

**MODELAMIENTO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE**

**DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO
INGRID TATIANA RUIZ RANGEL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

**MODELAMIENTO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE**

**DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO
INGRID TATIANA RUIZ RANGEL**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director
GUSTAVO CHIO CHO
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a nuestros padres, madres y hermanos quienes fueron los promotores, coautores y un apoyo incondicional en el largo camino del saber.

A nuestros maestros, quienes a lo largo de nuestros estudios de ingeniería han sembrado en nosotros la semilla del conocimiento y la investigación.

A nuestros amigos y colegas, quienes con una mano amiga nos ayudaron a encontrar el norte de nuestro proyecto de investigación.

A todos los que nos ayudaron de una u otra manera en el desarrollo y escritura de esta tesis les escribimos esta dedicatoria y les damos las gracias por su apoyo incondicional.

DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO
INGRID TATIANA RUIZ RANGEL

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es la cúspide de un proyecto de investigación cuya culminación no habría sido posible sin la influencia de manera directa o indirecta de muchas personas que han estado con nosotros antes, durante y después de la elaboración del presente proyecto. A todos ellos un infinito agradecimiento por hacer parte de nuestras vidas. Pero principalmente le agradecemos a Dios por permitirnos brillar con la luz del conocimiento, y por darnos la fuerza y la sabiduría para trabajar todos los días hasta la culminación de este documento.

Especialmente le agradecemos al profesor Gustavo Chio Cho, por depositar su confianza en nosotros, por su guía paciente, su enseñanza y su preocupación para que el proyecto se hiciera correctamente.

Le agradecemos a nuestro colega y amigo Carlos Felipe Orduz Suárez por su amistad y guía en el estudio del análisis numérico, así como al profesor Jader E. Guerrero de la escuela de física de la Universidad Industrial de Santander por su disposición y ayuda siempre presente.

DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO
INGRID TATIANA RUIZ RANGEL

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 MARCO TEÓRICO	18
1.1 MÉTODOS EMPÍRICOS.....	18
1.1.1 Aproximaciones basadas en datos geomorfológicos	19
1.1.2 Aproximaciones geométricas.	20
1.1.3 Métodos de cambio de volumen	22
1.2 MÉTODOS ANALÍTICOS	25
1.2.1 Modelos de bloque o de masa concentrada.....	26
1.2.2 Modelos 2-D basados en la reología de Bingham.....	31
1.2.3 Modelos 2-D integrados	32
1.2.4 Modelos dinámicos de flujos tridimensionales	32
2 METODOLOGÍA.....	33
2.1 SOLUCIONES ANALÍTICAS	33
2.1.1 Casos particulares.....	33
2.1.2 Modelo con fricción de Coulomb	44
2.1.3 Modelo con fricción de Coulomb y fricción-turbulenta	45
2.2 SOLUCIONES NUMÉRICAS.....	46
2.2.1 Modelo únicamente con fricción de Coulomb.....	46
2.2.2 Modelo con fricción de Coulomb y fricción-turbulenta	47
2.3 PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE DESLIZAMIENTO.....	48
2.3.1 Análisis de sensibilidad del método numérico.....	50
2.4 COMPARACIONES CON UN DESLIZAMIENTO REAL.....	64
3 RESULTADOS	68
4 DISCUSIÓN.....	71
5 INVESTIGACIONES FUTURAS	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cuadro sinóptico de métodos de análisis de deslizamientos de tierra....	18
Figura 2. Coeficientes de las correlaciones realizadas según el tipo de deslizamiento y su trayectoria según Corominas en 1996.....	21
Figura 3. Correlaciones halladas empíricamente por Finlay et al en 1999. Según límite inferior, límite superior y valor medio.....	21
Figura 4. Esquema de análisis de un deslizamiento empleando el método de cambio de volumen.....	23
Figura 5. Diagrama de flujo del método estadístico o método de cambio de volumen	25
Figura 6. <i>Derivación de las ecuaciones de deslizamiento dinámico del bloque, a) De perfil, b) Relaciones geométricas de la pendiente, c) Diagrama de fuerza</i>	28
Figura 7. Presión de poros sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje	31
Figura 8. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 1	34
Figura 9. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 1	34
Figura 10. Desplazamiento vertical vs. desplazamiento horizontal para el caso 2	35
Figura 11. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 2	35
Figura 12. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 3	36
Figura 13. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 3	36
Figura 14. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 4	37
Figura 15. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 4	37
Figura 16. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 5	38
Figura 17. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 5	38
Figura 18. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 6	39
Figura 19. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 6	39
Figura 20. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 7	40
Figura 21. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 7	40

Figura 22. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 8	41
Figura 23. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 8	41
Figura 24. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 9	42
Figura 25. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 9	42
Figura 26. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 10	43
Figura 27. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 10	43
Figura 28. <i>Interfaz gráfica GUI de la aplicación DinamicaAvalanchas v1.0 desarrollada en Matlab</i>	48
Figura 29. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1a.....	51
Figura 30. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1a	52
Figura 31. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1c.....	53
Figura 32. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1b	53
Figura 33. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1c.....	54
Figura 34. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1c.....	54
Figura 35. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1d.....	55
Figura 36. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1d	55
Figura 37. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2a.....	56
Figura 38. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2a	56
Figura 39. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2b.....	57

Figura 40. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2b	57
Figura 41. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 2c.....	58
Figura 42. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2c.....	58
Figura 43. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 2d.....	59
Figura 44. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2d	59
Figura 45. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 3a.....	60
Figura 46. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3a	60
Figura 47. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 3b.....	61
Figura 48. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3b	61
Figura 49. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 3c.....	62
Figura 50. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3c.....	62
Figura 51. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación ' <i>DinamicaAvalanchas v1.0</i> ' para el caso 3d.....	63
Figura 52. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3d	63
Figura 53. Parte media de la trayectoria de deslizamiento del río Nomash; el desprendimiento de masa se originó en la esquina superior izquierda de la foto..	64

Figura 54. Plano de la ruta de deslizamiento y depósito de tierra del río Nomash mostrando lugares mencionados en el texto. El espaciado de cuadrícula es de **200 m** en ambas direcciones y el intervalo de contorno es de 10 m65

Figura 55. Resultados de los análisis dinámicos del río Nomash. A) Perfiles de flujo en intervalos de 10s (Todas las profundidades exageradas x10) B) Perfiles de velocidad, con estimaciones de velocidad en las ubicaciones B, C y D indicadas por cruces66

Figura 56. Velocidad de las tres series de prueba y puntos de velocidad tomados en campo del deslizamiento del río Nomash69

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Velocidades del modelo de deslizamiento en bloque y las encontradas en campo (Hungry y Evans en 2004)	69
Tabla 2. Errores absolutos entre las velocidades del modelo de deslizamiento en bloque y las encontradas en campo	70

RESUMEN

TÍTULO:

MODELAMIENTO DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE*

AUTORES:

DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO**

INGRID TATIANA RUIZ RANGEL**

PALABRAS CLAVE:

Deslizamiento, parámetro de turbulencia, ángulo de alcance, fricción, línea de energía, coeficiente de presión de poros.

DESCRIPCIÓN:

En el este documento se presenta un estudio cuyo objeto es implementar el modelo de deslizamiento en bloque, cuya finalidad es determinar las propiedades cinemáticas (alcance, velocidad y aceleración) de una masa deslizante, que funcione como una idealización para concebir un modelo matemático para el deslizamiento de un cuerpo masivo, específicamente para el fenómeno de remoción de tierras. Para ello se desarrollan y se solucionan tanto analíticamente como numéricamente, las ecuaciones de las variables que gobiernan el movimiento del modelo de deslizamiento en bloque, bajo la consideración de que el movimiento se desarrolla en una sola dimensión, en un material isotrópico e indeformable, y en función de las variables independientes: ángulo de fricción, parámetro de turbulencia (ξ), coeficiente de presión de poros (r_u) y trayectoria (función de desplazamiento). Para tener en cuenta todas las consideraciones ya nombradas, el modelo se desarrolla con base en el teorema de trabajo y energía. Finalmente se presenta la elaboración de un código de programación con extensión .m, manipulado mediante una interfaz gráfica que permite el ingreso de datos y el retorno de las variables buscadas (alcance, velocidad, aceleración), el cual funciona como herramienta computacional del modelo de deslizamiento en bloque que, a su vez, permite realizar la comparación del modelo con una avalancha real ya medida.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil M.Sc. Ph.D. Codirector: Omar Giovanni Sánchez Rivera, Ingeniero Civil.

ABSTRACT

TITLE:

MODELING THE PHENOMENON OF REMOVAL MASS THROUGH THE IMPLEMENTATION OF A SLIDING BLOCK MODEL *

AUTHORS:

DANIEL CAMILO ROMÁN QUINTERO**

INGRID TATIANA RUIZ RANGEL**

KEYWORDS: Slip turbulence parameter angle range, friction, power line, pore pressure coefficient

DESCRIPTION:

In this paper a study is done to implement the sliding block model, which aims are to determine the kinematic properties (range, speed and acceleration) of a sliding mass, which works as an idealization to conceive a mathematical model for an sliding massive body, specifically for the mass removal phenomenon. For this reason are developed and solved (analytically and numerically) the equations that governs the sliding block model, under the consideration that the movement takes place in one dimension, in an isotropic and undeformable material and in function of the independent variables: angle of friction, turbulence parameter (ξ), pore pressure coefficient (r_{ll}) and trajectory (displacement function). To consider all the variables listed above, the model is developed based on the work – energy theorem. Finally is shown the development of a programming code with .m extension, which functions as a computational tool of the sliding block model using a graphical interface that allows data entry and returns the value of the sought variables (range, speed, acceleration), at the same time the computer application developed in this study allows to compare the sliding block model with a real debris flow that have been already measured.

* Bachelor thesis

** Physic-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Gustavo Chio Cho, Civil Engineer M.Sc. Ph.D. Co-Director: Omar Giovanni Sánchez Rivera, Civil Engineer.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales con gran influencia en Colombia son los sismos, los deslizamientos y las inundaciones. En el análisis de la gestión del riesgo de desastres como aporte para la construcción de políticas públicas en el país [1], realizado en el año 2012, se determinó que excluyendo los daños debido a la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, los mayores porcentajes de pérdidas de vidas en el período desde 1970 hasta 2011 fueron ocasionadas por deslizamientos.

En Colombia el grueso poblacional se encuentra focalizado en la zona andina, la cual se caracteriza por poseer una topografía desde ondulada hasta escarpada, con laderas cuya pendiente media puede ser superior al 13%. Debido a diversos fenómenos socioculturales la tendencia de la población colombiana ha sido inmigrar hacia los grandes centros urbanos, por ejemplo en 1938 el 28% de la población vivía en las ciudades, en 2005 el valor fue del 75%. Evidentemente el desplazamiento no ha sido intervenido por los entes gubernamentales por lo que se ha realizado históricamente la construcción de viviendas ilegales en zonas de alto riesgo de deslizamientos de tierra. En Bucaramanga, según el mapa de riesgos elaborado por la administración municipal, existen aproximadamente ciento treinta y un mil personas (el 27% de la población total del municipio) que viven en dichas zonas y en sus alrededores.

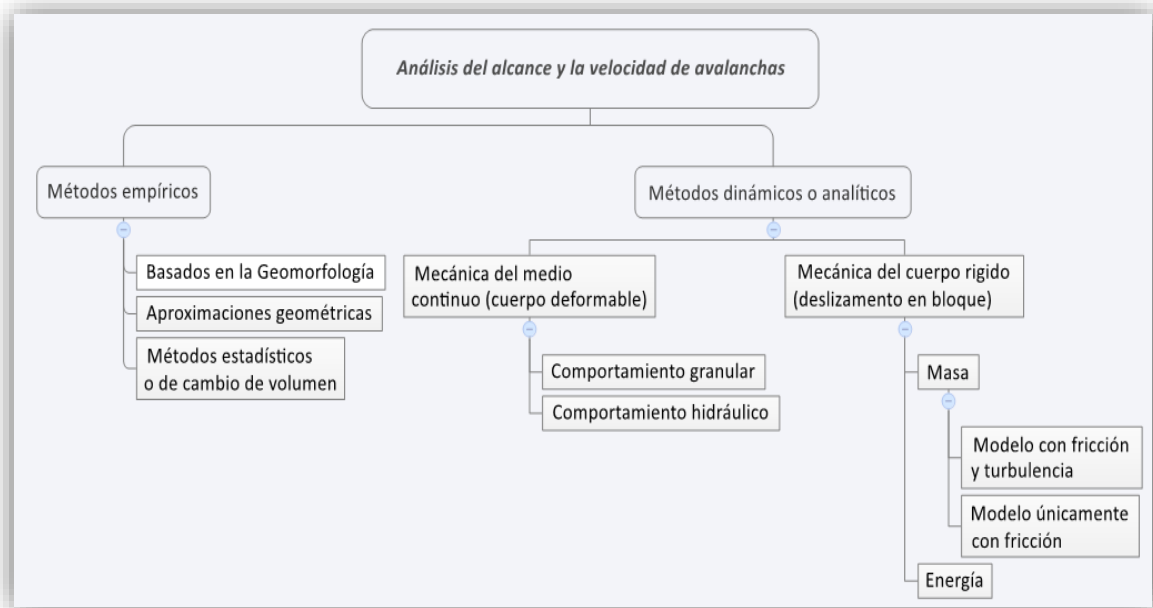
Los movimientos de tierra ocurren cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material; la cohesión y la fricción interna ayudan al material a mantener la estabilidad del talud, sin embargo los taludes pierden firmeza por varias razones, una de las más frecuentes es la excesiva presión de poros, este fenómeno ocurre normalmente en las temporadas invernales y coincide con territorios desforestados. Una forma de mitigar estos desastres es condicionar el uso del suelo evitando construir en sectores de amenaza alta, pero dada la

situación actual, en la que existen zonas habitadas en condición de vulnerabilidad, se deben tomar decisiones al respecto; lograr cambios en el uso del suelo es difícil en una ciudad en desarrollo, por eso se necesitan herramientas que permitan conocer el comportamiento de los movimientos de masa, considerando parámetros como la trayectoria, el alcance y la velocidad, y así reconocer qué taludes requieren atención inmediata por parte de las autoridades correspondientes.

1 MARCO TEÓRICO

El proceso de búsqueda de información mediante la investigación en la literatura existente sobre el manejo de riesgos ante deslizamientos, específicamente en los modelos estudiados hasta el momento para la estimación de los mecanismos de movimiento, como distancia de recorrido y velocidad, brindan una notable orientación acerca del tema en cuestión, dicha literatura clasifica los métodos empleados en el estudio de la dinámica de avalanchas como métodos analíticos y métodos empíricos [2].

Figura 1. Cuadro sinóptico de métodos de análisis de deslizamientos de tierra



1.1 MÉTODOS EMPÍRICOS

Los métodos empíricos son una herramienta sencilla, relativamente fácil de utilizar y se encuentran clasificados básicamente en tres grupos: primero están aquellos basados en la geomorfología, segundo aquellos métodos basados en aproximaciones geométricas y finalmente los métodos de cambio de volumen

(Hungry et al 2005) [3]. Dichos métodos han sido ampliamente usados gracias a su valor práctico, los datos empíricos se basan en observaciones realizadas en campo y en análisis que caracterizan el tipo de deslizamiento, la ruta que describirá teniendo en cuenta las condiciones topográficas, y el alcance según el tipo de escombros del deslizamiento particular; por tanto, para obtener un modelo confiable se necesita una gran cantidad de información con el fin de clasificar los deslizamientos de tierra para una zona particular.

1.1.1 Aproximaciones basadas en datos geomorfológicos

Los investigadores y profesionales en ingeniería sísmica han reconocido los sistemas de información geográfica (SIG) por ser un instrumento de gran importancia en la elaboración de modelos espaciales para entender los fenómenos relacionados con riesgos y peligros. A partir de observaciones se han encontrado relaciones existentes entre los diferentes tipos de deslizamientos y propiedades geométricas del mismo.

Los métodos de evaluación geomorfológica utilizan la fotogrametría y el análisis geológico en campo como herramientas principales para evaluar posibles deslizamientos y estimar el depósito final de los escombros. Básicamente se trata de hallar las máximas distancias que han recorrido los deslizamientos en ciertas zonas durante varios millones de años a partir de características como la litología, la presencia de diaclasas, y factores erosivos; de tal manera se obtienen los lineamientos para la delimitación de avalanchas catastróficas.

Las metodologías basadas en geomorfología no brindan pistas sobre el mecanismo de deposición de nuevas avalanchas dado que las características topográficas y las circunstancias respecto a deslizamientos modernos son diferentes.

1.1.2 Aproximaciones geométricas.

Los métodos geométricos se enfocan en hallar la distancia total de viaje L definida como la proyección horizontal de la línea que une la parte más alta del deslizamiento con su parte más externa (ver figura 6). El ángulo de la línea nombrada anteriormente se denomina *fahrböschung* (según A. Heim EN 1932) o ángulo de alcance (Crominas 1996). Según (HUNGR 2005) Grandes deslizamientos presentan un ángulo de alcance más pequeño que los deslizamientos de volúmenes pequeños. (SCHEIDEGGER 1975). Fue Albert Heim quien en 1932 comprobó la dependencia que tiene la distancia de recorrido de una avalancha de rocas con la altura inicial, la regularidad de la superficie y el volumen de rocas involucradas en el deslizamiento. Teóricamente si se tiene H y α la distancia recorrida se puede expresar como $L = \frac{H}{\tan \alpha}$ pero en la práctica no se conocen de antemano tales variables; Scheidegger (1973) propone una correlación empírica que relaciona el ángulo *fahrböschung* con el volumen del deslizamiento; tal correlación es de la forma:

$$\log(\tan(\alpha)) = A + B * \log(V)$$

Donde:

A y B son constantes de correlación, α es el *fahrböschung* o ángulo de alcance y V es el volumen del deslizamiento expresado en 10^3 m^3 . Scheidegger en 1973 dio los valores para $A=0.624$ y $B=0.15666$. Corominas en 1996 realiza varias correlaciones con datos más confiables y exactos (Hungr 2005), teniendo en cuenta diferentes tipos de deslizamientos y sus trayectorias, los parámetros de la correlación se muestran en la figura 2 enseñada a continuación:

Figura 2. Coeficientes de las correlaciones realizadas según el tipo de deslizamiento y su trayectoria según Corominas en 1996

Landslide type	Paths	A	B	R ²
Rockfalls	All	0.210	-0.109	0.76
	Obstructed	0.231	-0.091	0.83
	Unobstructed	0.167	-0.119	0.92
Translational slides	All	-0.159	-0.068	0.67
	Obstructed	-0.133	-0.057	0.76
	Unobstructed	-0.143	-0.080	0.80
Debris flows	All	-0.012	-0.105	0.76
	Obstructed	-0.049	-0.108	0.85
	Unobstructed	-0.031	-0.102	0.87
Earthflows	All	-0.214	-0.070	0.65
	Unobstructed	-0.220	-0.138	0.91

Fuente: Hungr et al (2004) '*Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity*'

A su vez Finlay et al (1999) emplea un método que correlaciona el volumen del deslizamiento y la distancia recorrida L , además de su ancho y el ángulo de la pendiente con el tipo de deslizamiento; el emplea un enfoque probabilístico en el que da los intervalos de confianza inferior (LCI) y superior (UCI) con una probabilidad de excedencia del 5%. Los resultados correlacionados se hallan a continuación:

Figura 3. Correlaciones halladas empíricamente por Finlay et al en 1999. Según límite inferior, límite superior y valor medio

Dependent variable	Equation
Cut slope	LCI $\text{Log } L = 0.062 + 0.965 \text{ Log } H - 0.558 \text{ Log } (\tan \delta)$
	Mean $\text{Log } L = 0.109 + 1.010 \text{ Log } H - 0.506 \text{ Log } (\tan \delta)$
	UCI $\text{Log } L = 0.156 + 1.055 \text{ Log } H - 0.454 \text{ Log } (\tan \delta)$
Fill slope	LCI $\text{Log } L = 0.269 + 0.325 \text{ Log } H + 0.166 \text{ Log } (V/W)$
	Mean $\text{Log } L = 0.453 + 0.547 \text{ Log } H + 0.305 \text{ Log } (V/W)$
	UCI $\text{Log } L = 0.693 + 0.768 \text{ Log } H + 0.443 \text{ Log } (V/W)$
Retaining wall	LCI $\text{Log } L = 0.037 + 0.350 \text{ Log } H + 0.108 \text{ Log } (V/W)$
	Mean $\text{Log } L = 0.178 + 0.587 \text{ Log } H + 0.309 \text{ Log } (V/W)$
	UCI $\text{Log } L = 0.319 + 0.825 \text{ Log } H + 0.150 \text{ Log } (V/W)$
Boulder fall	LCI $\text{Log } L = 0.041 + 0.515 \text{ Log } H - 0.629 \text{ Log } (\tan \delta)$
	Mean $\text{Log } L = 0.253 + 0.703 \text{ Log } H - 0.417 \text{ Log } (\tan \delta)$
	UCI $\text{Log } L = 0.466 + 0.891 \text{ Log } H - 0.206 \text{ Log } (\tan \delta)$

Fuente: Finlay et al (1999) *'Landslide risk assessment: prediction of travel distance'*

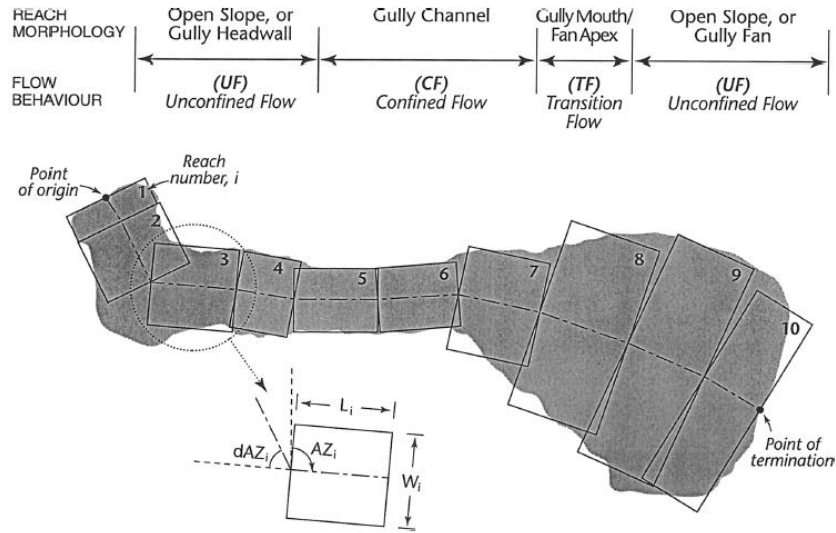
(F.C.DAI ET AL 2002) El ángulo de alcance decrece cuando aumenta el volumen de escombros. Si se sabe que el material de un talud es denso y dilatante el método del ángulo de alcance tendría mejor aplicación que si el material esta suelto y contractivo.

