



TÉSIS DE MAESTRÍA

Análisis de aplicabilidad y desempeño de modelos de base física para la modelación de debris flow en una cuenca tropical de montaña

Author:
María Isabel Hurtado O.

Supervisor:
Johnny Alexander Vega G.
César Augusto Hidalgo M.

*Tesis de grado entregada como requisito para optar
por el título de Magíster en Ingeniería Civil*

en el programa de

Maestría en Ingeniería Civil

22 de julio de 2023

Declaración de propiedad

Yo, María Isabel Hurtado O., declaro que esta tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, titulada, «Análisis de aplicabilidad y desempeño de modelos de base física para la modelación de debris flow en una cuenca tropical de montaña» y el trabajo presentado en ella son de mi autoría. Confirmando que:

- Éste trabajo se realizó en su totalidad durante la candidatura al grado de Magíster en Ingeniería Civil en modalidad Investigación en esta universidad.
- El trabajo publicado por otros, que haya sido usado para este documento, ha sido debidamente referenciado.
- Donde haya citado el trabajo de otros, la fuente siempre fue dada. Con la excepción de tales citas, esta tesis es enteramente mi propio trabajo.
- He reconocido y dado crédito a las principales fuentes de ayuda.
- He dado el reconocimiento al trabajo de otros que contribuyeron al desarrollo de este documento.

Firma:

Fecha:

«La historia de la civilización es, en cierto sentido, la historia de la ingeniería: esa larga y ardua lucha por hacer que las fuerzas de la naturaleza trabajen para el bien del hombre.»

Lyon Sprague DeCamp

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Resumen

Facultad de Ingenierías
Maestría en Ingeniería Civil

Magíster en Ingeniería Civil

Análisis de aplicabilidad y desempeño de modelos de base física para la modelación de debris flow en una cuenca tropical de montaña

by María Isabel Hurtado O.

Los deslizamientos de tierra son procesos geodinámicos que ocurren con frecuencia en zonas montañosas cuyo comportamiento aún es objeto de estudio dada la variabilidad espacial de los parámetros que los describen. Existen varios tipos de deslizamientos dentro de los que se encuentran los flujos de escombros (*Debris Flow*) que en general son movimientos en masa rápidos en los que tierra suelta, roca y a veces materia orgánica se combinan con agua para formar un lodo que fluye cuesta abajo. Comprender como se comportan estos deslizamientos y cual es el alcance probable que pueden tener es importante dentro de la gestión cuantitativa del riesgo y la planeación del territorio especialmente en zonas donde los centros urbanos están ubicados en las inmediaciones de cadenas montañosas y ambientes tropicales.

En este trabajo se evalúa el desempeño y la aplicabilidad de los modelos de base física RAMMS, Flow R y el módulo GPP de SAGA GIS en la simulación de flujos de escombros en cuencas de alta montaña en ambientes tropicales utilizando como caso de estudio la avenida torrencial producto de una cadena de deslizamientos simultáneos detonados por una fuerte lluvia, que ocurrieron en el año 2015 en el municipio de Salgar, Antioquia, en la cuenca de la quebrada La Liboriana. Múltiples modelaciones se llevaron a cabo para calibrar los modelos de manera que reprodujeran el caso de estudio. A los resultados obtenidos se les realizó un análisis ROC para determinar cuál de todos los modelos fue el mas apropiado o el que mejor logró reproducir los deslizamientos en estudio. En ese sentido, la tasa de aciertos (TPR) para RAMMS fue del 33 %, para Flow R del 35 % y para el módulo GPP de SAGA GIS fue del 56 %. Sin embargo, el AUC para todos los modelos mencionados estuvo alrededor de 0.6, concluyendo que estos resultados obtenidos son conservadores y deben analizarse más allá de la exactitud y precisión de las simulaciones con respecto a lo ocurrido en el caso de estudio. En estudios realizados en la zona, valores similares de AUC fueron obtenidos al comparar las huellas de los deslizamientos reales y las simulaciones, permitiendo concluir que estos resultados son aceptables y la metodología propuesta en esta investigación puede replicarse, con ajustes a la calidad de la información que se utiliza como parámetros de entrada.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi director de tesis, el profesor Johnny Alexander Vega. Ha sido infinita la confianza, el apoyo, la paciencia y sobre todo el deseo de ayudarme en este proceso que emprendí hace 3 años. Como ya se lo he dicho, lo admiro y valoro profundamente el acompañamiento que me ha brindado en todo mi caminar académico. A él siempre gracias, mucho he aprendido y espero que la confianza depositada le haya sido retribuida.

