_A(i,j)*(Coordx(i-1,1)-Coordx(i,1))+M_k(i+1,j)* ✓

```

```
(Coordx(i,1)-Coordx(i+1,1))+Coordx(i-1,j)*M_A(i,j)+Coordx(i,j)*(-M_A(i,j)-M_k(i+1,j)+M_C
(i,j)+2*M_D(i,j))+Coordx(i,j-1)*-M_D(i,j)+Coordx(i+1,j)*M_k(i+1,j))/(M_C(i,j)+M_D(i,j));
    end
end

%Condicional: No es posible que la dovela retroceda
if Coordx(i,j+1)<Coordx(i,j)
    Coordx(i,j+1)=Coordx(i,j);
end
end

%GRAFICA INTERACTIVA
F1 = plot (Coordx(:,j),M_suptalud(:,j),'linewidth',1.5);title(['TALUD ANALISIS E= ',
num2str(k_res), ' kN/m/m; miu = ', num2str(miu), ' kPa-s/m; dt = ', num2str(dt), ' s; No
dovelas = ', num2str(numdovelas)]);
F1 = plot (Coordx(:,j),M_suptalud(:,j),'linewidth',1.5);title(['Ejemplo 1']);
hold on
pause(dt/1000); % pause (intervalo de tiempo en el cual se realiza la gráfica)

j=j+1;
end
xlabel('x (m)')
ylabel('y (m)')
hold off

toc
end
```

```

function dxo=primer(matriz,numdovelas)
global gamma slip co phi_s dt FOS Pore
%Recibe la función matriz de 5 columnas: columna 1 es x medio, 2 es suptalud medio, 3 es
supfalla medio, 4 es base y 5 altura
%--Para evaluar la estabilidad del talud, se implementó el método
%Unbalanced Thrust Method. Se debe suponer un F.S. inicial y el programa lo incrementa
hasta que la fuerza para la última dovela sea cero.

FSi=0.6 %Factor de seguridad inicial
j=1;
Pult(1)=-1000
FS(1)=FSi
%Realiza el ciclo hasta que la fuerza entre la última dovela sea cercana a cero
while abs(Pult(j))>0.1
    for i=1:numdovelas
        matriz(i,8)=atan((interp1(slip(:,1),slip(:,2),matriz(i,1),'linear','extrap')-
interp1(slip(:,1),slip(:,2),(matriz(i,1)+(matriz(i,4))/2),'linear','extrap'))/(matriz(i,
4)/2)); %Alpha
        matriz(i,6)=matriz(i,4)/(cos(matriz(i,8))); %L
        matriz(i,7)=matriz(i,4)*matriz(i,5)*gamma; %W
        if i==1 % Primera dovela
            matriz(i,9)=cos(-matriz(i,8))-tan(phi_s)/FS(j)*sin(-matriz(i,8)); %factor phi
            matriz(i,10)=0; %Pi
        else
            matriz(i,9)=cos(matriz(i-1,8)-matriz(i,8))-tan(phi_s)/FS(j)*sin(matriz(i-1,8)
-matriz(i,8)); %factor phi
            if matriz(i-1,11)<0
                matriz(i,10)=0; %Pi
            else
                matriz(i,10)=matriz(i-1,11); %Pi
            end
        end
        matriz(i,11)=matriz(i,7)*sin(matriz(i,8))-(co*matriz(i,6)/FS(j)+(matriz(i,7)*cos
(matriz(i,8))-9.81*Pore*matriz(i,5)*matriz(i,6))*tan(phi_s)/FS(j))+matriz(i,9)*matriz(i,
10); %P i+1
    end
    j=j+1;
    Pult(j)=matriz(numdovelas,11)
    FSi=FSi+0.001; %Incremento del F.S.
    FS(j)=FSi;

    if Pult(j)*Pult(j-1)<0
        break
        break
    end
end
FOS=FS(j-1)

%CALCULO DEL PRIMER DESPLZAMIENTO A PARTIR DE FUERZAS ENTRE DOVELAS
for i=1:numdovelas

```

```
if i==1
    matriz(i,12)=matriz(i,7)*cos(matriz(i,8))+matriz(i,10)*sin(-matriz(i,8)); %N
    matriz(i,13)=matriz(i,12)*tan(phi_s); %T
    matriz(i,14)=(matriz(i,10)*cos(-matriz(i,8))-matriz(i,11)+matriz(i,7)*sin(matriz
(i,8))-matriz(i,13))/(matriz(i,7)/9.81); %ai
else
    matriz(i,12)=matriz(i,7)*cos(matriz(i,8))+matriz(i,10)*sin(matriz(i-1,8)-matriz
(i,8)); %N
    matriz(i,13)=matriz(i,12)*tan(phi_s); %T matriz(i,14)=(matriz(i,10)*cos(matriz(i-
1,8)-matriz(i,8))-matriz(i,11)+matriz(i,
7)*sin(matriz(i,8))-matriz(i,13))/(matriz(i,7)/9.81); %ai
end

matriz(i,15)=matriz(i,14)*dt; %Velocidad
if matriz(i,15)<0
    matriz(i,15)=0;
end
matriz(i,16)=matriz(i,1)+(matriz(i,15)*dt*cos(matriz(i,8)))/2; %xn
matriz(i,17)=matriz(i,16)-matriz(i,1); %dx
end

if FOS>1.05
    f = msgbox('EL TALUD ES ESTABLE: F.S>1.05');
    dxo=zeros(numdovelas,1);
else
    dxo=matriz(:,17);
end
end
```