Tales métodos solo son funcionales cuando los deslizamientos son pequeños o cuando los escombros discurren sobre superficies aproximadamente horizontales, y existe una discusión sobre la dependencia entre el volumen de deslizamientos y su ángulo de alcance (Hungry 1990, Hansen 1996, Hunter & Fell 2003).

1.1.3 Métodos de cambio de volumen

El método del cambio de volumen estima el alcance máximo de un deslizamiento mediante la el concepto de balance entre el volumen que entra en movimiento y el volumen depositado. La ruta se subdivide en tramos como se muestra la figura 4.

Figura 4. Esquema de análisis de un deslizamiento empleando el método de cambio de volumen



Fuente: Fannin & Wise (2001) 'An empirical–statistical model for debris flow travel distance'

A medida que el deslizamiento discurre por su ruta, el volumen inicial varía debido a la pérdida del material debido a su deposición, finalmente el método se detiene cuando el volumen del deslizamiento se hace lo suficientemente pequeño. Según Corominas en 1996, se demostró una relación lineal significativa entre el volumen del deslizamiento y su ángulo de alcance para cualquier tipo de falla, por lo que se podría observar cierta generalidad del método. Según Fanning & Wise en el 2001 se estima el recorrido potencial de los flujos de escombros estableciendo un equilibrio entre el volumen arrastrado y el volumen depositado; se subdivide la trayectoria en tramos hasta llegar al alcance total, el ancho y pendiente son datos medidos. El volumen arrastrado y el volumen depositado se estiman con sus respectivas ecuaciones presentadas a continuación:

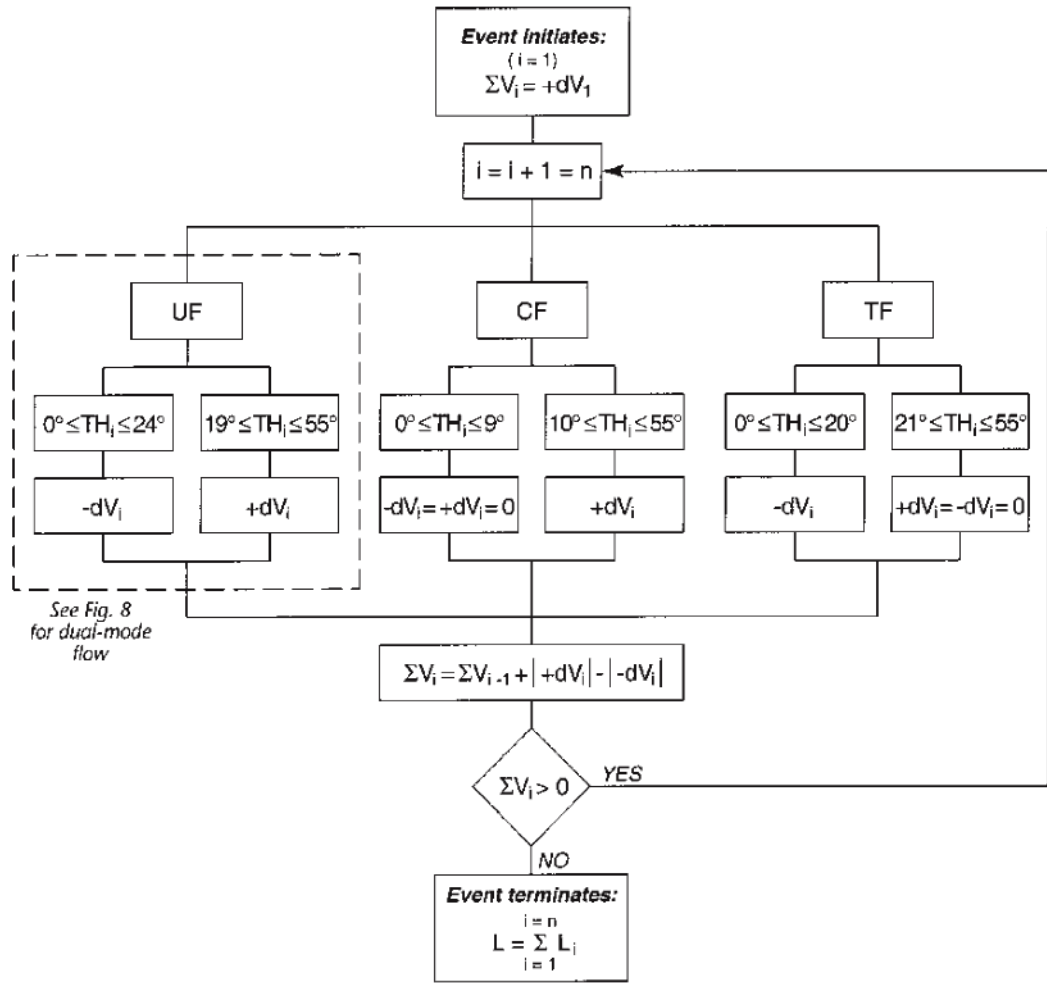
$$+ dV_i = + dV_{i,o} - 0.5 \left[\frac{|+ dV_{i,o}| V_{err}}{\sum_{i=1}^n |+ dV_{i,o}|} \right]$$

$$- dV_i = - dV_{i,o} + 0.5 \left[\frac{|- dV_{i,o}| V_{err}}{\sum_{i=1}^n |- dV_{i,o}|} \right]$$

R. J. Fannin y M. P. Wise en el 2001 presentan un algoritmo para evaluar el método de cambio de volumen, dicho algoritmo enseña una secuencia de pasos organizados para seguir con el fin de aplicar el método estadístico o de cambio de volumen.

En la figura 5 se puede apreciar el diagrama de flujo que representa el método desde la iniciación del deslizamiento hasta su depósito realizado por R. J. Fannin y M.P. Wise. Es apreciable, en el diagrama, que para este método es fundamental el confinamiento del flujo de escombros, por lo que naturalmente las secciones de análisis deben tener un parámetro de confinamiento común.

Figura 5. Diagrama de flujo del método estadístico o método de cambio de volumen



Fuente: Fannin & Wise (2001) 'An empirical–statistical model for debris flow travel distance'

1.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Los métodos analíticos comprenden cualquier herramienta matemática que utilice las reglas físicas de la dinámica de sólidos y de fluidos; en efecto ayudan a describir situaciones con fundamentos teóricos empleando el método científico, brindando así un entendimiento más profundo del tema analizado. Evidentemente cuando el desarrollo matemático de aquellos problemas se hace más complejo se

acude a los métodos de solución numérica como el método de los elementos infinitos o el de las diferencias finitas.

1.2.1 Modelos de bloque o de masa concentrada

Modelo con fricción de Coulomb

Los físicos E. Müller-Bernet y Albert Heim [4] describieron los deslizamientos de tierra mediante el teorema de trabajo y energía cinética, utilizando un bloque de masa M que se desliza sobre una trayectoria curva, con ángulo de pendiente β y con fricción de Coulomb constante cuyo ángulo se denota con la letra ϕ .

El teorema de trabajo y energía cinética establece que el cambio de la energía cinética de un cuerpo en movimiento, es igual al trabajo neto sobre dicho cuerpo. Es necesario aclarar que el marco de referencia debe estar en el centro de gravedad de la masa deslizante, no entre la zona de origen y sus depósitos. El teorema de trabajo y energía se enuncia en términos infinitesimales como sigue a continuación [5].

$$dE_k = dW_n = FdL$$

Luego entonces:

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = FdL \quad (1)$$

Donde v es la velocidad y F es la fuerza neta que resulta del diagrama de equilibrio de fuerzas de la figura 6c.

Del diagrama de fuerzas de la figura 6c tenemos:

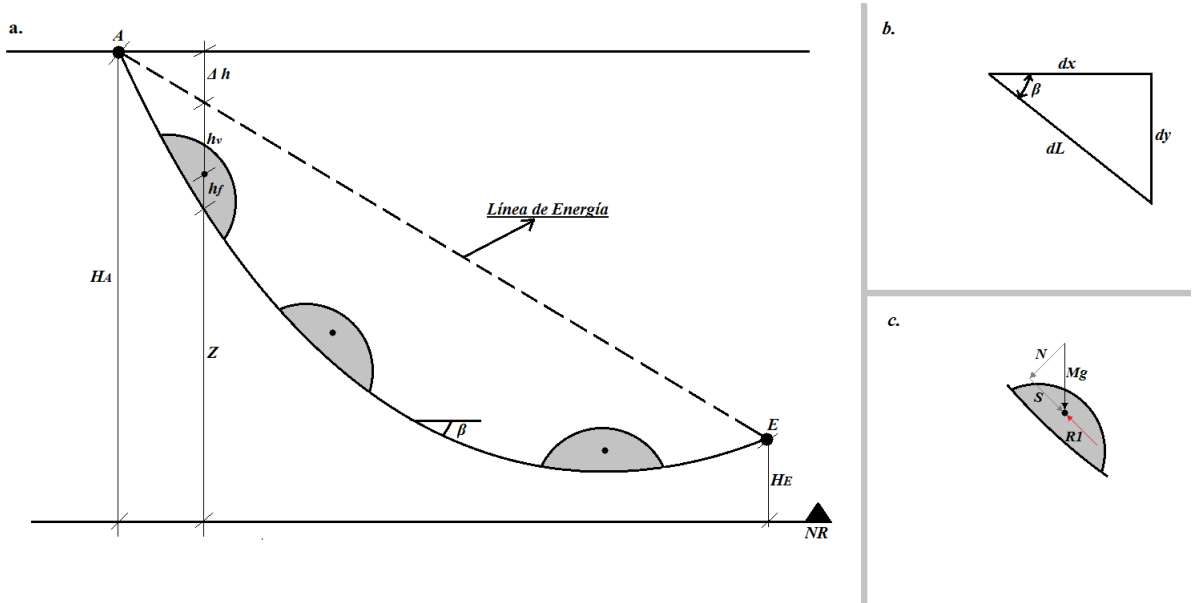
$$S = Mg \sin \beta; N = Mg \cos \beta; R1$$

Dado que teóricamente las únicas fuerzas que generan trabajo son aquellas que tienen dirección paralela al desplazamiento, S es la componente de la fuerza gravitacional que actúa en dicha dirección y acelera el bloque en caída por su trayectoria, y $R1$ es la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento y desacelera el bloque, pero que de igual manera, es paralela al desplazamiento; dicha fuerza de fricción fue descrita por Coulomb en 1781 [6] como una fuerza proporcional a la fuerza normal y al coeficiente de fricción entre las dos superficies en contacto, expresada matemáticamente: $Fr = N\mu$, donde $N = Mg \cos \beta$ y $\mu = \tan \phi$ luego entonces $R1 = Mg \cos \beta \tan \phi$. Por tanto la fuerza neta que ejerce trabajo sobre el bloque es $F = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)$, Reemplazando F en la ecuación (1) se consigue modelar una masa deslizante con pérdidas de energía debidas únicamente a la fricción.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)dL \quad (2)$$

La cabeza de velocidad $v^2/2g$ es una altura vertical por encima del centro de gravedad del bloque; mide en (m) la energía cinética. En este tipo de modelos, podemos describir el bloque en el que los granos son del mismo tamaño, pero en realidad los granos son de diferentes tamaños; un bloque de masa M con dimensiones constantes simplifica el efecto de la propagación lateral y longitudinal del deslizamiento, no toma en cuenta los cambios en la profundidad del flujo y requiere un ángulo de fricción aparente de los escombros a lo largo del plano de deslizamiento. Este método también conocido como modelo de trineo es aplicable sólo para desprendimiento de rocas a pequeña escala, las cuales no se desintegren durante el movimiento [7].

Figura 6. Derivación de las ecuaciones de deslizamiento dinámico del bloque, a) De perfil, b) Relaciones geométricas de la pendiente, c) Diagrama de fuerza



Modelo con fricción de Coulomb y fricción-turbulenta

Movimiento turbulento y pérdidas de energía

Los valores de alcance y velocidad que se pueden encontrar con el modelo de fricción de Coulomb durante deslizamientos y avalanchas son en teoría mucho más altos que los que en realidad ocurren (Körner 1976) [8], esto se debe a la simplicidad del modelo. Los deslizamientos inicialmente se comportan como una masa que se mueve en bloque durante un instante, posteriormente se disuelven rápidamente bajo el efecto de sus propias fuerzas resistentes y en realidad, según Albert Heim en 1932, en deslizamientos de a lo menos 10000 m³ los escombros de rocas se chocan entre sí y existe un movimiento aparentemente aleatorio entre las partículas, aun así existe una cantidad de movimiento uniforme y un flujo común de toda la masa. Tal tipo de movimiento genera una mezcla entre sólidos y aire (en ocasiones líquidos también) llamada 'turbulencia' cuyo requisito único

para existir es que haya libertad de movimiento entre las partículas involucradas. Naturalmente el material se ve sometido al cambio de sus propiedades físicas (ϕ, ρ entre otras) cuando la masa entra en un estado dinámico.

La fricción y la turbulencia, el aire y demás resistencias al flujo, así como la inclusión de material externo a la masa que se desplaza, la generación de calor, la formación de sonido y los cambios de dirección consumen energía. Por tanto el modelo de fricción de Coulomb debe ser modificado o en última instancia abandonado.

El padre de la dinámica de avalanchas, el Dr. A. Voellmy, en 1955 propuso dos fuerzas resistivas no conservativas para el modelo de deslizamiento en bloque; en primer lugar la anteriormente nombrada fuerza de fricción de Coulomb $R_1 = \mu Mg \cos \beta$, y en segundo lugar el esfuerzo basal entre la masa deslizante dependiente directamente del cuadrado de la velocidad $\tau = \rho g \frac{v^2}{h\xi}$ [9]. Körner tuvo en cuenta la fricción de Coulomb e introdujo un parámetro de fricción turbulenta propuesto por Voellmy en 1955 para avalanchas. Körner demostró que la línea de energía de Voellmy es curva y cóncava, además observo que el modelo que no tiene en cuenta la turbulencia sino solo pérdidas de energía por fricción sobreestima la velocidad. Suponiendo un bloque de masa M de dimensiones $a \cdot b \cdot h$; área $A = a \cdot b$, volumen $V = a \cdot b \cdot h$, y conociendo que la resistencia al cortante del plano de deslizamiento está dada por la sumatoria de las fuerzas de fricción: la fricción de Coulomb y la fricción turbulenta, podemos determinar la fuerza cortante R , que es igual al producto del área de contacto y el esfuerzo cortante dado por:

$$\tau = \rho g h \cos \beta \tan \phi_b + \rho g \frac{v^2}{h\xi} \quad (4)$$

Por lo tanto la fuerza es:

$$R = mg \left(\cos \beta \tan \phi_b + \frac{v^2}{h\xi} \right) \quad (5)$$

El término ξ aparece comúnmente en presencia de presión de poros, por lo que aplicando el principio de esfuerzo efectivo se obtiene el ángulo de fricción modificado ϕ_b de la siguiente expresión: $\tan \phi_b = (1 - r_u) \tan \phi$ [3], donde r_u es el coeficiente de presión de poros usado en la mecánica de suelos y es la relación entre la presión de poros y el esfuerzo vertical total. Finalmente, sumando la componente de la fuerza de la gravedad paralela al deslizamiento e introduciendo la reología de Voellmy, la ecuación diferencial que modela el deslizamiento de masa teniendo en cuenta el parámetro turbulento es:

$$d \left(\frac{Mv^2}{2} \right) = Mg \left(\sin \beta - \tan \phi_b - \frac{v^2}{h\xi} \right) dL \quad (6)$$

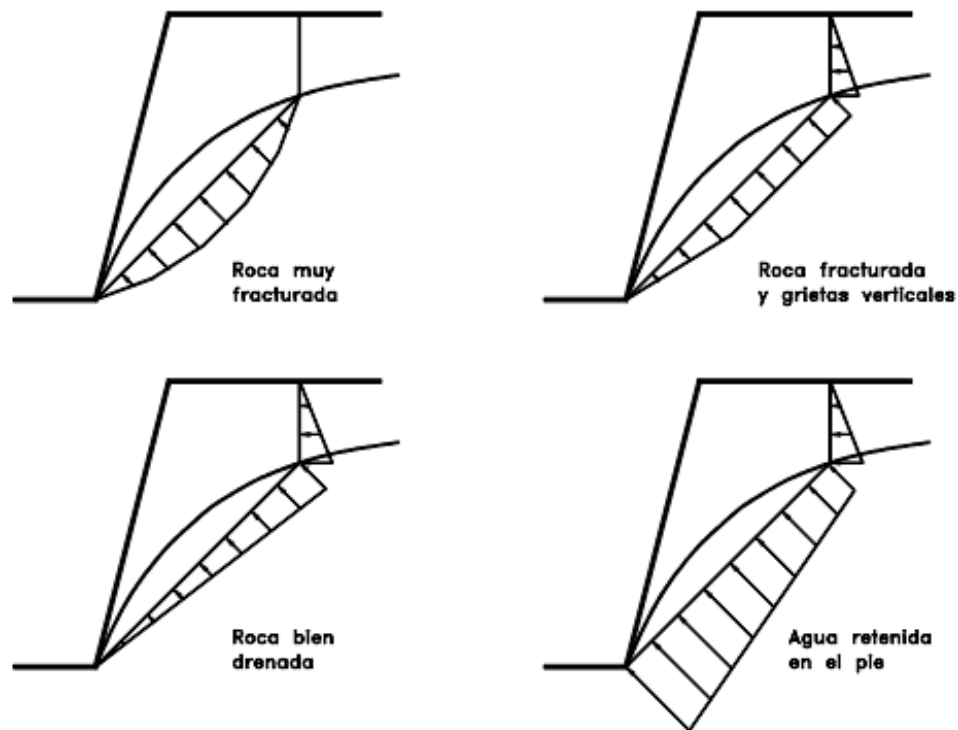
Otras propuestas de modelo de bloque

Hutchinson en 1988 propuso un modelo de deslizamiento en bloque asumiendo que se genera una gran presión de poros durante la falla en el área de contacto como resultado de licuefacción o material en condición no drenada; en tanto el bloque se desliza por el tramo, el exceso de presión de poros se disipa mediante un proceso de consolidación.