A mi codirector, el profesor César Augusto Hidalgo, agradecerle por el profundo conocimiento que compartió desinteresadamente, por la buena disposición que siempre manifestó para corregir y redireccionar. Sus aportes y puntos de vista sobre este trabajo fueron valiosos y contribuyeron al enriquecimiento del conocimiento que fue desarrollado.

Finalmente, siempre voy a agradecerle a mis papás. Ellos creen en mí más que nadie y me apoyan incondicionalmente. Me han dado la oportunidad de estudiar y de aprender y formarme profesionalmente. Gracias infinitamente.

Este proyecto se desarrolla dentro de los lineamientos y productos del programa de investigación “Vulnerabilidad, resiliencia y riesgo de comunidades y cuencas abastecedoras afectadas por fenómenos de deslizamientos y avalanchas”, código 1118-852-71251 proyecto “Funciones para estimación de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico debido a deslizamientos y avalanchas: Caso microcuencas piloto del suroeste Antioqueño”, contrato 80740-492-2020 celebrado entre la Universidad de Medellín, con recursos del Fondo Nacional de Financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, “Fondo Francisco José de Caldas”.

Muchas gracias . . .

Tabla de contenido

Declaración de propiedad	ii
Resumen	iv
Agradecimientos	v
1 Introducción	1
2 Objetivos	6
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos	6
3 Marco Teórico	7
3.1 DESLIZAMIENTOS	7
3.1.1 Flujos	7
Debris Flow	8
3.2 ANÁLISIS DEL RUNOUT DE UN DESLIZAMIENTO	9
3.2.1 Modelos Empíricos	10
Ángulo Fahrböschung	10
Modelo de Hunter y Fell 2003	10
Gradiente modificado	11
3.2.2 Métodos analíticos	11
Ecuaciones de St. Venant	12
Modelo de bloque deslizante	13
Modelo de Voellmy-Salm	14
3.3 ALGORITMOS DE MÚLTIPLE DIRECCIÓN DE FLUJO	14
3.3.1 Algoritmo D8	15
3.3.2 Algoritmo de Holmgren	15
3.3.3 Algoritmo Rho8	16
3.3.4 D_{∞}	17
4 Metodología	19
4.1 ETAPA 1: ESTADO DEL ARTE, MARCO TEÓRICO Y CASO DE ESTUDIO	19
4.2 ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS APLICATIVOS	22
4.2.1 Modelo de evaluación de la trayectoria de flujo de amenazas gravitacionales a escala regional Flow R	23
Parametrización del modelo	24
4.2.2 Modelo dinámico bidimensional de movimientos en masa rápidos en 3D en terreno alpino - RAMMS	25
Parametrización del modelo	26
4.2.3 <i>Gravitational Process Path</i>	27
Parametrización del modelo	27

4.3	ETAPA 3: CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS	28
4.3.1	FLOW R	30
4.3.2	RAMMS	30
4.3.3	GRAVITATIONAL PROCESS PATH	31
4.4	ETAPA 4: VALIDACIÓN DE LOS MODELOS	31
4.5	ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5	Análisis de Resultados y Discusión	36
5.1	Resultados	36
5.1.1	Flow -R	36
5.1.2	RAMMS	38
5.1.3	Gravitational Process Path	40
5.2	Análisis de Resultados	41
5.2.1	Análisis de resultados para la cuenca de la quebrada La Libo- riana	41
5.2.2	Análisis de resultados para la cuenca de la quebrada La Argelia	52
5.3	Discusión	60
6	Conclusiones	65
A	Resultados Modelos RAMMS	68
B	Resultados Modelos Flow R	74
C	Resultados Modelos GPP con SAGA GIS	78
	Bibliografía	85