```
%Grafica la posición de la dovela en el tiempo
function posdovela(dovela)
global suptalud supfalla g phi co gamma miu k_res dt numdovelas tmax Coordx tiempo pos
F2
figure;
clear pos tiempo
for i=1:size(dovela,2)
    clear n
    n=1;
    t=0;
    t_land=size(Coordx,2)*dt;
    while t<=tmax
        tiempo(n)=t;
        [i,n]
        % pos(i,n)=Coordx(dovela(i),n

        % Para poner grafica de posiciones desde cero ...
        pos(i,n)=Coordx(dovela(i),n)-Coordx(dovela(i),1);
        t=n*dt;
        n=n+1;
    end
end

%Grafica para las cinco dovelas
F2 = plot(tiempo(:),pos(1,:)); hold on
plot(tiempo(:),pos(2,:));
plot(tiempo(:),pos(3,:));
plot(tiempo(:),pos(4,:));
plot(tiempo(:),pos(5,:));
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('Posición (m)')
grid on
grid minor
%title(['E= ',num2str(k_res), 'kN/m/m; miu = ', num2str(miu), 'kPa-s/m; dt = ', num2str
(dt), 's; No dovelas = ', num2str(numdovelas)])
legend(['Dovela No ', num2str(dovela(1))], ['Dovela No ', num2str(dovela(2))], ['Dovela No ',
num2str(dovela(3))], ['Dovela No ', num2str(dovela(4))], ['Dovela No ', num2str(dovela (5))])
legend('Location','southeast')
end
```

```

function cinetica(dovela)
global suptalud supfalla g phi co gamma miu k_res dt numdovelas tmax dovela slip tiempo ↵
M_Vel M_Acel
global Coordx deltax k_res M_A M_alpha M_altura M_base M_C M_D M_dx M_hw M_k M_long M_miu ↵
M_supfalla M_suptalud M_W M_weight F3 F4
clear tiempo Vel Acel
j=2;
t=0;

M_Vel=zeros(size(Coordx));
M_Acel=zeros(size(Coordx));
t_land=size(Coordx,2)*dt;
%Cálculo de velocidad y aceleración por MDF
while t<tmax
    t=(j-1)*dt
    M_Vel(:,j)=(Coordx(:,j+1)-Coordx(:,j))/(dt);
    M_Acel(:,j)=(Coordx(:,j-1)-2*Coordx(:,j)+Coordx(:,j+1))/(dt^2);
    j=j+1;
end
for i=1:size(dovela,2)
    clear n
    n=1;
    t=0;

    %Grafica de velocidad y aceleración para las cinco dovelas
    while t<tmax+dt/100

        tiempo(n)=t;
        Vel(i,n)=M_Vel(dovela(i),n);
        Acel(i,n)=M_Acel(dovela(i),n);
        t=n*dt;
        n=n+1;
    end
end

figure;
F3 = plot(tiempo(:),Vel(1,:));hold on
plot(tiempo(:),Vel(2,:));
plot(tiempo(:),Vel(3,:));
plot(tiempo(:),Vel(4,:));
plot(tiempo(:),Vel(5,:));
grid on
grid minor
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('Velocidad(m/s)')
%title(['E= ',num2str(k_res), '; miu = ', num2str(miu), '; dt = ', num2str(dt), '; No ↵
dovelas = ', num2str(numdovelas)])
legend(['Dovela No ', num2str(dovela(1))], ['Dovela No ', num2str(dovela(2))], ['Dovela No ↵
', num2str(dovela(3))], ['Dovela No ', num2str(dovela(4))], ['Dovela No ', num2str(dovela ↵
(5))]);
figure;
F4 = plot(tiempo(:),Acel(1,:));hold on

```

```
plot(tiempo(:),Acel(2,:));
plot(tiempo(:),Acel(3,:));
plot(tiempo(:),Acel(4,:));
plot(tiempo(:),Acel(5,:));
grid on
grid minor
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (m/s2)')
%title(['E= ',num2str(k_res), 'kN/m/m; miu = ', num2str(miu), 'kPa-s/m; dt = ', num2str
(dt), 's; No dovelas = ', num2str(numdovelas)])
legend(['Dovela No ', num2str(dovela(1))], ['Dovela No ', num2str(dovela(2))], ['Dovela No ',
num2str(dovela(3))], ['Dovela No ', num2str(dovela(4))], ['Dovela No ', num2str(dovela (5))])
end
```

```
function giff(filename,t_graph)
global Coordx M_suptalud M_supfalla M_Vel M_Acel dt tmax suptalud sfalla numdovelas x  ↵
k_res miu
h = figure;
plot (suptalud(:,1),suptalud(:,2), 'linewidth',1.5);
grid on
grid minor
hold on
plot(x,sfalla)
xsup=Coordx(numdovelas,1)+30
xinf=Coordx(1,1);
ysup=M_suptalud(1,1);
yinf=0;
t_step=t_graph/dt;
t_max=size(Coordx,2)-1;
i=1;
for n = 1:t_step:t_max
    n
    i
    xgiff(:,1) = Coordx(:,n);
    ygiff(:,1) =M_suptalud(:,n)
    plot(xgiff,ygiff)
    xlabel('x (m)')
    ylabel('y (m)')
    drawnow
    frame = getframe(h);
    im = frame2im(frame);
    [imind,cm] = rgb2ind(im,256);
    if n == 1
        imwrite(imind,cm,filename,'gif', 'Loopcount',inf);
    else
        imwrite(imind,cm,filename,'gif','WriteMode','append');
    end
    i=i+1;
end
end
```