Sassa en 1988 implementó otro modelo de bloque que muestra la influencia del cambio de la presión de poros durante el deslizamiento. La presión de poros varía por la sobrecarga y carga no drenada del suelo, esto puede presentar un aumento de la presión de poros en el pie del talud como se muestra en la figura #. El modelo de Sassa puede simular buenas velocidades de los deslizamientos de tierra, siempre y cuando se escojan valores apropiados para r_u (coeficiente de presión de poros). $\tan \phi_b$ Ya no sería constante; dependería de r_u .

$$\tau = \rho g h \cos \beta \tan \phi_b + \rho g \frac{v^2}{h\xi} \quad \text{Donde} \quad \tan \phi_b = (1 - r_u) \tan \phi$$

Figura 7. Presión de poros sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje



Fuente: *Lembo Fazio y Ribacchi 1988.*

1.2.2 Modelos 2-D basados en la reología de Bingham

Modelo en el cual el esfuerzo resistente está determinado por la profundidad de flujo, un límite de elasticidad constante, y un término lineal de viscosidad con reología de Bingham. La movilización de una avalancha pequeña de roca y arrastre de grandes cantidades de coluvión arcilloso solo puede ser modelado por Bingham.

La ventaja de utilizar una formulación 2D es que se puede derivar la distribución de velocidad vertical y la estratigrafía de los depósitos.

1.2.3 Modelos 2-D integrados

Es un modelo que surge de la solución de la ecuación de momentum de flujo inestable, asumiendo la hipótesis del agua poco profunda.

Savage y Hutter en 1989 propusieron una solución lagrangiana para el modelo, el cual introdujo la tensión tangencial interna no hidrostática basado en que la masa que fluye es friccional, controlada por un ángulo de fricción interno y está sometida a deformación plástica de acuerdo con la teoría de Rankine.

1.2.4 Modelos dinámicos de flujos tridimensionales

Hacen parte de los modelos más complejos hasta ahora concebidos. Han sido desarrollados utilizando la forma Euleriana estándar de la ecuación de movimiento configurada en forma tridimensional. Hasta el momento existe un software comercial denominado FLO el cual emplea la solución del modelo euleriano integrado. Takahashi en 1999 desarrolló modelos 3D, basándose en el estudio de Sassa en 1988 el cual considera un modelo de deslizamiento en bloque con coeficiente de presión de poros (r_u) variable el cual se debe asignar al área de la ruta de antemano, como una función de entrada. Se recomienda el uso de pruebas de corte directo no drenado para determinar los coeficientes r_u . Una de las grandes limitaciones del modelo es la incapacidad para simular la presión lateral no hidrostática.

2 METODOLOGÍA

Se realiza una revisión a fondo de los modelos de interés para conocer las características cinemáticas de la masa de tierra en movimiento, por esa razón se emplean técnicas de análisis analíticas y numéricas para obtener soluciones análogas y coherentes.

2.1 SOLUCIONES ANALÍTICAS

2.1.1 Casos particulares

Para controlar la veracidad de las respuestas de los modelos de bloque o de masa concentrada se desarrollan problemas particulares que evidencien la coherencia matemática del fenómeno en estudio, una forma sencilla es hallando los límites del sistema, dados por los casos extremos de la inclinación del talud respecto a la horizontal $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$, así mismo se anula algún tipo de fricción. En teoría si poco a poco se intensifica la complejidad del proceso hasta incorporar varias fuerzas de fricción, los resultados arrojados se ubicarían entre los dos límites, en estos casos las ecuaciones aplicadas serían válidas cuando la sumatoria de las fuerzas de fricción es menor o igual que la componente de la fuerza de la gravedad que realiza trabajo; si llegado el caso la componente que se opone al desplazamiento es superior, el trabajo sería negativo. Al final se obtiene la gama de cómo se comporta el sistema a medida que varía β .

Caso 1: Movimiento rectilíneo sin fricción, con velocidad inicial $v_i \neq 0$ y $\beta = 0^\circ$. Se encuentra que la velocidad es constante en todo el desplazamiento.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta)dL = (0)dL \quad v = c$$

Figura 8. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 1

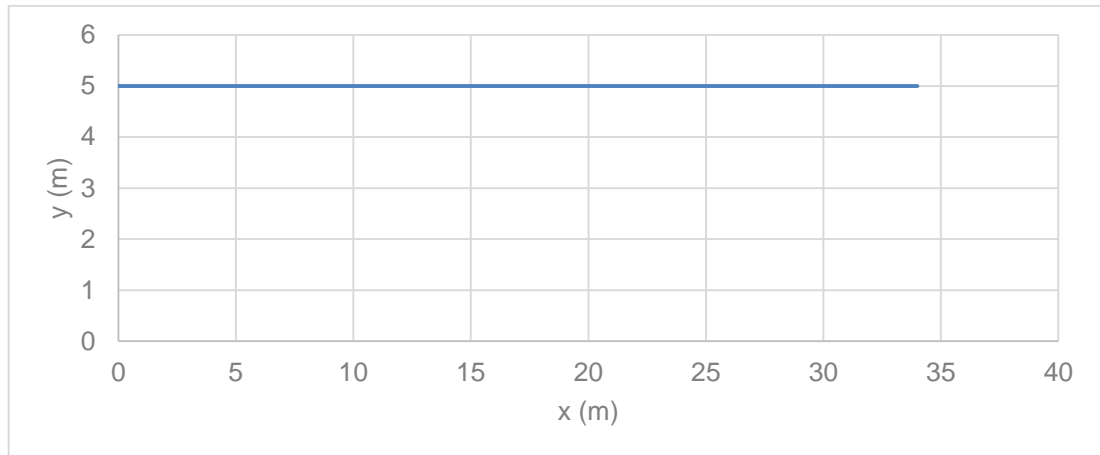
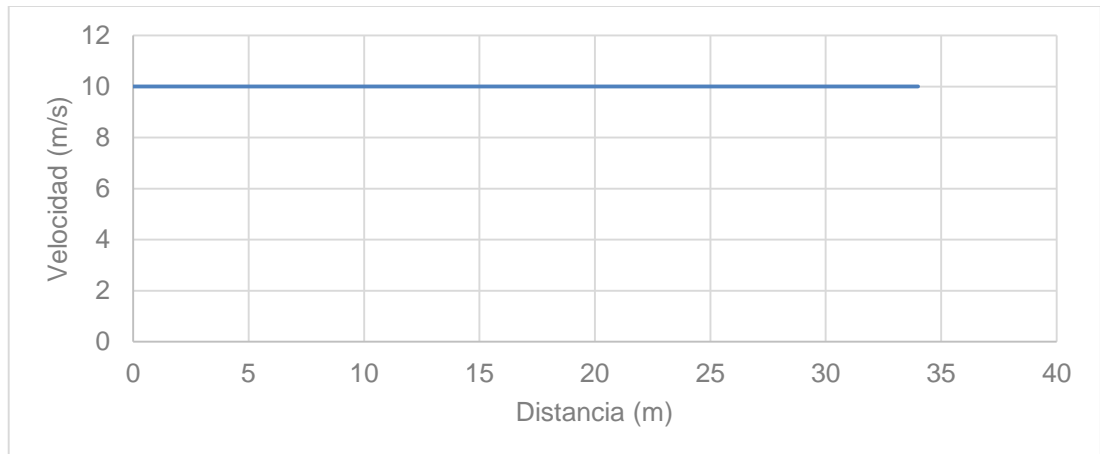


Figura 9. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 1



Caso 2: Movimiento en caída libre sin fricción, con velocidad inicial $v_i = 0$ y $\beta = 90^\circ$. Se encuentra que a medida que aumenta la distancia de desplazamiento el bloque gana energía.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta)dL ; v = \sqrt{2gy}$$

Figura 10. Desplazamiento vertical vs. desplazamiento horizontal para el caso 2

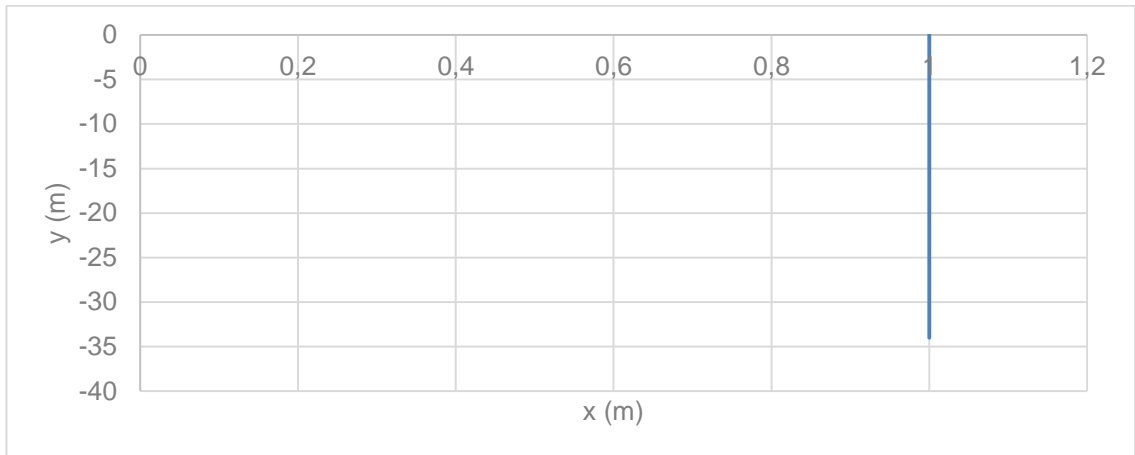
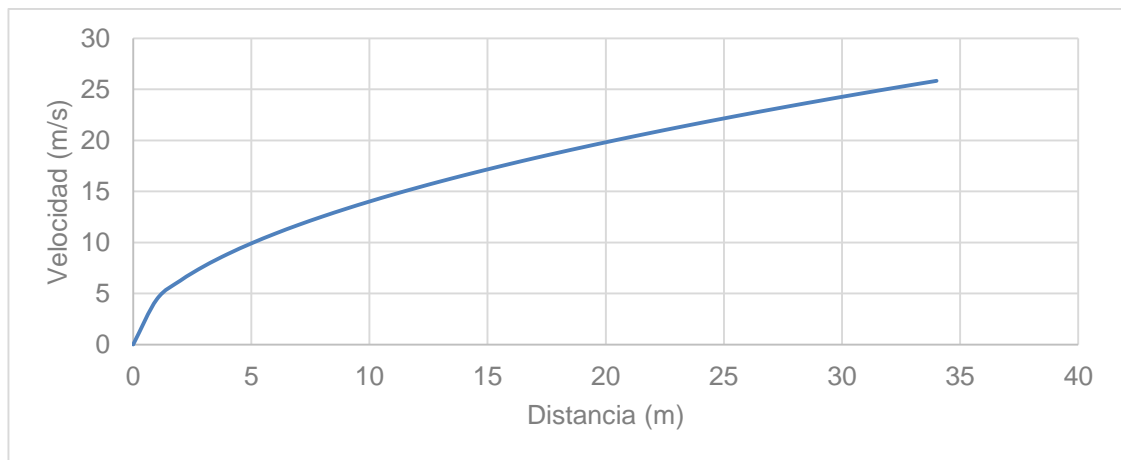


Figura 11. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 2



Caso 3: Movimiento rectilíneo con fricción, con velocidad inicial $v_i \neq 0$ y $\beta = 0^\circ$. Se encontró que a lo largo del movimiento la velocidad disminuye hasta llegar a cero, pero si en un momento dado la velocidad cuadrática se volviera negativa quiere decir que la ecuación ya no es válida pues arrojaría valores que no están en el dominio de los números reales.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)dL$$

$$v = \sqrt{2gx \tan \phi + v_i^2}$$

Figura 12. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 3

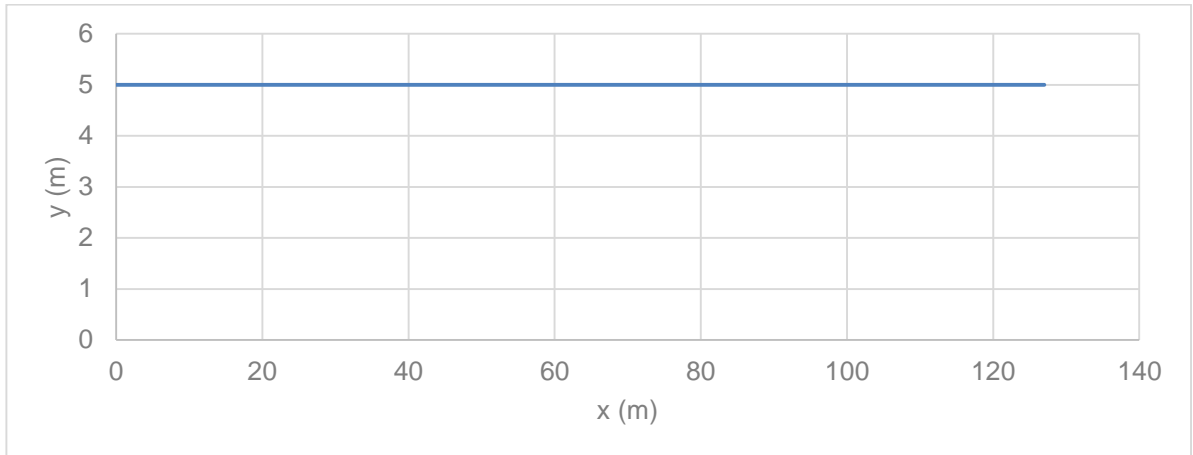
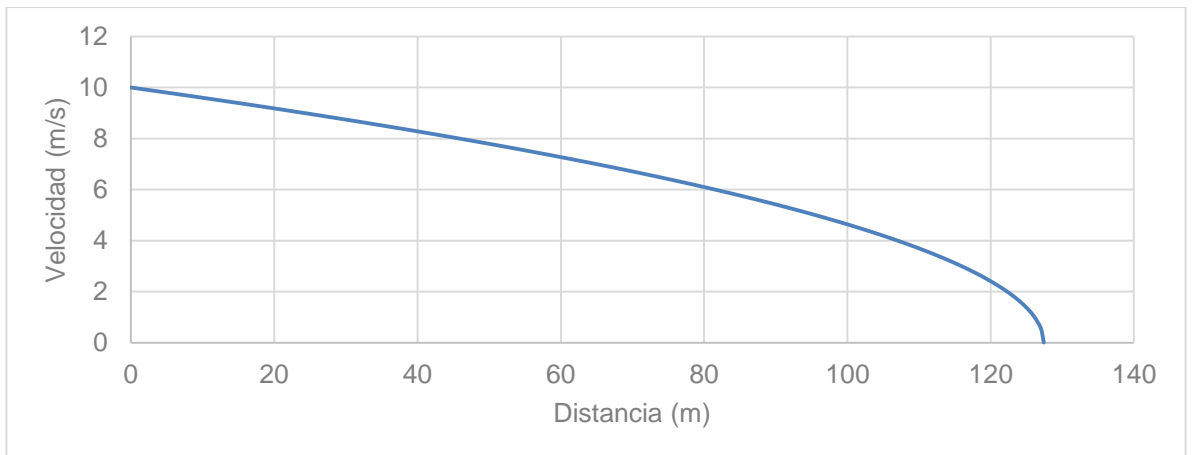


Figura 13. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 3



Caso 4: Movimiento en caída libre con fricción, con velocidad inicial $v_i = 0$ y $\beta = 90^\circ$. Para que la fricción sea efectiva debe existir otra fuerza diferente al peso que sea normal a las dos superficies en contacto, por lo que en este caso la solución es igual que en el caso dos $v = \sqrt{2gy}$

Figura 14. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 4

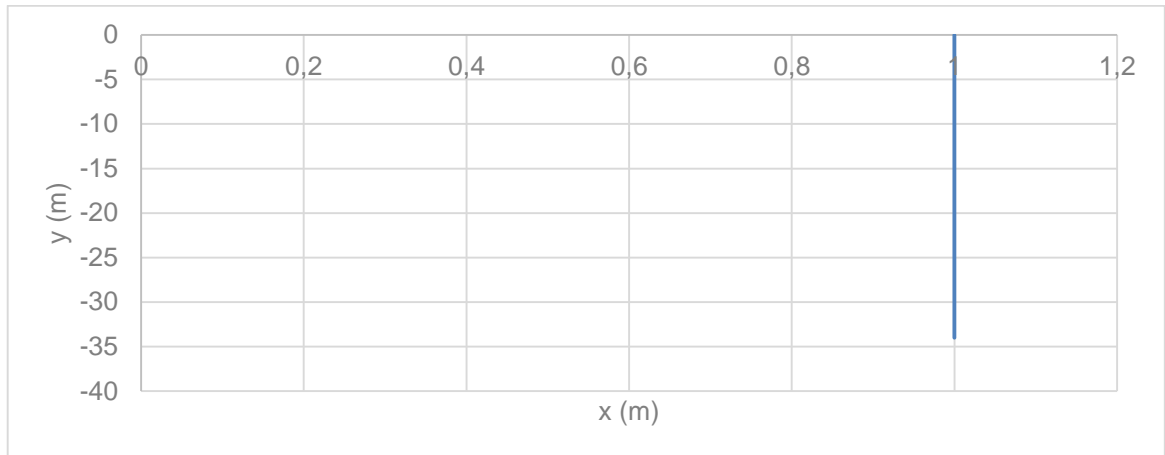
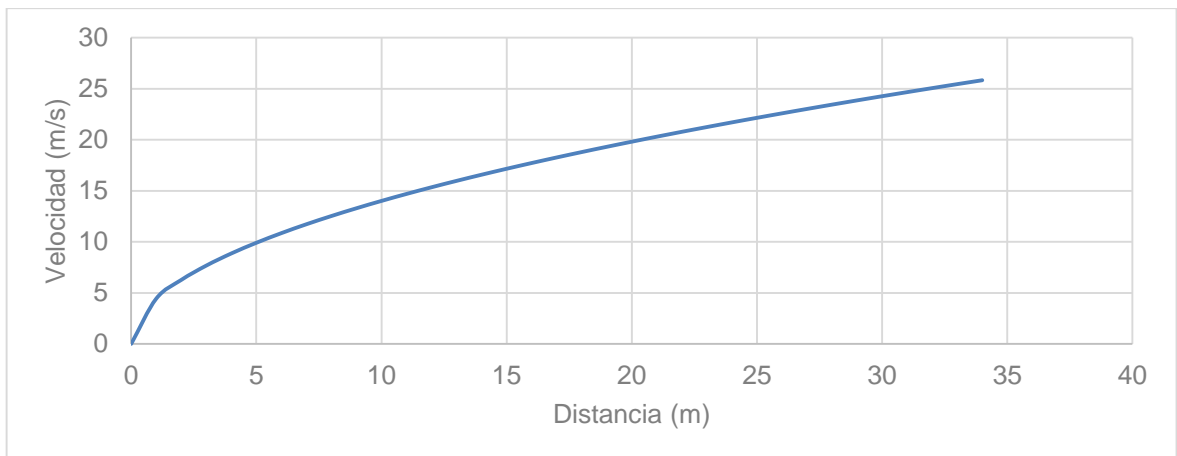


Figura 15. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 4



Caso 5: Movimiento sobre una superficie inclinada con fricción y con velocidad inicial $v_i = 0$ y β constante. Se encontró que la velocidad aumenta en todo el desplazamiento.