Índice de figuras

3.1	Clasificación de procesos de movimientos de laderas de acuerdo a Varnes (Varnes, 1978)	8
3.2	Esquema de un Flujo de Escombros (Highland, 2008)	8
3.3	Definición esquemática de Fahrboschung	11
3.4	Definición de las variables topográficas H y d (Carvajal et al., 2018)	12
3.5	Modelo del bloque deslizante de Newmark (Stamatopoulos, Mavromihalis y Sarma, 2011)	13
3.6	(a). Múltiple direcciones de flujo probables, (b). Ejemplo con altimetrías supuestas, (c). Dirección de flujo final	15
3.7	Definición de las variables para el cálculo de la pendiente en una sola faceta (Tarboron, 1997)	18
4.1	Ubicación de la zona de estudio	20
4.2	Cerro Plateado, zona más elevada de la cuenca de la quebrada La Liboriana (Zona de Estudio)	21
4.3	Pendiente en grados de la zona de estudio	21
4.4	Ángulo de fricción de los suelos presentes en la cuenca	22
4.5	Inventario de deslizamientos de la cuenca de la quebrada La Liboriana	29
4.6	Ubicación de la cuenca de la quebrada La Argelia	34
5.1	Resultados del modelo con Flow R	37
5.2	Espesores del estrato que se desliza considerados	38
5.3	Altura máxima obtenida	39
5.4	Velocidad máxima obtenida	40
5.5	Presión máxima obtenida	41
5.6	Configuración del modelo en el GGP en SAGA GIS	42
5.7	Matriz de confusión	46
5.8	Matriz de confusión Flow R para la quebrada La Liboriana	46
5.9	Matriz de confusión RAMMS para la quebrada La Liboriana	46
5.10	Matriz de confusión módulo GPP para la quebrada La Liboriana	47
5.11	Curva ROC para Flow R, quebrada La Liboriana	47
5.12	Curva ROC para RAMMS, quebrada La Liboriana	47
5.13	Curva ROC para el módulo GPP de SAGA GIS, quebrada La Liboriana	48
5.14	Mapas de confusión para la quebrada La Liboriana	49
5.15	Gráfico de barras para los resultados obtenidos con Flow R	51
5.16	Gráfico de barras para los resultados obtenidos con RAMMS	51
5.17	Gráfico de barras para los resultados obtenidos con SAGA GIS	52
5.18	Espesores del estrato que se desliza para la cuenca de la quebrada La Argelia	52
5.19	Altura máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia	53
5.20	Velocidad máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia	53
5.21	Presión máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia	53
5.22	Pendientes de la cuenca de la quebrada La Argelia	54