$$v = \sqrt{v_i^2 - (q - l)x} \quad l = 2g \tan \beta \quad q = 2g \tan \phi$$

Figura 16. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 5

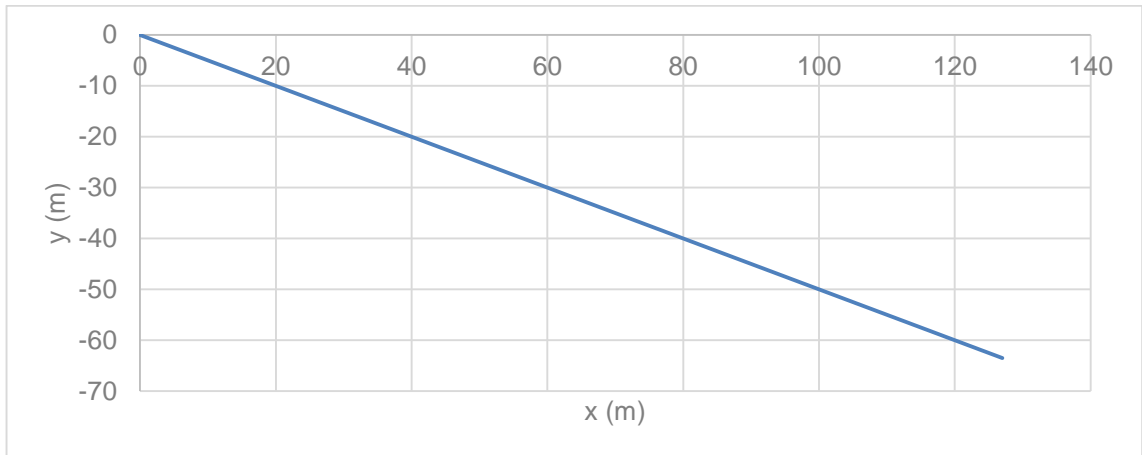
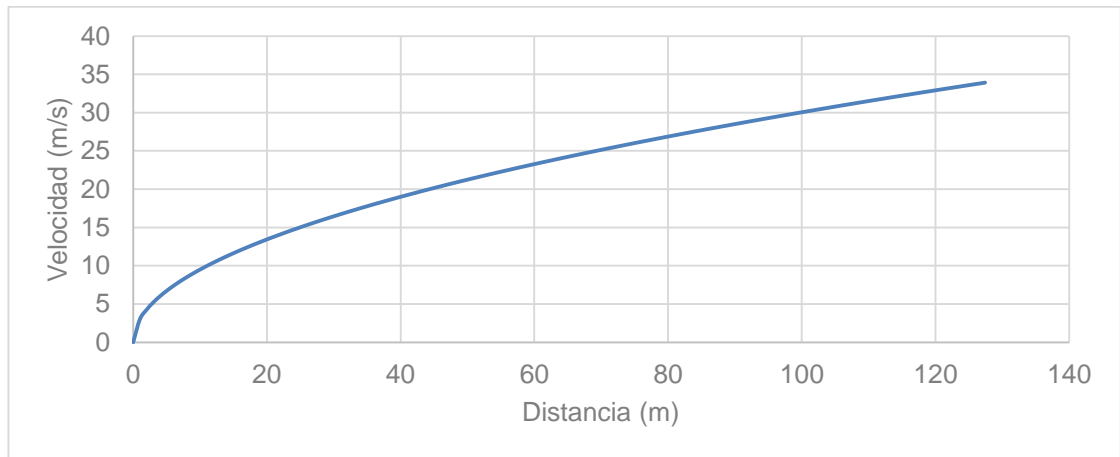


Figura 17. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 5



Caso 6: Movimiento sobre una superficie curva sin fricción, y velocidad inicial $v_i = 0$ y β variable. Se encontró que la velocidad aumenta o disminuye según el desplazamiento vertical, a mayor desplazamiento vertical mayor velocidad.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta)dL \quad v = \sqrt{2gy + c}$$

Figura 18. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 6

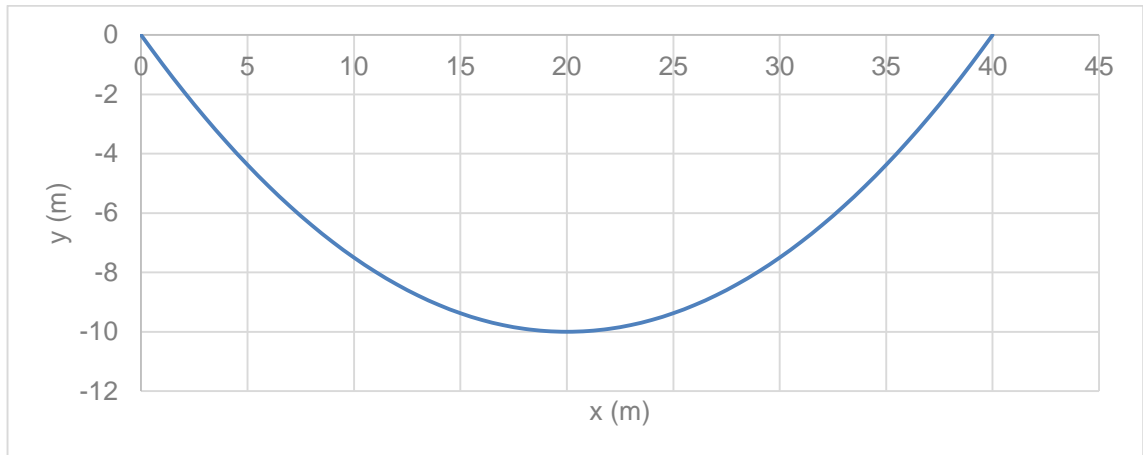
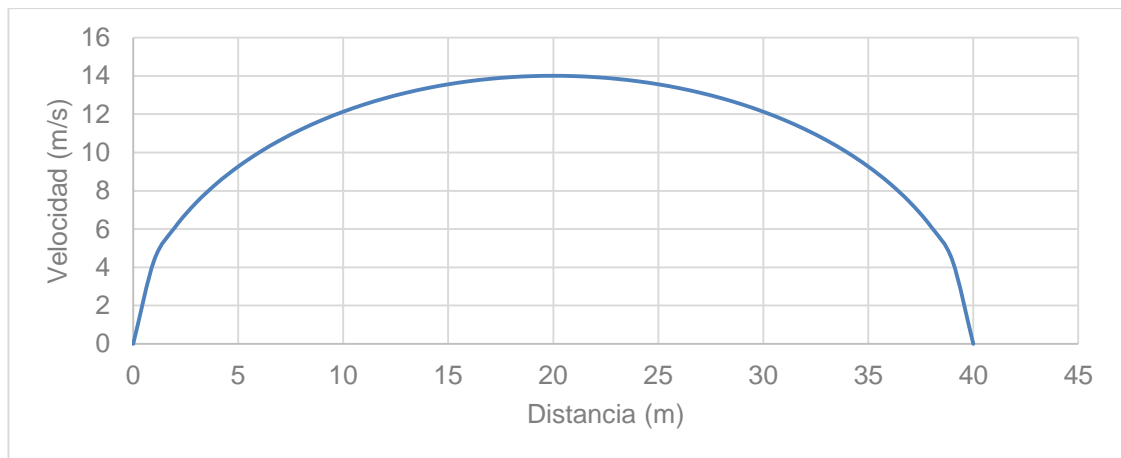


Figura 19. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 6



Caso 7: Movimiento sobre una superficie curva con fricción $v_i = 0$ y β variable. Las condiciones de este caso son las mismas que las del caso 6 con una componente de más la cual es la fricción $\cos \beta \tan \emptyset$, donde $\tan \emptyset = 0.04$. Se encuentra que el desplazamiento total horizontal es menor que el del caso 6 lo cual es coherente debido a la fuerza que se contrapone.

$$v = \sqrt{2g(y - x \tan \emptyset)}$$

Figura 20. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 7

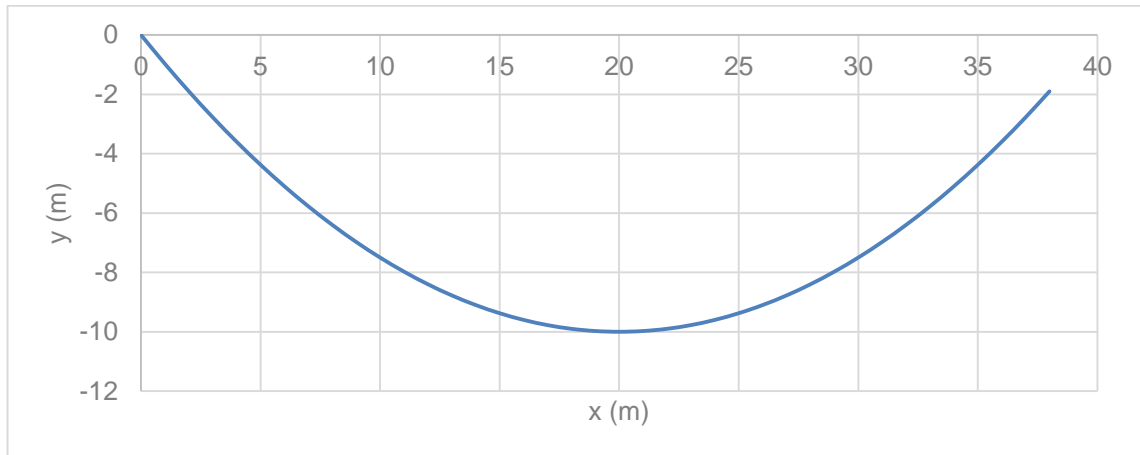
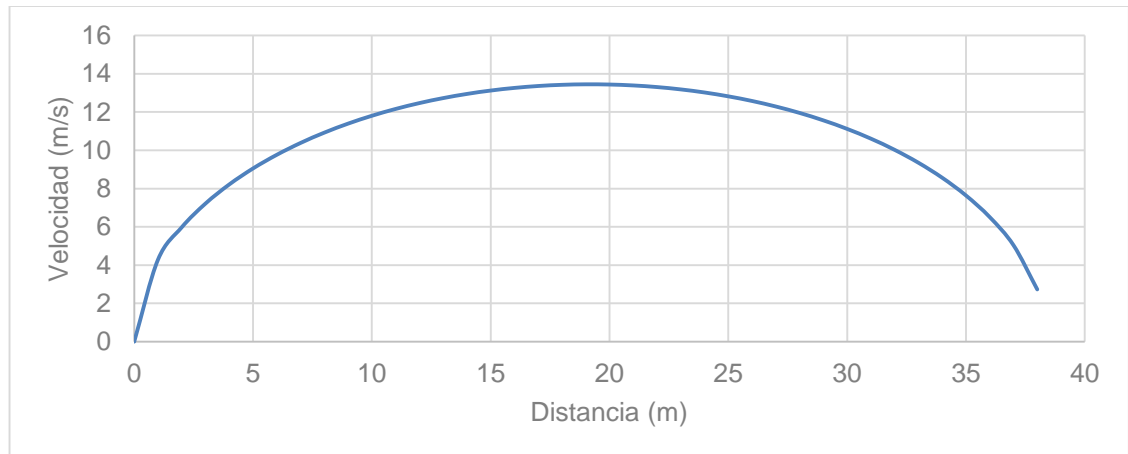


Figura 21. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 7



Caso 8: Movimiento rectilíneo con fricción y turbulencia, velocidad inicial $v_i = 0$ y $\beta = 0^\circ$. Similar al caso 3 añadiéndole la componente de la turbulencia $\varepsilon = 200 \text{ (m/s}^2\text{)}$, y profundidad $h = 1 \text{ (m)}$. Se encontró que el desplazamiento horizontal y la velocidad final son menores que la del caso 3 debido a las dos fuerzas que se oponen al movimiento, la fricción de Coulomb y a la fricción turbulenta.

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg\left(\sin\beta - \cos\beta \tan\phi - \frac{v^2}{h\xi}\right)dL$$

$$q = 2g \tan \phi \quad k = 2g/h\xi$$

$$v = \sqrt{ce^{kx} + \frac{q}{k}}$$

Figura 22. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 8

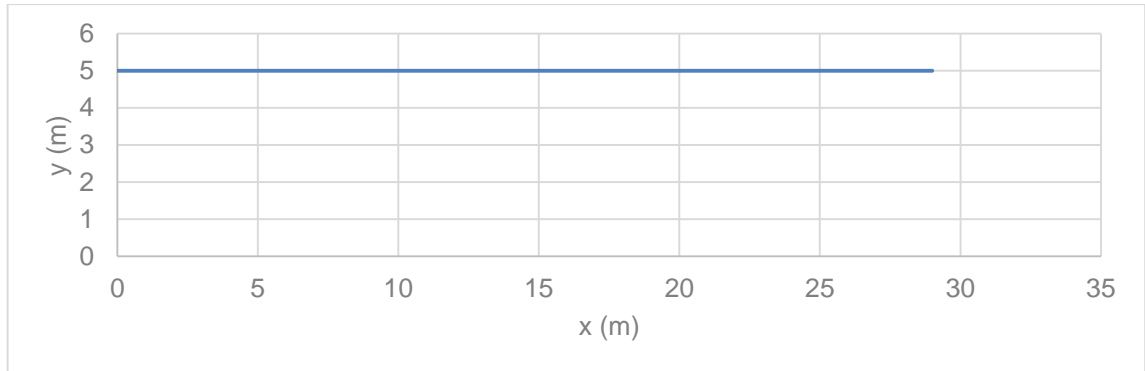
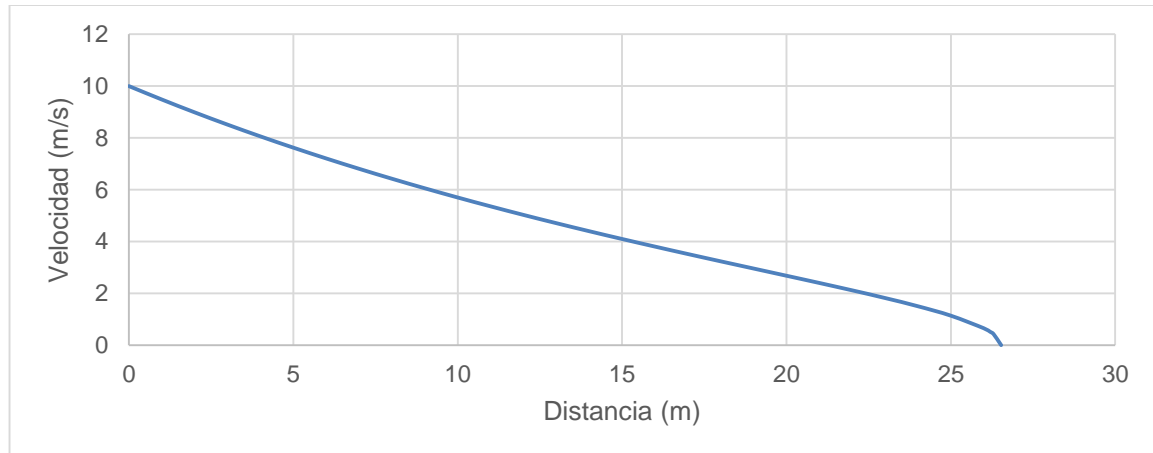


Figura 23. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 8



Caso 9: Movimiento en caída libre con fricción y turbulencia $\varepsilon = 200 \text{ (m/s}^2\text{)}$, velocidad inicial $v_i = 0$, profundidad $h = 1 \text{ (m)}$ y $\beta = 90^\circ$. Se encuentra que la única fuerza que se opone al desplazamiento es la turbulencia que hace que el desplazamiento vertical y la velocidad final sean menores que la de los casos 1 y 4.

$$v = \sqrt{\frac{q - (q)e^{-kx}}{k}}$$

$$q = 2g \quad k = 2g/h\xi$$

Figura 24. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 9

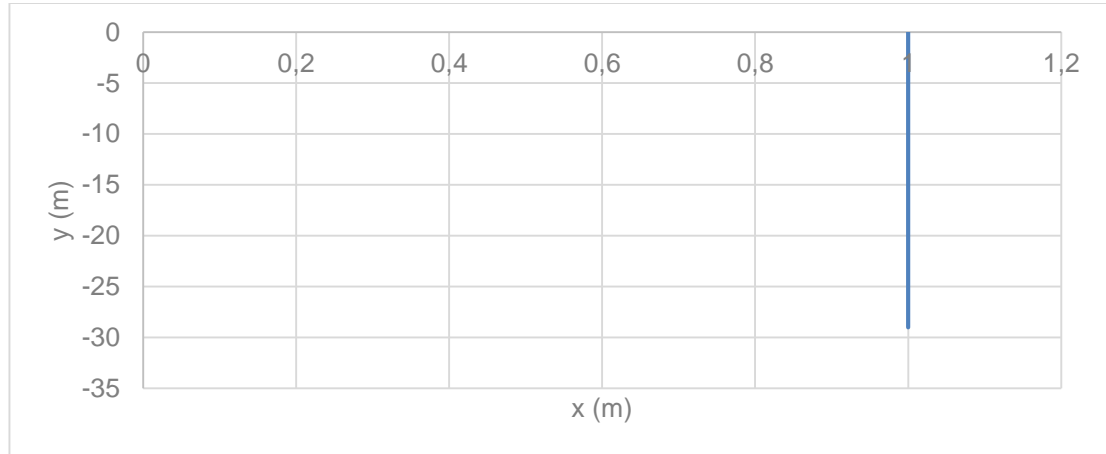
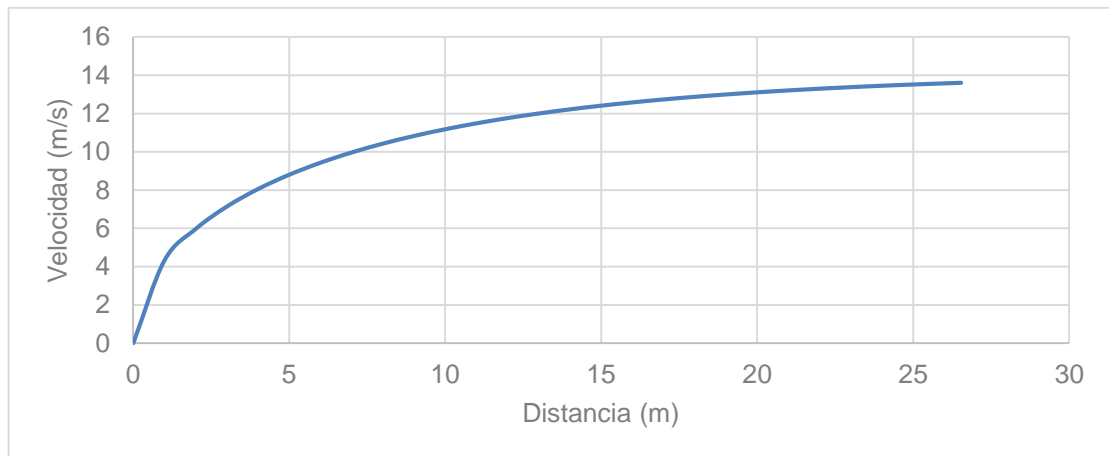


Figura 25. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 9



Caso 10: Movimiento sobre un plano inclinado con fricción y turbulencia $\xi = 200 \text{ (m/s}^2\text{)}$, velocidad inicial $v_i = 0$, profundidad $h = 1 \text{ (m)}$ y β constante. Se encuentra que el desplazamiento horizontal y la velocidad final son menores que las del caso 5 ya que este solo considera la fricción de Coulomb.

$$v = \sqrt{\frac{l - q - (l - q)e^{-kx}}{k}}$$

$$l = 2g \tan \beta \quad q = 2g \tan \phi \quad k = 2g/h\xi$$

Figura 26. Desplazamiento vertical vs. horizontal para el caso 10

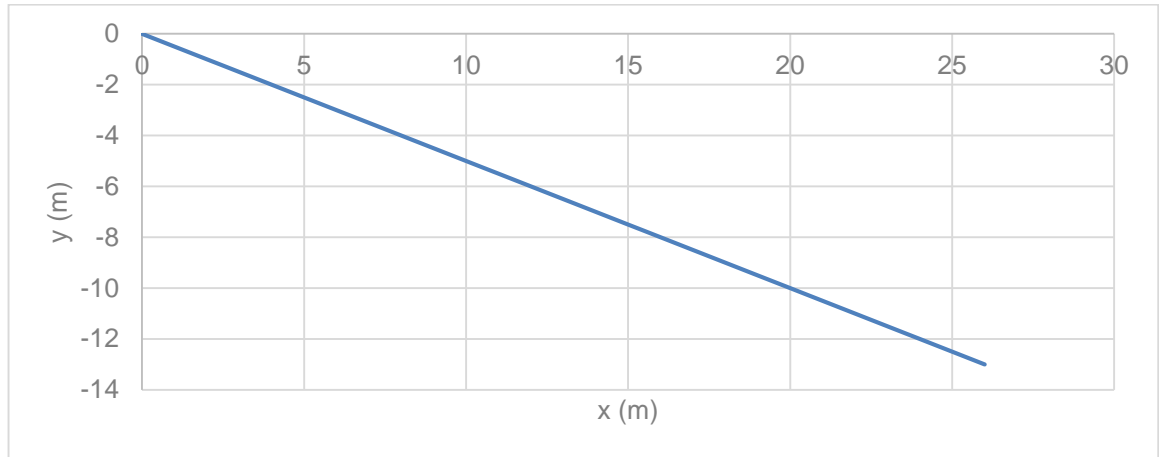
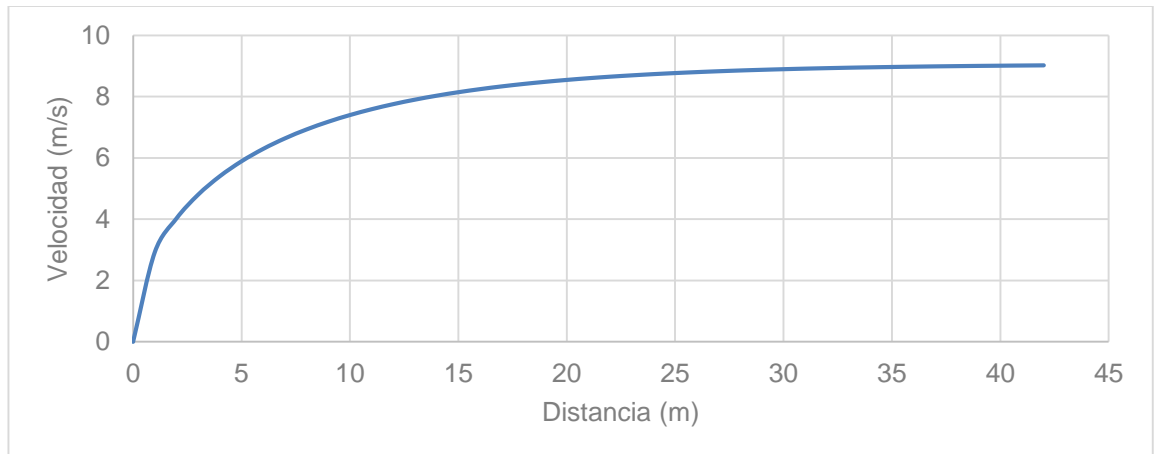


Figura 27. Velocidad vs. distancia horizontal para el caso 10



Una función que diga el desplazamiento total mas no la posición de la partícula en el espacio es la que da solución al problema de descenso de escombros. La velocidad como se mostró en los primeros casos permanece constante, aumenta o disminuye exponencialmente, en los casos donde existen fuerzas de fricción la velocidad final es menor, en definitiva la ecuación que modela el movimiento decrece en magnitud, a causa de las fuerzas opuestas, cuando la velocidad llega a cero la ecuación deja de ser operativa; se necesita otra ecuación con

condiciones iniciales diferentes de cero que continúe indicando los valores correspondientes de velocidad.