5.23	Resultados del módulo GPP en la cuenca de la quebrada La Argelia . . .	55
5.24	Resultados de Flow R en la cuenca de la quebrada La Argelia	56
5.25	Matriz de confusión Flow R para la quebrada La Argelia	57
5.26	Matriz de confusión RAMMS para la quebrada La Argelia	57
5.27	Matriz de confusión módulo GPP para la quebrada La Argelia	57
5.28	Curva ROC para Flow R, quebrada La Argelia	58
5.29	Curva ROC para RAMMS, quebrada La Argelia	58
5.30	Curva ROC para el módulo GPP de SAGA GIS, quebrada La Argelia . .	59
5.31	Mapas de confusión para la quebrada La Argelia	59
A.1	Modelo 1 y Modelo 2 RAMMS	68
A.2	Modelo 3 y Modelo 4 RAMMS	68
A.3	Modelo 5 y Modelo 6 RAMMS	69
A.4	Modelo 7 y Modelo 8 RAMMS	69
A.5	Modelo 9 y Modelo 10 RAMMS	69
A.6	Modelo 11 y Modelo 12 RAMMS	70
A.7	Modelo 13 y Modelo 14 RAMMS	70
A.8	Modelo 15 y Modelo 16 RAMMS	70
A.9	Modelo 17 y Modelo 18 RAMMS	71
A.10	Modelo 19 y Modelo 20 RAMMS	71
A.11	Modelo 21 y Modelo 22 RAMMS	71
A.12	Modelo 23 y Modelo 25 RAMMS	72
A.13	Modelo 26 y Modelo 27 RAMMS	72
A.14	Modelo 28 y Modelo 29 RAMMS	72
A.15	Modelo 30 RAMMS	73
B.1	Modelo 1 y Modelo 2 Flow R	74
B.2	Modelo 3 y Modelo 4 Flow R	74
B.3	Modelo 5 y Modelo 6 Flow R	75
B.4	Modelo 7 y Modelo 8 Flow R	75
B.5	Modelo 9 y Modelo 10 Flow R	75
B.6	Modelo 11 y Modelo 12 Flow R	76
B.7	Modelo 13 y Modelo 14 Flow R	76
B.8	Modelo 15 y Modelo 16 Flow R	76
B.9	Modelo 17 y Modelo 18 Flow R	77
B.10	Modelo 20 Flow R	77
C.1	Modelo 1 y Modelo 2 GPP-SAGA GIS	78
C.2	Modelo 3 y Modelo 4 GPP-SAGA GIS	78
C.3	Modelo 5 y Modelo 6 GPP-SAGA GIS	79
C.4	Modelo 7 y Modelo 8 GPP-SAGA GIS	79
C.5	Modelo 9 y Modelo 10 GPP-SAGA GIS	79
C.6	Modelo 11 y Modelo 12 GPP-SAGA GIS	80
C.7	Modelo 13 y Modelo 14 GPP-SAGA GIS	80
C.8	Modelo 15 y Modelo 16 GPP-SAGA GIS	80
C.9	Modelo 17 y Modelo 18 GPP-SAGA GIS	81
C.10	Modelo 19 y Modelo 20 GPP-SAGA GIS	81
C.11	Modelo 21 y Modelo 22 GPP-SAGA GIS	81
C.12	Modelo 23 y Modelo 24 GPP-SAGA GIS	82
C.13	Modelo 25 y Modelo 26 GPP-SAGA GIS	82
C.14	Modelo 27 y Modelo 28 GPP-SAGA GIS	82

C.15 Modelo 29 y Modelo 30 GPP-SAGA GIS	83
C.16 Modelo 31 y Modelo 32 GPP-SAGA GIS	83
C.17 Modelo 33 y Modelo 34 GPP-SAGA GIS	83
C.18 Modelo 35 y Modelo 37 GPP-SAGA GIS	84
C.19 Modelo 38 y Modelo 39 GPP-SAGA GIS	84
C.20 Modelo 40 GPP-SAGA GIS	84

Índice de tablas

4.1	Pesos de la función de persistencia (Horton et al., 2013)	25
4.2	Configuración de los ensayos ejecutados en Flow - R	30
4.3	Configuración de los ensayos ejecutados en RAMMS	32
4.4	Configuración de los ensayos ejecutados en SAGA GIS con el módulo GPP	33
4.5	Comparación de las características de cada cuenca	35
5.1	Criterio para la evaluación del desempeño del modelo (Ritter y Mu- ñoz Carpena, 2013)	44
5.2	Resultados del desempeño de los aplicativos con el RMSE	45

Abreviaciones

A	<i>Shadow Angle</i> para GPP
AUC	Area Under Curve
DEM	Digital Elevation Model
FN	False Negative
FP	False Positive
GPP	Gravitational Path Process
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NESW	North, East, South and West
PDE	Parámetros De Entrada
PDF	Parámetros De Fricción
RAMMS	Rapid Mass Movements Simulation
ROC	Receiver Operating Characteristic curve
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TN	True Negative
TP	True Positive
TPR	True Positive Rate
UP	Umbral de Pendiente

Símbolos

ρ	Densidad	kg/m^2
μ	Viscosidad	Pa s
ξ	Fricción viscoso-turbulenta	m/s^2

A mis padres les dedico cada triunfo en mi vida, son ellos quienes mas se han esforzado por mi progreso. ...

Capítulo 1

Introducción

Los deslizamientos de tierra son procesos geodinámicos que ocurren con frecuencia en zonas montañosas. Diversas son las incertidumbres a considerar dentro del análisis de los deslizamientos. Algunas de ellas son: la componente espacial que busca conocer en donde quedan las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos, la componente temporal que busca o pretende identificar las épocas del año en donde hay mayor susceptibilidad de que ocurra un deslizamiento; la magnitud del movimiento en masa y finalmente el área de afectación (Hurtado, 2020).

Los estudios que se han desarrollado a nivel mundial se han enfocado en entender los mecanismos de falla que gobiernan estos procesos (Mckinnon, Hungr y McDougall, 2008; Sepúlveda y Petley, 2015; Bessette-Kirton et al., 2020), sin embargo en lo concerniente al análisis de la zona de afectación y las áreas probables de ocurrencia aún persisten vacíos de conocimiento debido a la variabilidad del comportamiento reológico de los materiales que conforma los flujos o masas deslizantes.

Dicho esto, la necesidad de emplear métodos cuantitativos para obtener información de tipo probabilista tanto temporal como espacial y de intensidad se ha incrementado a medida que la gestión cuantitativa del riesgo se ha convertido en un eje fundamental en la planificación de ciudades y uso del suelo (Vega, Marin y Hurtado, 2021). En Colombia, por ejemplo, existe una falta de sistemas de monitoreo que permitan evaluar la frecuencia de estos eventos y tampoco se cuenta con inventarios de eventos pasados que permitan emplear metodologías para predecir eventos futuros. Esto, sumado a los regímenes de precipitación presentes en la zona central del país, en donde es común que se presenten episodios de lluvia de gran magnitud en períodos de tiempo determinados, combinados con suelos altamente porosos y una topografía accidentada, configuran un ambiente ideal para la ocurrencia de deslizamientos.

Por lo tanto, establecer un procedimiento o emplear herramientas que sean capaces de reproducir el comportamiento de un suelo en ambientes tropicales, como los que se encuentran en la zona central de Colombia es imperativo en la prevención de desastres, teniendo en cuenta que la mayor concentración de población del país se encuentra justamente en esta zona.

En el mundo se han desarrollado aplicativos informáticos basados en modelos físicos para la predicción y simulación de deslizamientos de tierra en general (Pudasaini y Jaboyedoff, 2020; Wichmann, 2017; Takebayashi y Fujita, 2020). Sin embargo, estos han sido desarrollados para la evaluación de estos fenómenos en ambientes muy distintos a los presentes en Colombia. Es decir, el desarrollo de la gran mayoría de estos aplicativos se ha hecho en zonas en donde la climatología, la topografía y la

composición geológica de los suelos presentes distan mucho de las condiciones propias de las cuencas tropicales de esta zona del planeta. Por lo tanto, estos aplicativos son capaces de reproducir eventos de deslizamientos en esas zonas, ya que fueron desarrollados para dicho fin.