2.1.2 Modelo con fricción de Coulomb

Se propone el modelo de deslizamiento en bloque más sencillo, el cual depende del ángulo de fricción, se solucionan analíticamente sus ecuaciones diferenciales para obtener ecuaciones que describan los parámetros de movimiento de la masa (alcance, velocidad y/o aceleración). Resolviendo la ecuación (2), se debe tener en cuenta que dy/dx Representa el cambio de altura por unidad de longitud, luego depende de la función que describa el desplazamiento del bloque, por lo tanto la velocidad del modelo con fricción de Coulomb está dada por:

$$v = \sqrt{2gy - 2gx \tan \phi} \quad (7)$$

Se encontró que el desplazamiento total horizontal del movimiento sobre una superficie curva con fricción, velocidad inicial $v_i = 0$ y β variable, es menor que el del caso 6, lo cual es coherente debido a la fuerza que se contrapone.

De la segunda ley de Newton $F = Ma$ se halla la aceleración a la cual no depende de la velocidad, además es constante en el tiempo y en el espacio.

$$a = g(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi) \quad (8)$$

Se propone el modelo de deslizamiento en bloque más sencillo, el cual depende del ángulo de fricción, se solucionan analíticamente sus ecuaciones diferenciales para obtener ecuaciones que describan los parámetros de movimiento de la masa (alcance, velocidad y/o aceleración).

Resolviendo la ecuación (2)

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)dL \quad dL = \frac{dx}{\cos \beta}$$

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\tan \beta - \tan \phi)dx \quad \tan \beta = \frac{dy}{dx}$$

dy/dx Representa el cambio de altura por unidad de longitud, luego depende de la función que describa la trayectoria del bloque.

$$dv^2 = 2g\left(\frac{dy}{dx} - \tan \phi\right)dx$$

$$\int dv^2 = 2g \int dy - 2g \int \tan \phi dx$$

Integrando a ambos lados:

$$v^2 = 2gy - 2g \tan \phi x$$

$$v = \sqrt{2gy - 2g \tan \phi x}$$

2.1.3 Modelo con fricción de Coulomb y fricción-turbulenta

Cuando se aumenta el número de variables reológicas del modelo, como el parámetro de turbulencia y trayectoria, se incrementa el ajuste de los fenómenos de remoción de escombros. De la ecuación (6) la velocidad del modelo con fricción turbulenta es:

$$v = \sqrt{ce^{-p(x)} + e^{-p(x)} \int e^{p(x)} F(x) dx} \quad (9)$$

Donde:

$$p(x) = \frac{-x_a^2}{y_a} \left(0.5 \ln(\sqrt{u^2 + 1}) + u \right) + 0.5 \left(\frac{-2y_a}{x_a^2} \right)$$

$$u = \frac{-2y_a}{x_a^2} (x - x_a)$$

$$F(x) = -4g \frac{y_a}{x_a^2} (x - x_a) - q$$

Dado que la velocidad es función de la distancia y el tiempo la aceleración es variable; aplicando la segunda ley del movimiento de Newton la aceleración para el modelo turbulento es:

$$a = g \left(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi_b - \frac{v^2}{h\xi} \right) \quad (10)$$

El parámetro de turbulencia (ξ) tiene valores entre 400 y 600 (m/s^2) [9]

2.2 SOLUCIONES NUMÉRICAS

Para solucionar las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias que rigen el movimiento del bloque se emplea el método de Runge Kutta de cuarto orden. El método numérico se programó en el paquete matemático 'Matlab'. Se establecieron las variables de entrada que son las siguientes: los puntos inicial y final de la trayectoria (x_i y x_f respectivamente), el paso del método, las condiciones iniciales (x_i, v_i^2) y la función que rige el comportamiento de la tasa de cambio de la velocidad cuadrática por unidad de longitud horizontal $F(x, v^2)$.

2.2.1 Modelo únicamente con fricción de Coulomb

De la ecuación (2) se obtiene:

$$\frac{dv^2}{dx} = 2g \left(\frac{dy}{dx} - \tan \phi \right) \quad (11)$$

Luego entonces, si el bloque se desliza sobre una superficie inclinada recta $y = mx + b$

$$F(x) = 2g(m - \tan \phi) \quad (12)$$

Si el bloque se desliza sobre una superficie curvilínea cuya función de desplazamiento se ajusta a la ecuación $y = \frac{-y_a}{x_a^2}(x - x_a)^2$ entonces

$$F(x) = 2g \left(\frac{-2y_a}{x_a^2}(x - x_a) - \tan \phi \right) \quad (13)$$

2.2.2 Modelo con fricción de Coulomb y fricción-turbulenta

De la ecuación (6) se obtiene la siguiente expresión

$$\frac{dv^2}{dx} = 2g \left(\frac{dy}{dx} - \tan \phi - \frac{v^2}{h\xi} \sec \beta \right) \quad (14)$$

Por tanto, si el bloque se desliza sobre una superficie inclinada ajustada a la recta $y = mx + b$

$$F(x, v) = l - q - kv^2 \quad (15)$$

Donde $l = 2g \tan \beta = 2g \frac{dy}{dx}$, $q = 2g \tan \phi$ y $k = \sec \beta / h\xi$

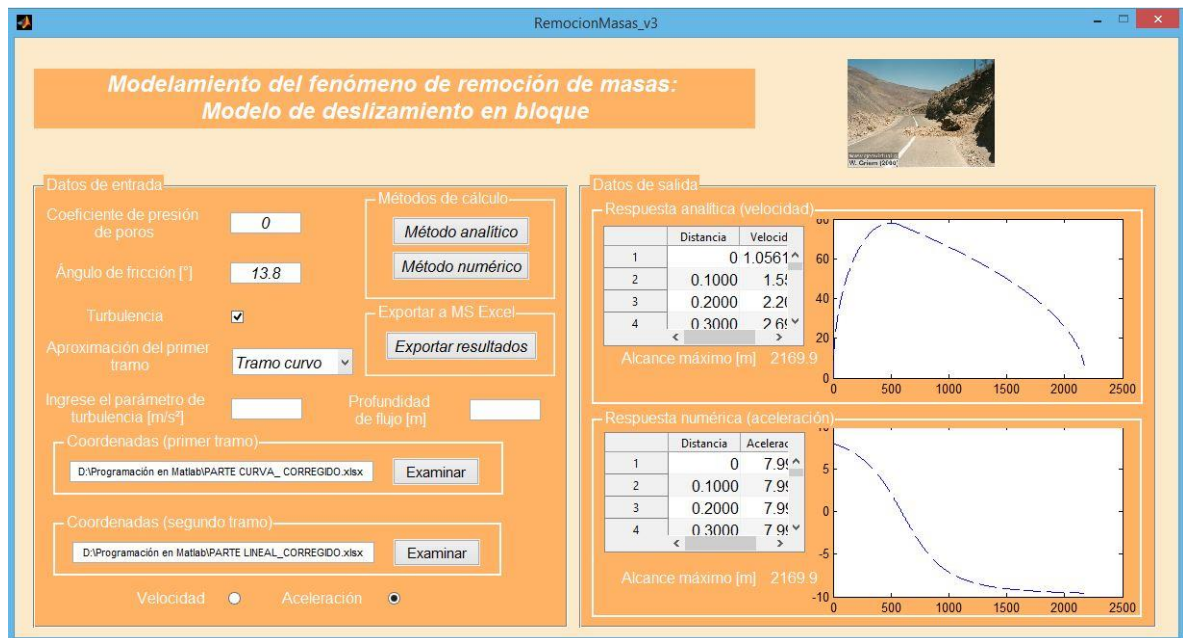
Si el bloque se desliza sobre una superficie curvilínea cuya función de desplazamiento se ajusta a la ecuación $y = \frac{-y_a}{x_a^2}(x - x_a)^2$ entonces

$$F(x, v) = \frac{-4gy_a}{x_a^2} (x - x_a) - q - kv^2 \quad (16)$$

Una vez se obtienen las funciones que modelan el cambio de la velocidad cuadrática por unidad de medida horizontal se procede a programar el modelo generando una interfaz gráfica.

2.3 PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE DESLIZAMIENTO

Figura 28. Interfaz gráfica GUI de la aplicación *DinamicaAvalanchas v1.0* desarrollada en Matlab



Para la programación del modelo se creó una interfaz gráfica (ver el GUI en la figura 28) en Matlab en la cual se le permite al usuario ingresar los datos de la siguiente manera: en primer lugar, para las variables: masa, ángulo de fricción y parámetro de turbulencia se disponen cuadros de texto editables para el ingreso de dichos datos, y para los datos que representan las coordenadas de la ruta que

debe recorrer el bloque se disponen dos paneles que contienen las herramientas para elegir los datos en cualquier ubicación del ordenador desde un archivo con extensión .xlsx, los cuales son procesados posteriormente en el código para poder resolver las ecuaciones del modelo. Para realizar la programación se tuvo en cuenta que la ruta descrita por el bloque tiene dos tramos, los cuales se pueden aproximar a perfiles lineales o curvos, según lo elija el usuario. También se tuvo en cuenta que el usuario puede elegir si emplea el modelo con fricción de Coulomb únicamente o el modelo con fricción turbulenta mediante la activación o desactivación de un *'check box'* que permite el ingreso del parámetro de turbulencia. Análogamente, se programaron dos botones, uno que arroja resultados cuya solución se hace de manera analítica y otro que arroja resultados cuya solución se hace por medio del método numérico de RK4. Finalmente se programó un botón que permite exportar datos con extensión .xlsx a cualquier ubicación en el ordenador.

Para realizar la programación de manera práctica en Matlab se emplearon variables globales que permitieran el manejo de datos entre varias funciones, los valores asignados a dichas variables son los datos de trayectoria ingresados desde archivos .xlsx. Para las soluciones numéricas y analíticas se identificaron ecuaciones diferenciales ordinarias. Particularmente para la solución numérica se empleó el método de RK4; para poder solucionar en Matlab, se programaron como funciones anónimas las funciones que dependen de la distancia horizontal *'x'* y la velocidad cuadrática *'v²'* para cada caso particular (recordar que la forma es: $dv^2/dx = F(x, v^2)$) para posteriormente evaluarlas para la solución del método numérico, finalmente una vez el método iterativo converge, se obtienen pares de puntos con los valores de la distancia horizontal recorrida y el cuadrado de la velocidad, se concatenan los valores obtenidos, se imprimen en una tabla y se grafican. En cuanto a la solución analítica sencillamente se programan las ecuaciones obtenidas de las deducciones matemáticas realizadas para cada caso

particular y se resuelven para los valores de ' x ' ingresados por el usuario en archivos .xlsx; análogamente se obtienen los valores de la velocidad y alcance máximo, se concatenan los valores obtenidos, se imprimen en una tabla y se grafican. Los valores de alcance máximo se imprimen en *cajas de texto no editable* en el panel titulado '*Datos de salida*' (ver figura 3), para encontrarlos simplemente se buscó la posición en la que la velocidad se hace cero después de haber iniciado el movimiento. Para calcular los valores de aceleración se programaron las ecuaciones (8) y (10). Por último se programaron dos '*Radio Button*' que se encuentran en la parte inferior del panel '*Datos de entrada*', los cuales permiten elegir entre la respuesta para la velocidad y para la aceleración (ver figura 3), y se genera la aplicación DinamicaAvalanchas 1.0, una para Windows y otra para Mac OS mediante el *Deploy Tool* de Matlab.

2.3.1 Análisis de sensibilidad del método numérico

Para la solución de las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias se aplica el método de Runge Kutta de cuarto orden. Se pone a prueba la convergencia del método numérico haciendo variar el paso de tal forma que se pueda analizar cualquier tipo de anomalía en la respuesta. En teoría se supone que si el análisis es consistente la tendencia de las ecuaciones diferenciales debe mejorar o por lo menos mantenerse igual; si por el contrario la tendencia varía entre un análisis y otro eso representaría irremediablemente la imposibilidad del método para resolver las ecuaciones para cierta y determinada exactitud. Se analizó la respuesta numérica y la respuesta analítica considerando esta última como la respuesta teórica de referencia para ver qué tan exacto es el método numérico. Se llevó a cabo el análisis con datos arbitrarios para todas las situaciones en consideración a excepción del caso en que se involucra la fuerza de turbulencia en combinación con una trayectoria curvilínea; las pruebas se hicieron con distancias horizontales (Δx) de 1 m , 0.1 m y 0.01 m , se revisó cada modelo para examinar el error o la dispersión de los datos, finalmente cuando se compararon los modelos

únicamente friccionantes tienen un error típico del orden de $10^{-16} m/s$ para la velocidad, en cambio los modelos de turbulencia manifiestan un error típico del orden de $10^{-5} m/s$.

Caso 1: paso de 1 m

Caso 1a: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resustiva) en una superficie recta inclinada con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta = 23.65^\circ$

Figura 29. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1a

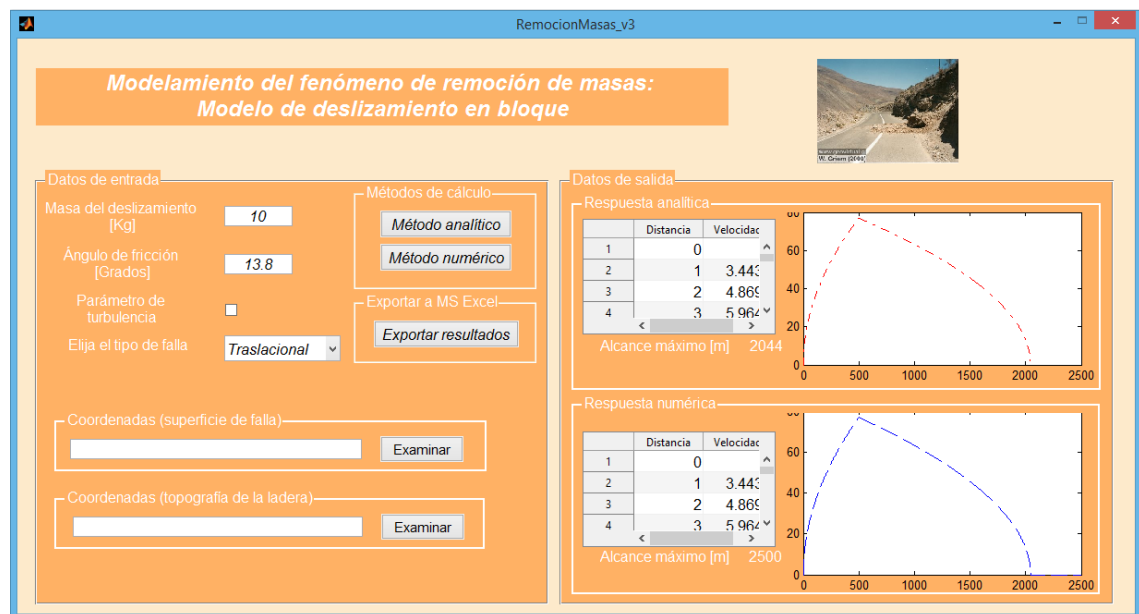
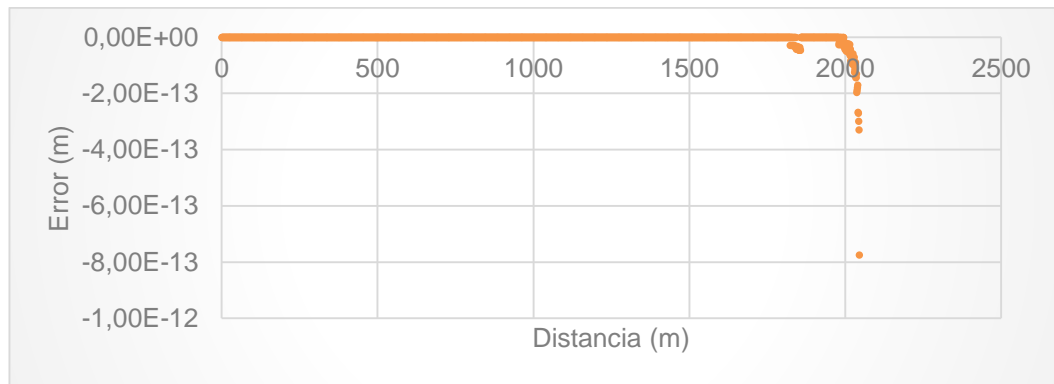


Figura 30. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1a



Para el modelo únicamente friccionante encontramos que la respuesta numérica da mayor que la respuesta analítica, por lo tanto la respuesta numérica en este caso sobreestima la velocidad. La diferencia está casi al final con $-7.74 * 10^{-13} \text{ m/s}$, lo que quiere decir que es bastante exacto.

Caso 1b: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada con $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 400 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 31. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1c

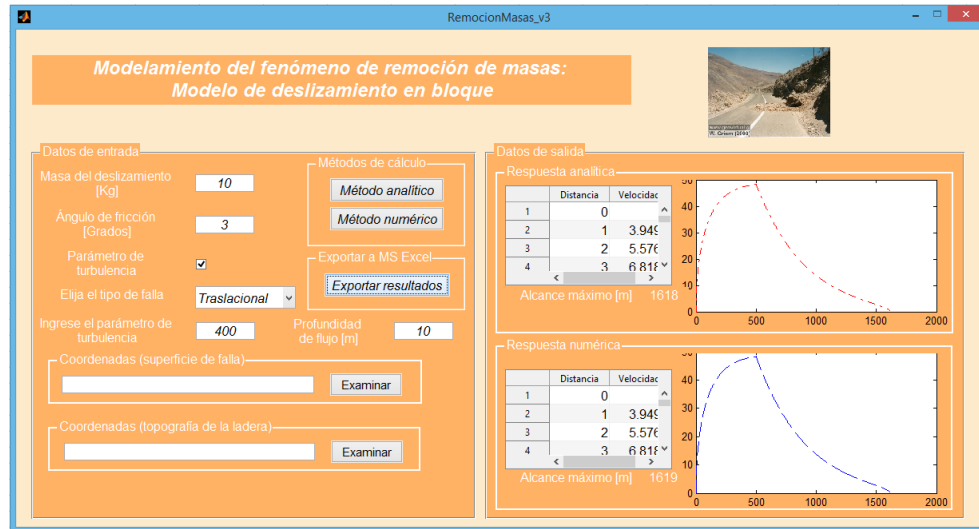
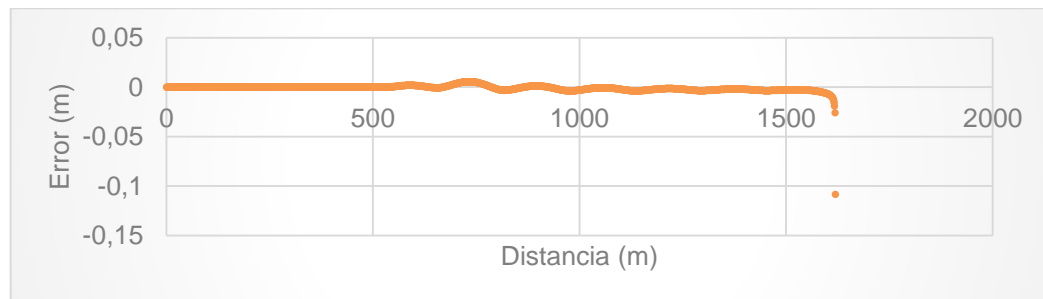


Figura 32. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1b



Caso 1c: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada, la idea en este caso es analizar la sensibilidad al variar el parámetro de turbulencia, en esta ocasión se tiene $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 200 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 33. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1c

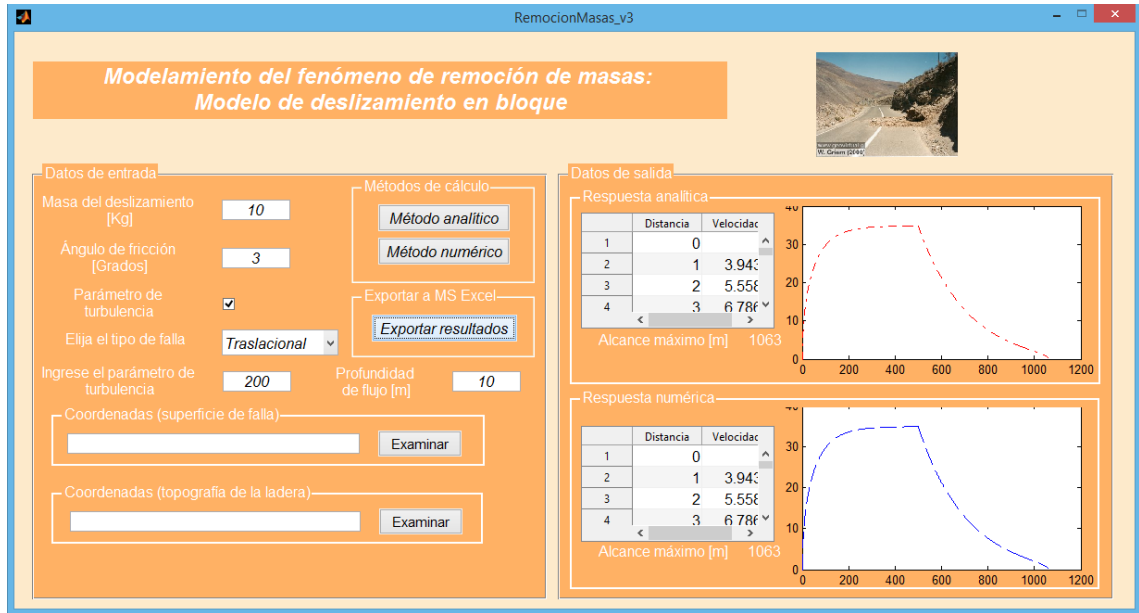
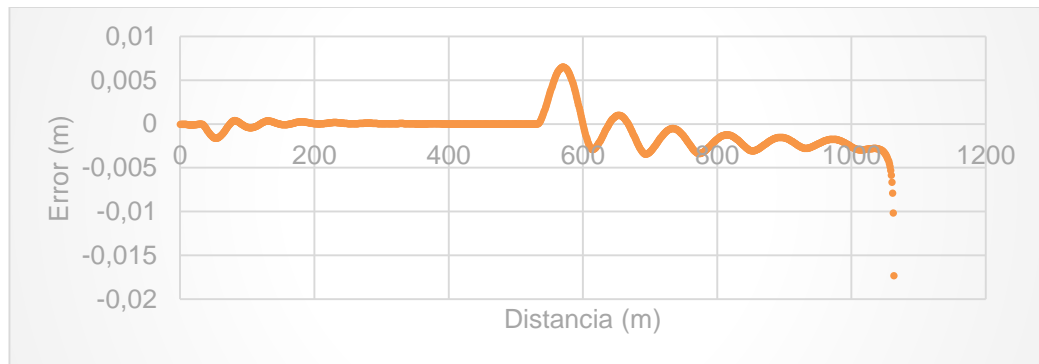


Figura 34. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1c



Caso 1d: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resistiva) en una superficie curva con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta \equiv variable$

Figura 35. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 1d

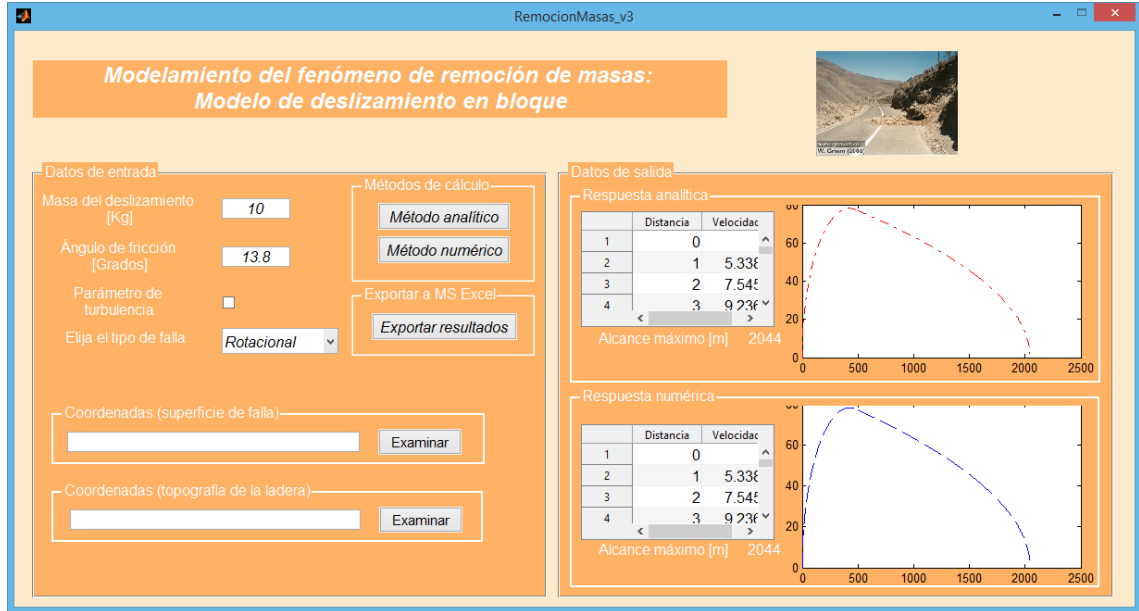
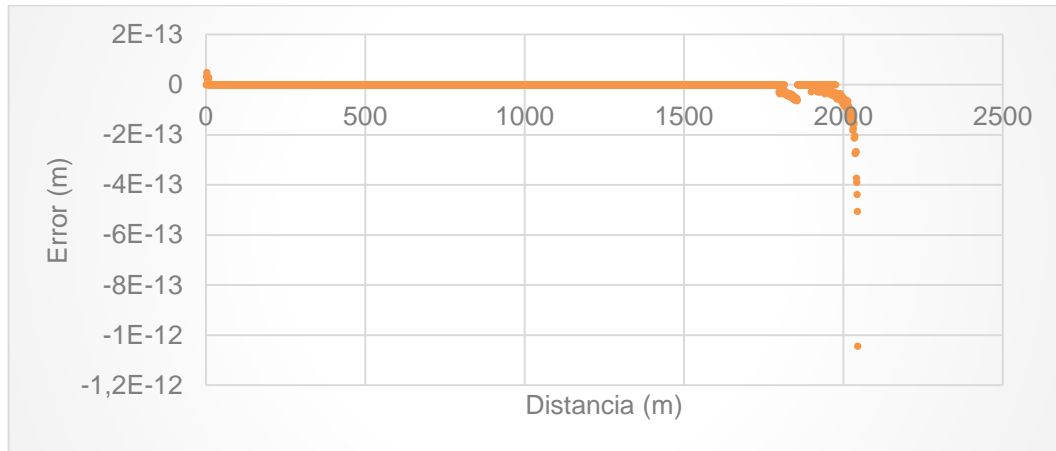


Figura 36. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 1d



Caso 2: Paso de 0.1 m

Caso 2a: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resustiva) en una superficie recta inclinada con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta = 23.65^\circ$

Figura 37. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2a

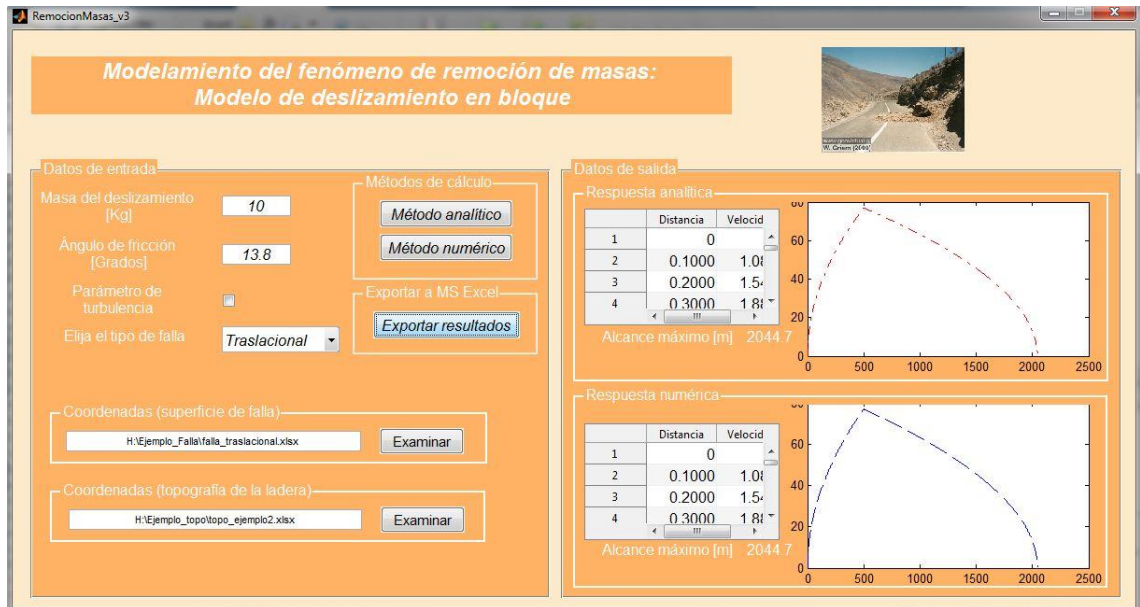
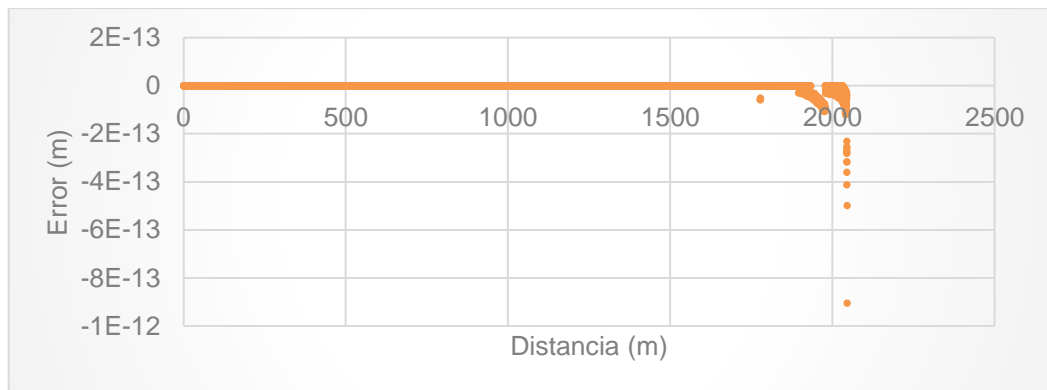


Figura 38. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2a



Caso 2b: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada con $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 400 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 39. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2b

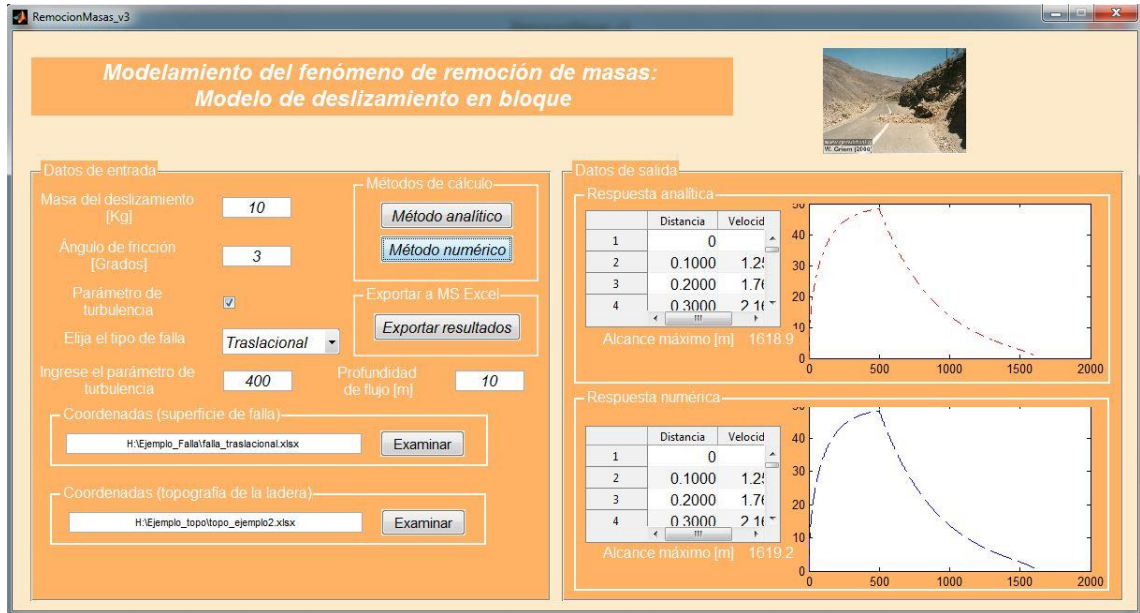
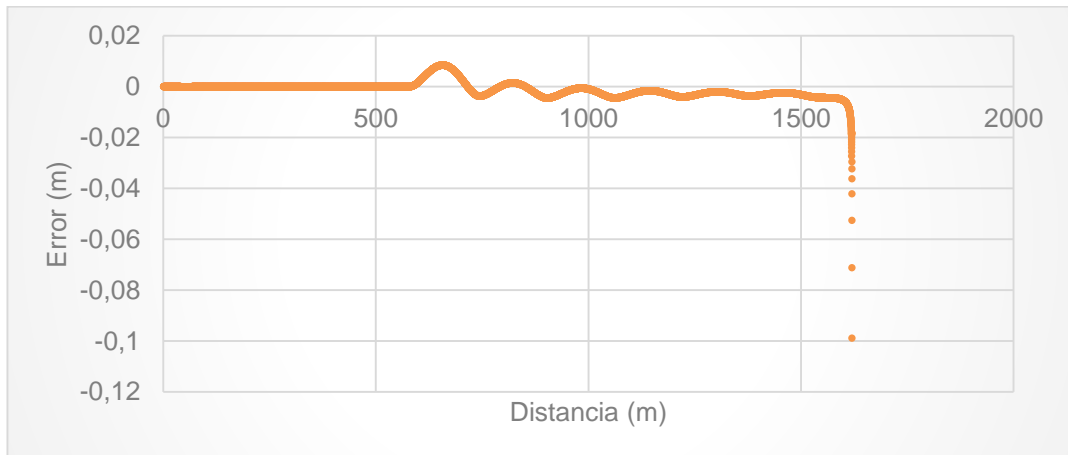


Figura 40. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2b



Caso 2c: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada, la idea en este caso es analizar la sensibilidad al variar el parámetro de turbulencia, en esta ocasión se tiene $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 200 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 41. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2c

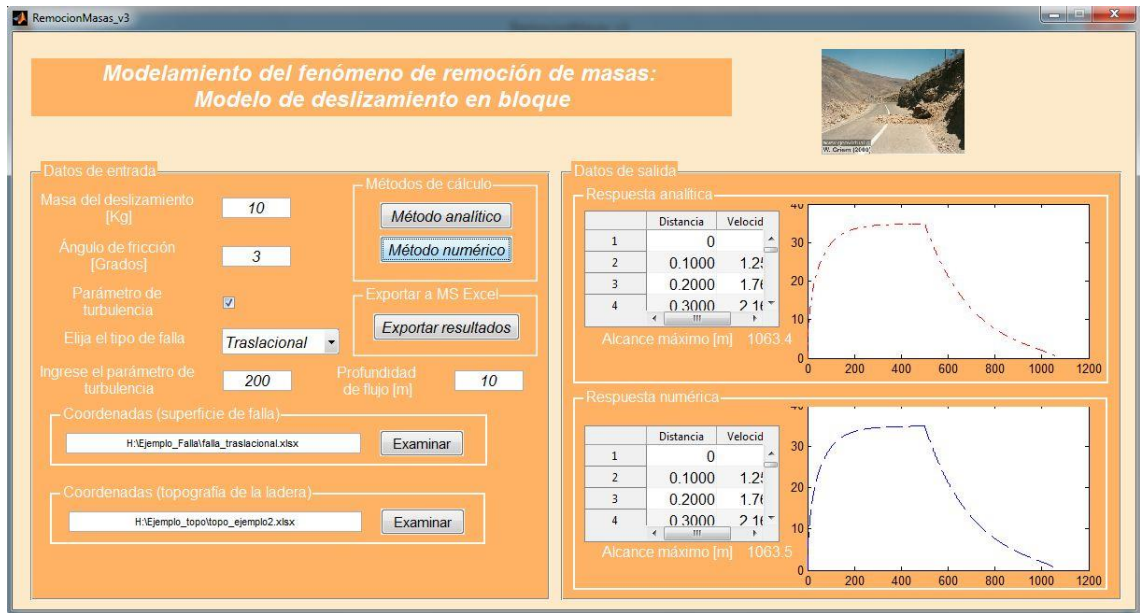
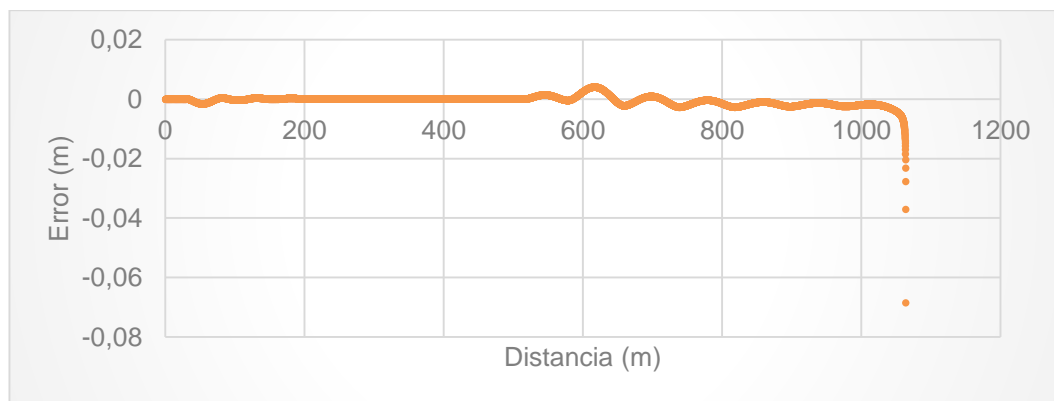


Figura 42. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2c



Caso 2d: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resistiva) en una superficie curva con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta \equiv variable$

Figura 43. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 2d

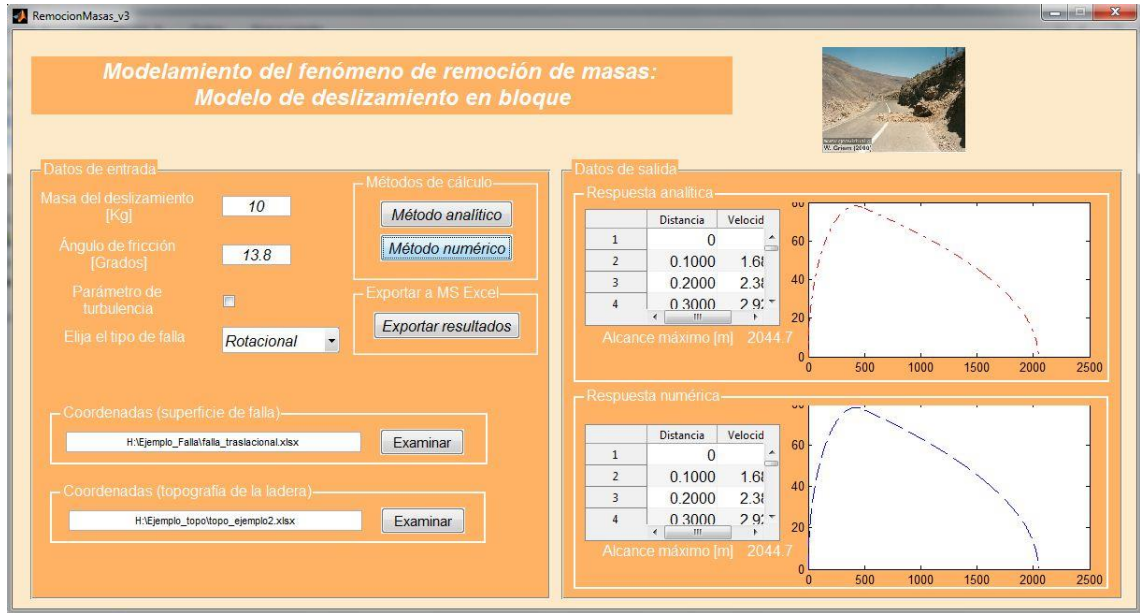
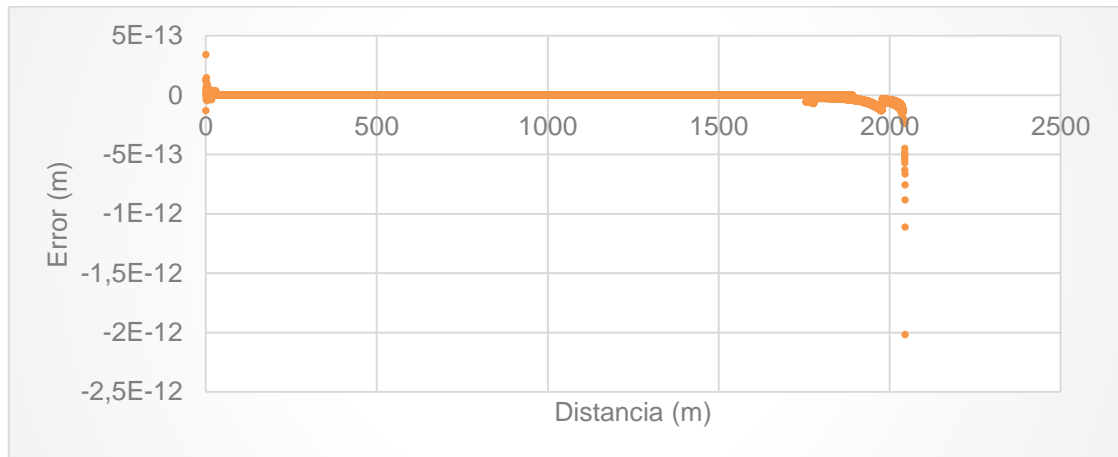


Figura 44. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 2d



Caso 3: Paso de 0.01 m

Caso 3a: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resustiva) en una superficie recta inclinada con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta = 23.65^\circ$

Figura 45. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 3a

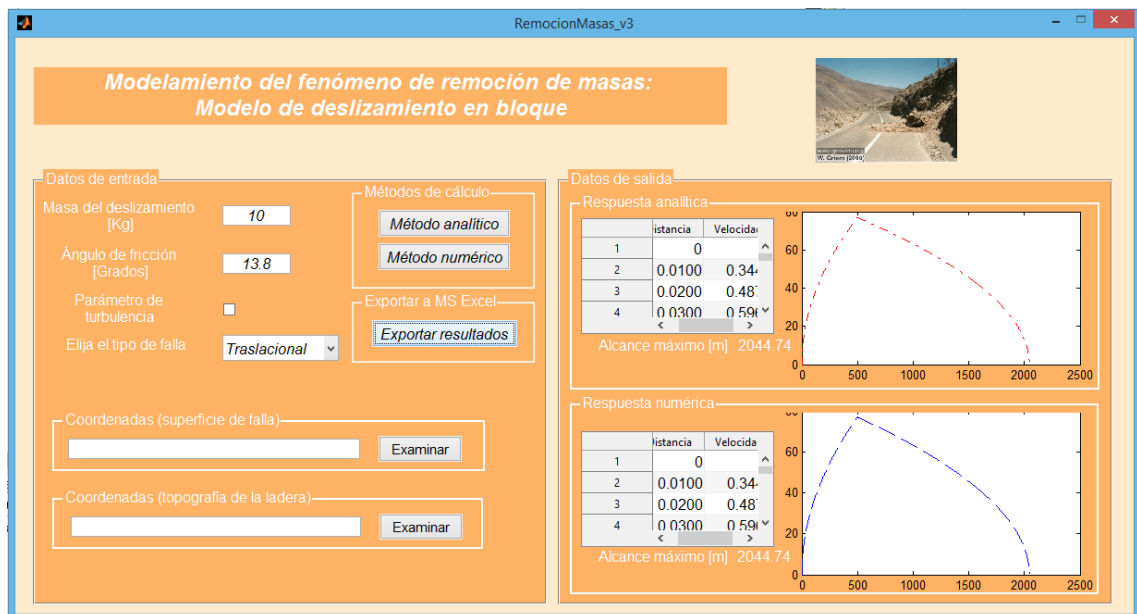
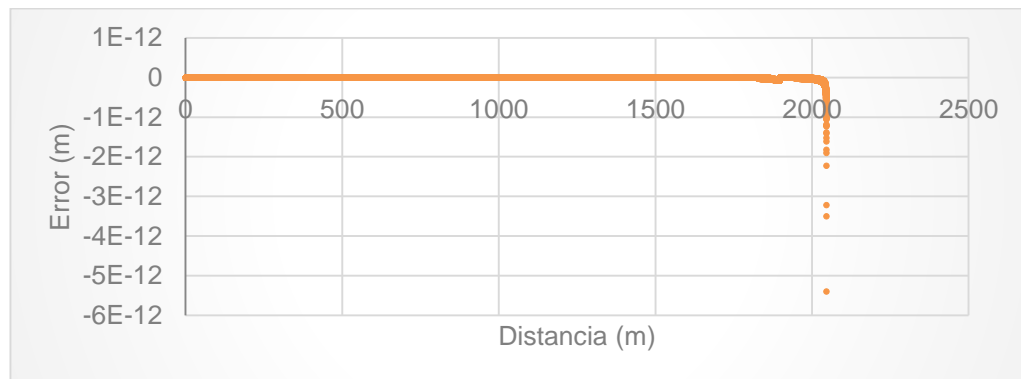


Figura 46. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3a



Caso 3b: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada con $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 400 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 47. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 3b

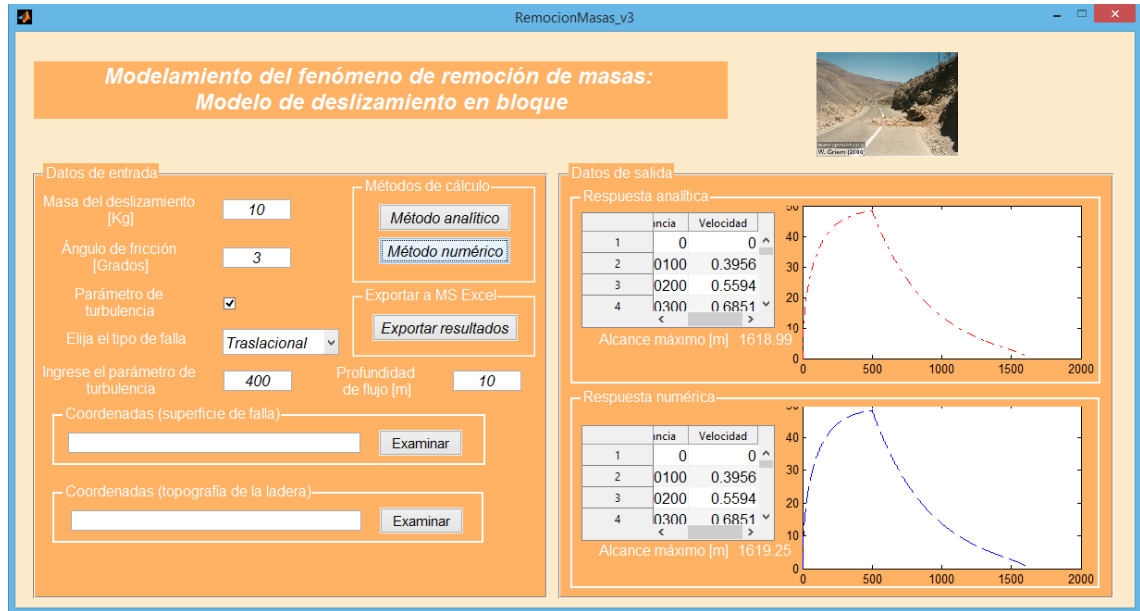
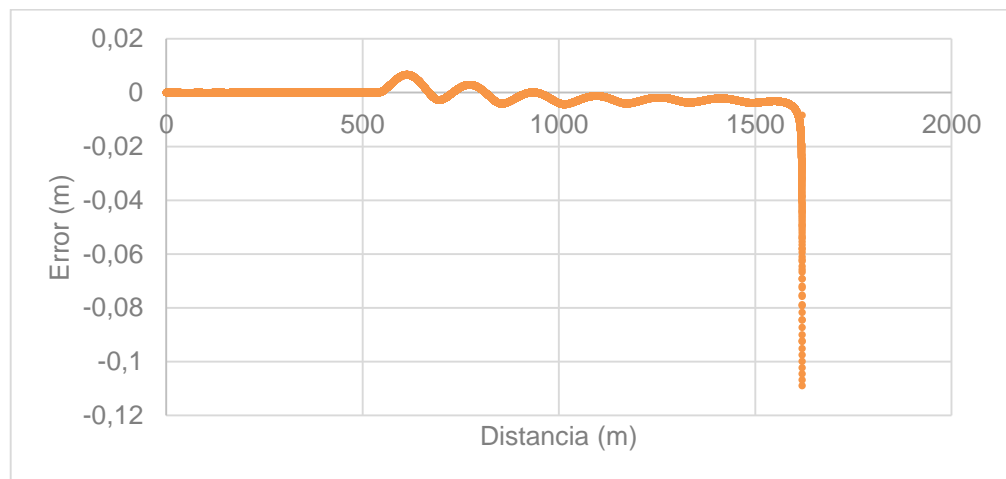


Figura 48. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3b



Caso 3c: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo de fricción y turbulencia (fricción de Coulomb y turbulencia como fuerzas resistivas) en una superficie recta inclinada, la idea en este caso es analizar la sensibilidad al variar el parámetro de turbulencia, en esta ocasión se tiene $\phi = 3^\circ$, $\beta = 23.65^\circ$, $\xi = 200 \text{ m/s}$, $h = 10 \text{ m}$.

Figura 49. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 3c

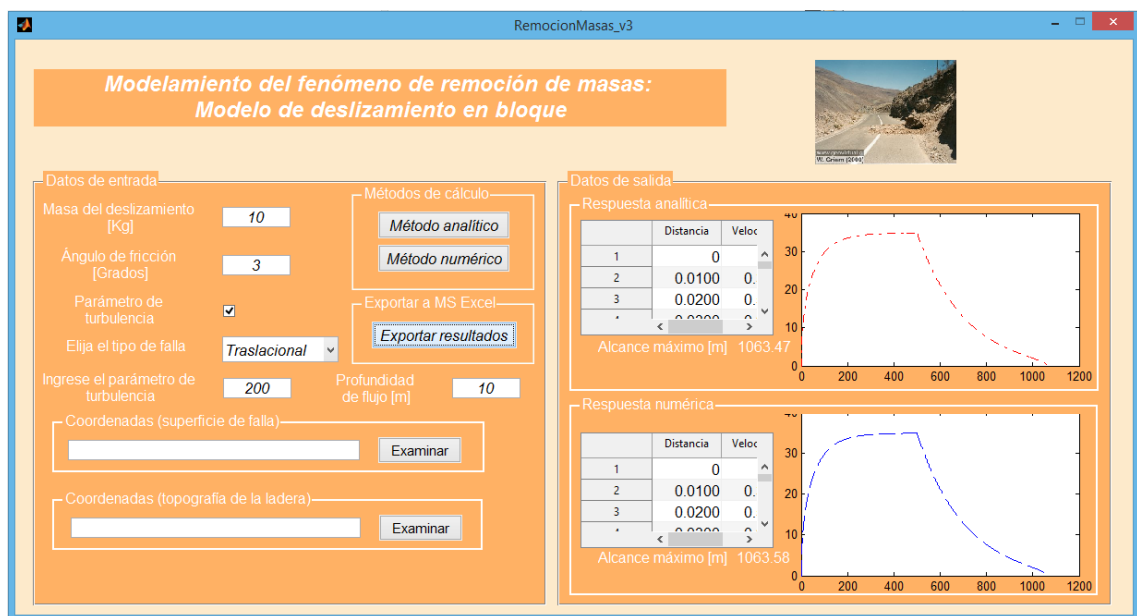
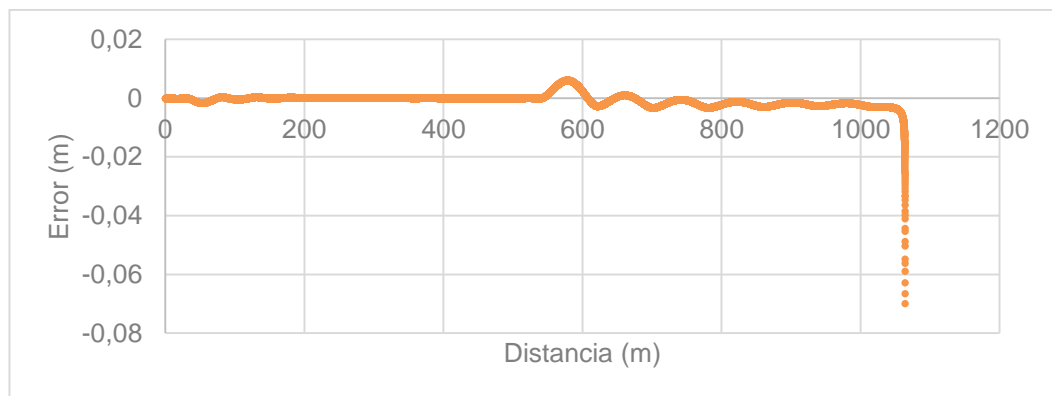


Figura 50. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3c



Caso 3d: Se analiza la convergencia del método numérico con el modelo únicamente friccionante (fricción de Coulomb como única fuerza resistiva) en una superficie curva con $\phi = 13.8^\circ$ y $\beta \equiv variable$

Figura 51. Análisis del modelo únicamente friccionante en la aplicación 'DinamicaAvalanchas v1.0' para el caso 3d

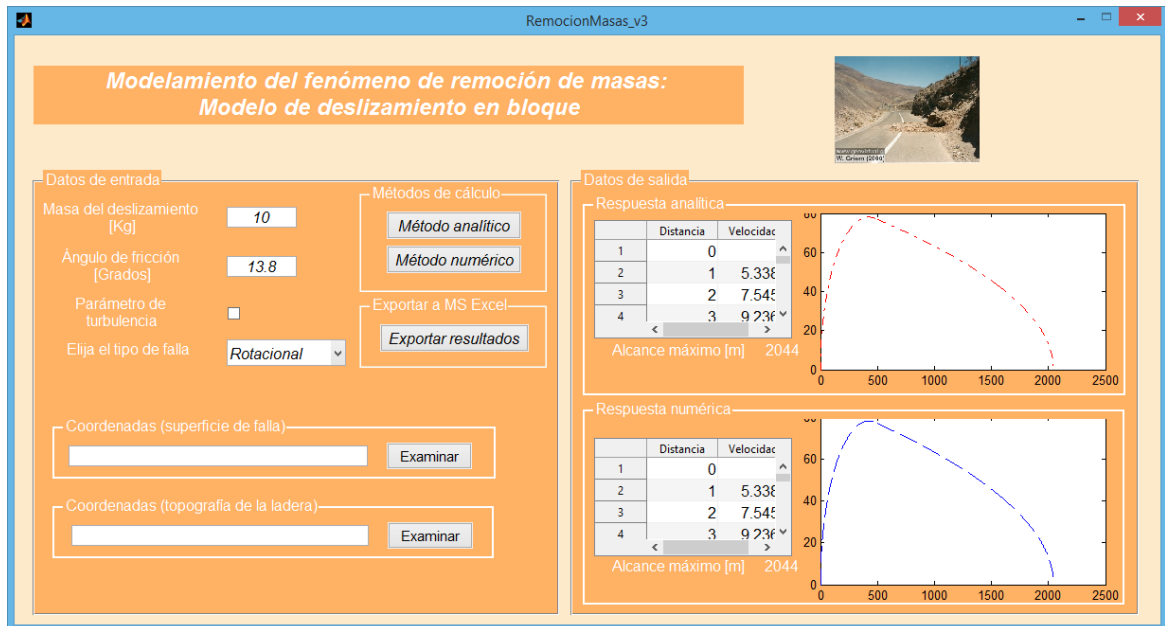
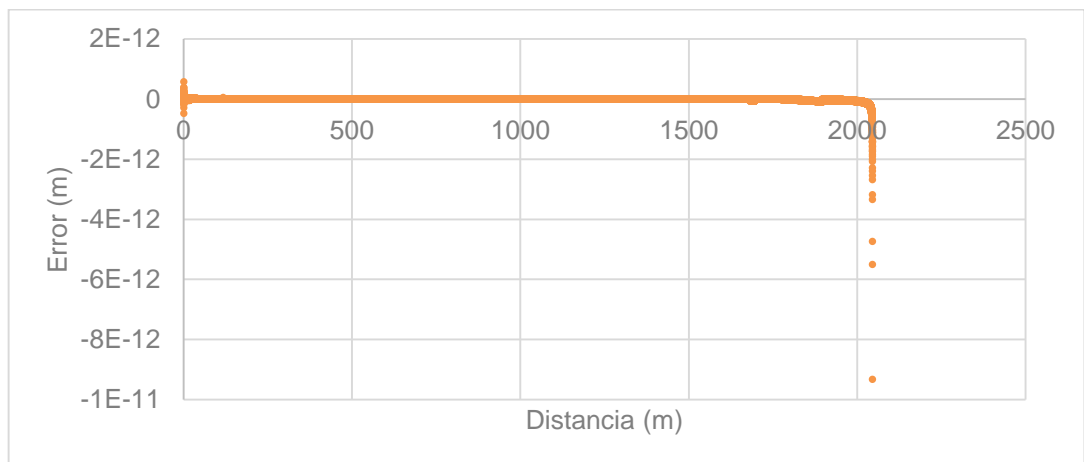


Figura 52. Error absoluto en m/s entre la solución analítica y la solución numérica para el caso 3d



2.4 COMPARACIONES CON UN DESLIZAMIENTO REAL

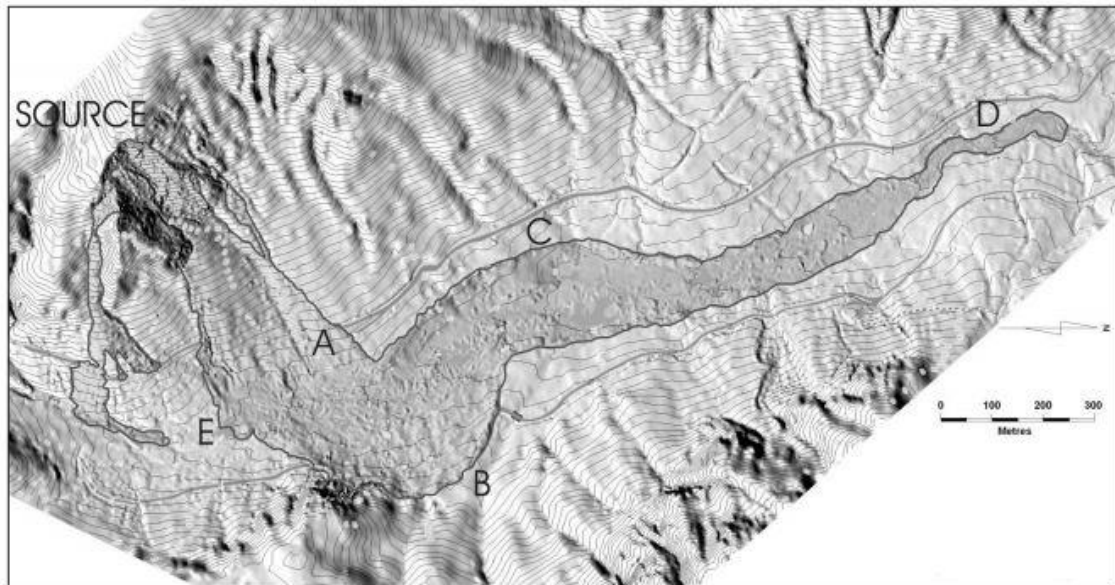
Hungr y Evans en 2004 [12] explican varias hipótesis del por qué ocurren los deslizamientos y describen el derrumbe ocurrido en abril de 1999 en el río Nomash, el cual es un pequeño arroyo en la parte occidental de las montañas insulares, a 20 kilómetros tierra adentro desde la costa exterior de la isla Vancouver perteneciente a la provincia de Columbia Británica, Canadá, el cimiento de la zona se compone de piedra caliza cristalina. Las rocas se movilizaron originalmente al lado izquierdo del valle como se muestra en la figura 4, arrastrando grandes cantidades de suelo, luego los desechos se trasladaron siguiendo el cauce del río.

Figura 53. Parte media de la trayectoria de deslizamiento del río Nomash; el desprendimiento de masa se originó en la esquina superior izquierda de la foto



Fuente: Landslide Prediction offset Oldrich Hungary and Scott McDougall, Sciences University of British Columbia land and ocean.

Figura 54. Plano de la ruta de deslizamiento y depósito de tierra del río Nomash mostrando lugares mencionados en el texto. El espaciado de cuadrícula es de



200 m en ambas direcciones y el intervalo de contorno es de 10 m

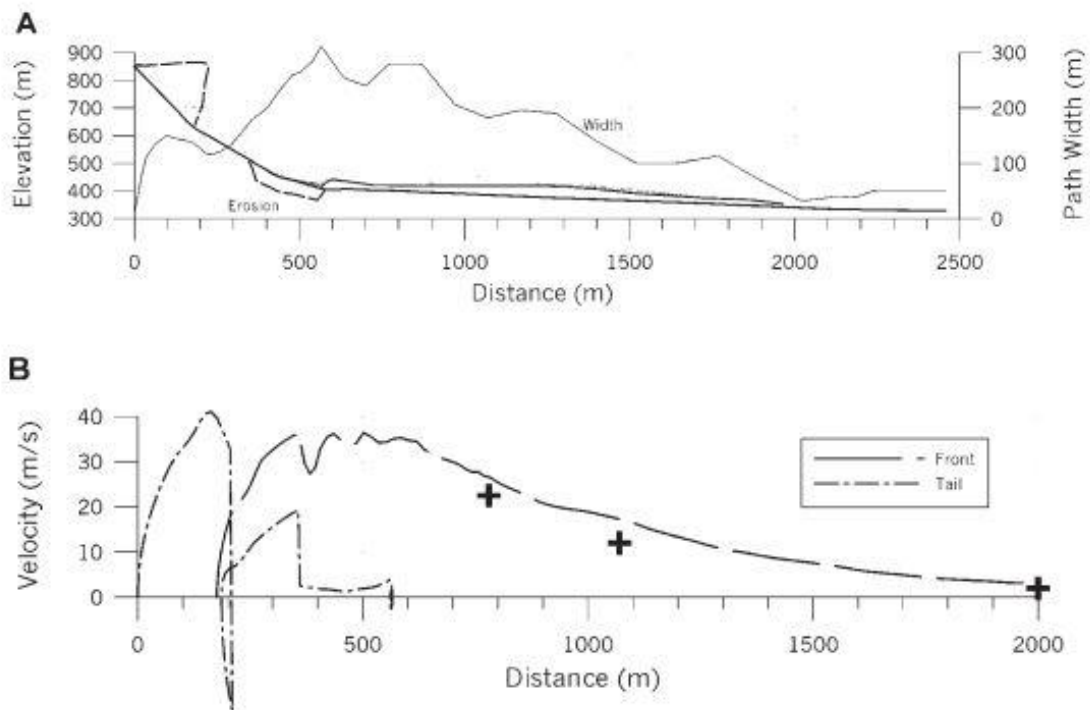
Fuente: “Entrainment of debris in rock avalanches: An analysis of a long run-out mechanism” por Hungr, O. y Evans, S.G. (2004)

Es importante resaltar que el mapeo no determina la profundidad de flujo, en consecuencia la velocidad del deslizamiento se estimó a través de la ecuación de flujo de curvas [13] $v = \sqrt{Rg \tan \beta}$ Donde v es la velocidad de flujo media estimada, R es el radio de la línea de corriente central del flujo derivado de un mapa de las observaciones en campo y β es el ángulo transversal entre las líneas de corte que define el límite de la trayectoria de flujo.

Utilizando la ecuación de flujo para hallar las velocidades de las ubicaciones B, C y D de la figura 5, se consiguió que en la zona C se estima una velocidad de

12 (m/s), en cambio en la zona D el peralte del flujo era apenas medible al final de las dos curvas, lo que indica que la velocidad ahí había decaído a menos de 2 (m/s), por último en la zona B no podía aplicarse la ecuación porque el margen izquierdo del flujo a través de la curva no se pudo determinar, en su lugar, una fórmula de período previo derivada de la conservación del momento por Hungr et al. (1984) [14] se aplicó a una proyección del centro del flujo al punto más alto del margen derecho del flujo ubicado en B, allí se obtuvo una velocidad de 22.5 (m/s).

Figura 55. Resultados de los análisis dinámicos del río Nomash. A) Perfiles de flujo en intervalos de 10s (Todas las profundidades exageradas x10) B) Perfiles de velocidad, con estimaciones de velocidad en las ubicaciones B, C y D indicadas por cruces



Fuente: "Entrainment of debris in rock avalanches: An analysis of a long run-out mechanism" por Hungr, O. y Evans, S.G. (2004)

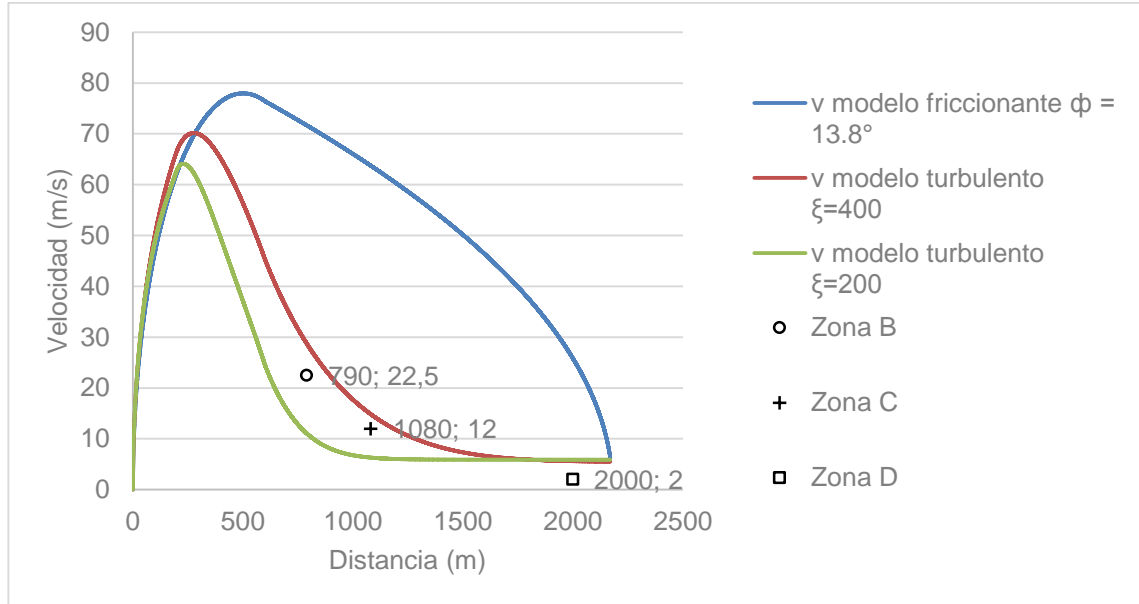
El deslizamiento de Nomash termina a 2270 *m* de distancia y 560 *m* por debajo de la corona de deslizamiento aproximadamente, con velocidades que exceden los 20 (*m/s*), las cuales pueden formar pendientes mayores de 30°[9]. Hungr y Evans comentan que la dinámica en un deslizamiento de escombros implica el intercambio de momento entre la masa de roca y el material arrastrado a lo largo del camino, el aparente aumento de la movilidad con el volumen, también se puede explicar puesto que grandes eventos cubren un área más grande y por lo tanto tienen una mayor oportunidad de llegar a depósitos más amplios.

Con la finalidad de probar las diferentes metodologías se confrontan los datos de los resultados de distancia y velocidad del caso de deslizamiento real del río Nomash exhibidos en la figura 6 con las soluciones numéricas entregadas por Matlab.

3 RESULTADOS

A partir de la programación del método numérico se ejecuta la aplicación para tres pruebas distintas con el fin de constatar el comportamiento de los sistemas sin fricción turbulenta, es decir considerando fricción de Coulomb únicamente, y con fricción turbulenta, considerando una fuerza resistiva adicional proporcional al cuadrado de la velocidad; la primera prueba se realiza con el modelo únicamente friccionante asumiendo el ángulo de fricción constante, tomando su valor como el valor del fahrböschung [4] dado por Hungr en el 2004 para este deslizamiento como $\phi=13.8^\circ$, la segunda prueba se realiza con el modelo de fricción turbulenta asumiendo un parámetro de turbulencia $\xi=400 \text{ m/s}^2$, y un ángulo de fricción $\phi=2.84^\circ$ y la tercera prueba corresponde al mismo modelo con parámetro de turbulencia $\xi=200 \text{ m/s}^2$ y ángulo de fricción $\phi=2.23^\circ$. Análogamente se alimenta el modelo con los datos del perfil longitudinal de la ladera, el cual actúa como la ruta que recorre el bloque. Al correr la aplicación arrojó datos de velocidad versus distancia horizontal y se exportaron a MS Excel; los datos obtenidos se exponen mediante la elaboración de una gráfica donde se muestra el desarrollo de la velocidad durante el deslizamiento.

Figura 56. Velocidad de las tres series de prueba y puntos de velocidad tomados en campo del deslizamiento del rio Nomash



El modelo con fricción de Coulomb (línea azul) presenta una sobreestimación notable de la velocidad, esto debido a la ya nombrada simplicidad del modelo que considera únicamente fricción de Coulomb como fuerza resistiva; por otro lado los valores de velocidad disminuyen drásticamente con la aplicación de la fricción turbulenta en el modelo de deslizamiento. El modelo que más se aproxima a los valores hallados en campo, de velocidad, es el que utiliza el parámetro de turbulencia $\xi = 400 \text{ m/s}^2$, sin embargo el modelo con $\xi = 200 \text{ (m/s}^2)$ decrece más rápido y tiene una curvatura más pronunciada. Se observa que el prototipo con mayor coeficiente turbulento produce velocidades más altas, como respuesta a la relación directamente proporcional entre la turbulencia y la velocidad.

Tabla 1. Velocidades del modelo de deslizamiento en bloque y las encontradas en campo (Hungry y Evans en 2004)

Dist. [m]	Velocidades [m/s]			
	En campo	Modelo friccionante	Modelo turbulento $\xi = 400 \text{ m/s}^2$	Modelo turbulento $\xi = 200 \text{ m/s}^2$
790	22,50	71,68	28,74	11,06
1080	12,00	63,77	14,88	6,30
2000	2,00	25,83	5,60	5,89

Se deben considerar los errores del método numérico puesto que en sí, el propio método tiene cierto error para calcular la ecuación, por esa razón la verdadera curva de velocidad puede que esté por debajo o por encima de la curva del método numérico, el cual no es tan exacto precisamente cuando hay turbulencia como se especifica en los análisis de sensibilidad.

Tabla 2. Errores absolutos entre las velocidades del modelo de deslizamiento en bloque y las encontradas en campo

Medida en campo	Error absoluto		
	Modelo friccionante	Modelo turbulento $\xi = 400 \text{ m/s}^2$	Modelo turbulento $\xi = 200 \text{ m/s}^2$
22.5	49.18	6.24	11.44
12	51.77	2.88	5.7
2	23.83	3.6	3.89

Los ensayos de exactitud del método numérico ya arrojan errores no tan despreciables con modelos turbulentos que comprenden un β constante, en caso de que el ángulo de la inclinación de la pendiente fuese variable es decir el bloque deslizándose sobre una trayectoria curva es posible que se enfrenten grandes fallos que afecten de cualquier forma la respuesta.

4 DISCUSIÓN

Se deben construir algunas leyes teóricas desde la ecuación básica de la dinámica hasta algunas extensiones en la hidromecánica para el cálculo de la energía en flujos con densidad constante. La gravedad de proponer estos fundamentos físicos es que en teoría son incapaces de modelar sistemas dispersos. Dado que los deslizamientos son un fenómeno poco visto es necesario ganar experiencia en este tipo de ocurrencias. Los flujos de masa en estado no estacionario de grandes deslizamientos y avalanchas pueden ser calculados con cierta aproximación por secciones durante su caída y en principio solo se requieren cálculos computacionales para obtener los resultados.

Se han explicado dos modelos teóricos: El modelo simple del bloque de fricción, el cual muestra una línea de energía cuya pendiente depende del ángulo de alcance (*fahrböschung*); este modelo puede describir bien la fase inicial del deslizamiento de masas [9]. El modelo de flujo turbulento muestra una línea de energía curva. Para un primer análisis de un movimiento de tierra ya medido, se deben establecer sus parámetros y en principio se pueden mantener constantes en toda la trayectoria, posteriormente se puede hacer un cálculo por secciones que permita variar tales parámetros y poder explicar el fenómeno con más rigor.

La experiencia con el problema estático parece ser contradictoria debido a los bajos valores del coeficiente de fricción encontrados en el problema dinámico, por ejemplo Scheller en 1970 [15] prestó atención al pequeño tamaño de la magnitud de la fuerza de fricción de Coulomb; lo observó en la mezcla de aire, sólidos y líquidos, específicamente en la técnica de concreto lanzado. El aire atrapado da un efecto de flotabilidad según Kent (1966) [16].

La pregunta crucial es por qué los grandes deslizamientos alcanzan rápidamente grandes velocidades, o por qué pierden tan rápidamente su esfuerzo cortante

resistente. La experiencia muestra que la fricción interna disminuye a valores mínimos cuando grandes masas entran en movimiento.

Finalmente, el modelo intenta responder preguntas puntuales para las cuales puede ser apropiado, como cuál es la velocidad y el alcance de una masa deslizante. Una de las condiciones para la similitud de los procesos en el modelo y en la naturaleza es la igualdad entre la línea de energía que predice el modelo y la línea de energía del deslizamiento real; esta condición puede cumplirse en algunas circunstancias.

Se deben tener en cuenta las demás propiedades reológicas que caracterizan los deslizamientos de tierra no estudiadas en el presente artículo y la naturaleza del material formado en el camino debido al arrastre. Los deslizamientos de tierra son complejos, pero las predicciones son posibles si se proponen múltiples simplificaciones como en el modelo existente de deslizamiento en bloque, conocer que tan efectivo es este modelo en la realidad implica su verificación y calibración por medio de diversas confrontaciones con derrumbes reales las cuales plasmen su semejanza y sus efectos prácticos.

5 INVESTIGACIONES FUTURAS

El trabajo investigativo por realizar es bastante extenso y abarca desde la formulación de nuevos modelos matemáticos hasta la creación de modelos experimentales y observaciones en campo. El siguiente modelo analítico de estudio es el que describe el movimiento en dos dimensiones; el primero de estos modelos analíticos se basó en la reología de Bingham, en la cual la resistencia al cortante está determinada por la profundidad de flujo h , un límite de elasticidad constante, y un término lineal de la viscosidad con reología de Bingham η . Posteriormente Trunk et al (1986) modificaron una formulación bidimensional de diferencias finitas para un flujo laminar con el fin de tener en cuenta dos viscosidades, una que se aplica hasta el límite de elasticidad y otra más pequeña aplicada sobre el límite de elasticidad, para aproximar la reología de Bingham. La ventaja de utilizar una formulación 2-D es que se puede derivar la distribución de velocidad vertical y la estratigrafía de los depósitos.

En cuanto a los modelos experimentales se trata de recrear el fenómeno real a una escala diferente y con diversas aproximaciones, principalmente intentando controlar todas las variables que influyen en el desplazamiento. Hutter et al (1995) describieron varios montajes experimentales en los que emplearon partículas de vidrio y de polímero (vestolen) como material poco cohesivo y friccionante que se desliza sobre una superficie con un tramo inclinado y un tramo recto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMPOS, Ana, DÍAZ, Carolina, RUBIANO, Diana Marcela, COSTA, Carlos Rufino y RAMÍREZ, Fernando. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Bogotá: Banco mundial, 2012. 436 p.
- [2] FINLAY, P.J., MOSTYN, G.R. y FELL, R. Landslide risk assessment: prediction of travel distance. En: Canadian Geotechnical Journal. Septiembre, 1999. vol. 36, no. 4, p. 556–562.
- [3] HUNGR, Oldrich, COROMINAS, James y EHERHARDT, E. Landslide Risk Management. En: Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. 1 ed. Columbia Británica: Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), 2005. p. 99-128.
- [4] HEIM, Alberth. Bergsturz und Menschenleben. En: Fretz and Wasmuth Verlag. Zürich, 1932. 218 p.
- [5] SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John W. Física para Ciencias e Ingeniería. 7 ed. México DF: Mc Graw Hill, 2009. p. 164-185.
- [6] COULOMB, Charles. Théorie des machines simples. En: Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec Mémoires de Mathématique et de Physique. Paris, 1781. p. 161-332.
- [7] DAI, F.C., LEE C.F. y NGAI, Y.Y. Landslide risk assessment and management: an overview. En: Engineering Geology. Abril, 2002. vol. 64, no. 1, p. 65–87.

- [8] KÖRNER, H.J. Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und fleisschnee-lawinen. En: Rock Mechanics. Septiembre, 1976. vol. 8, no. 4, p. 225-256.
- [9] VOELLMY, A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. En: Schweizerische Bauzeitung. Noviembre, 1955. vol. 73, no. 15, p. 212-285.
- [10] HUTCHINSON, J.N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En: 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland. A.A. Balkema. Junio, 1988. vol. 1, p. 3-35.
- [11] SASSA, K. Geotechnical model for the motion of landslides. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland. A.A. Balkema. Junio, 1988. vol. 1, p. 37-55.
- [12] HUNGR, Oldrich y EVANS, S.G. Entrainment of debris in rock avalanches; an analysis of a long run-out mechanism. En: GSA Bulletin, Geological Society of America. Septiembre, 2004. vol. 116, no. 10, p. 220-233.
- [13] CHOW, Venn T. Open Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1957. 400 p.
- [14] HUNGR, Oldrich y MORGENSTERN, N.R. Experiments in high velocity open channel flow of granular materials. En: Géotechnique. Septiembre, 1984. vol. 34, no. 4, p. 405–413.
- [15] SCHELLER, Erwin. Geophysikalische Untersuchungen zum Problem des Taminser Bergsturzes. En: ETH Zürich. Abril, 1970. no. 4560, p. 125-137.

[16] KENT, P.E. The Transport Mechanism in Catastrophic Rock Falls. En: Journal Geology. Julio, 1966. vol. 74, no. 2, p. 79-83.

BIBLIOGRAFÍA

AZZONI, A., LA BARRERA, G. y ZANINETTI, A. Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. En: Rock Mechanics. Septiembre, 1995. vol. 32, no. 5, p. 709-724.

FANNIN, R.J. y WISE, M.P. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. En: Canadian Geotechnical Journal. Noviembre 2001. vol. 38, no. 7, p. 982-994.

GEERTSEMA, M., HUNGR, O., SCHWAB J.W. y EVANS, S.G. Large rock slide – debris avalanche at Pink Mountain, northeastern British Columbia, Canada. En: Engineering Geology. Abril, 2006. vol. 83, no. 1, p. 64-75.

HUNGR, Oldrich y EVANS, S.G. Rock avalanche and runout prediction using a dynamic model. 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway. Junio 1996. vol. 1, p. 233-238.

HUNTER, G. & FELL, R. Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes. En: Canadian Geotechnical Journal. Octubre, 2003. vol. 40, no. 6, p. 1123-1141.

HUTTER, K., KOCH, T., PLÜSS, C. y SAVAGE, S.B. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part II. Experiments. En: Acta Mechanica. Abril, 1995. vol. 109, no.2, p. 127-165.

HUTTER, K. y SAVAGE, S.B. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I. Analysis. En: Acta Mechanica. Abril, 1991. vol. 86, no. 2, p. 201-223.

NEWTON, Isaac. Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world. En: Book I. Berkeley: University of California Press 1934. p. 1-29

SOUSSA, J. y VOIGHT, B. Continuum simulation of flow failures. En: Geotéchnique. Septiembre, 1991. vol. 41, no. 4, p. 515-538.

TRUNK, F.J., DENT J.D. y LANG, T.E. Computer modelling of large rockslides. En: Journal of the Geotechnical Division. Septiembre, 1986. vol. 112, no. 4, p. 348-360.

VOIGHT, B. y SOUSSA, J. Lessons from Ontakesan: A comparative analysis of debris avalanche dynamics. En: Engineering Geology. Julio, 1994. vol. 38, no. 2, p. 261-297.

ZILL, Dennis G. Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones de modelado. En: Capítulo 2. 6 ed. México DF: International Thomson Editores, 2004. p. 52-62.