El aplicativo RAMMS por ejemplo, fue desarrollado por el Instituto Federal Suizo para la investigación de bosques, nieve y paisaje y el Instituto Federal Suizo para la investigación de nieve y avalanchas. Este aplicativo ha sido utilizado para la reproducción de eventos bien documentados que han sucedido bajo contextos diferentes a los ambientes tropicales presentes en Colombia. (Cesca y D'Agostino, 2008) lo utilizó para reproducir un evento que sucedió en Las Dolomitas, Italia en el año 2006. El objetivo era medir la adaptación del modelo a la información observada en campo y su desempeño a partir de los volúmenes depositados. La información utilizada como parámetros de entrada fue levantada directamente de la zona donde ocurrió el evento utilizando métodos de levantamiento topográfico de alta precisión con LiDAR y fotogrametría tomada desde una altura promedio de 1000m sobre el nivel del terreno en época de nieve. Además, múltiples estudios de campo fueron ejecutados posterior al evento por lo que se contaba con información relativa a la altura máxima y promedio del estrato que se deslizó, secciones transversales en los depósitos que resultaron de la depositación y una descripción detallada de las zonas donde se iniciaron los deslizamientos. Dentro de los resultados obtenidos, a pesar de las múltiples calibraciones que se llevaron a cabo, RAMMS sobreestimó el área inundada entre un 254 % y un 1552 %, debido al tamaño de la celda puesto que se usaron diferentes modelos con celdas distintas variando entre tamaños de 5m y 20m. Además, sobreestimó el espesor medio entre un 78 % y un 95 %. En este estudio concluyeron que una representación precisa de la topografía es vital para la obtención de una representación razonable de los patrones de depositación reales observados. Esto es sumamente importante, teniendo en cuenta que la información empleada para el desarrollo de esta investigación proviene en su totalidad de fuentes secundarias. Por otro lado, (Hussin et al., 2012) utilizó un flujo de escombros que ocurrió en los Alpes franceses (cuenca Barcelonnette) para la parametrización de RAMMS, la cual cuenta con buenos registros de los eventos que han ocurrido en sus inmediaciones. El evento evaluado fue desencadenado por una lluvia intensa que incluyó granizo y los drenajes afluentes al cauce principal de la cuenca contribuyeron al volumen final de depositación del flujo. La definición de las zonas donde se localizan las fuentes del deslizamiento se hizo a partir de los eventos reportados ocurridos en esta misma cuenca combinados con fotointerpretación y trabajos de campo. Además, parámetros como la altura del estrato deslizante fueron determinados de acuerdo a las observaciones de campo. Los parámetros relativos a la reología de la mezcla se tomaron a partir de rangos estimados de análisis hechos de cientos de deslizamientos ocurridos en Italia y otros sitios con características similares a los Alpes franceses. Dado que la información utilizada tenía correspondencia con el evento modelado, los valores de la desviación estándar de resultados como el volumen desplazado, el volumen total depositado y la distancia de *runout* no sobrepasó el 1.4 %. Además de otros análisis, el modelo resultante pudo reproducir tanto el *runout* como las velocidades dentro de los rangos estimados en el evento real. Las predicciones que consideraron erróneas las interpretaron como producto de los cambios en la topografía del lugar en el momento que ocurrió el deslizamiento y el estado posterior una vez ocurrido y errores en la interpolación de la información de elevación en el modelo de elevación digital y su baja resolución.

(Frank et al., 2015) estudió por ejemplo los Alpes Suizos con RAMMS a partir del análisis de un deslizamiento ocurrido en Illgraben, Suiza ya que es una zona con alto grado de actividad relativa a la ocurrencia de deslizamientos (*Debris Flow*). Dado que contaban con información oficial gubernamental, la información respecto a los volúmenes desplazados, parámetros del suelo y alturas de flujo, además que hicieron un levantamiento digital del terreno con LiDAR muy preciso, con tamaños de celda de 1m. Utilizaron valores de viscosidad de 0.05, el coeficiente de arrastre de $1200m/s^2$ y una densidad de $2000kg/m^3$. (Díaz-Salas, Guevara-Pérez y Vidal-Moren, 2021) y (Franco-Ramos et al., 2020) modelaron el rompimiento de una presa en la subcuenca Quillcay en Perú y el lahar ocurrido en el Volcán Pico de Orizaba en México en el año 2012 respectivamente. El primer caso, se da en una región andina susceptible a los efectos del fenómeno de El Niño. En este caso, se utilizaron parámetros de una investigación similar a la microcuenca estudiada de donde se extrajo el valor de la viscosidad y la fricción viscoso-turbulenta correspondientes a 0.12 y $1000/s^2$ respectivamente. En el caso del Lahar en México, utilizaron información primaria recolectada directamente desde la fuente, dado que tenían las alturas de las huellas del evento que quedaron en los troncos de los árboles, utilizaron esta información para calibrar el modelo y los resultados obtenidos tenían desviaciones estándares lo suficientemente pequeñas para afirmar que fue posible reproducir el evento analizado. (Muñoz, 2018) empleó RAMMS para evaluar la amenaza de flujos de detritos en la cuenca del Estero San Alfonso en Chile, (Simoni, Mammoliti y Graf, 2012) lo utilizaron para realizar un análisis de eventos pasados en los Alpes Italianos, (KRUŠIĆ et al., 2018) analizó el caso de estudio del deslizamiento ocurrido en Leva reka en Serbia que fue desencadenado por una lluvia extrema en una zona con una gran cantidad de material meteorizado de la época del Cretáceo e incluso (Christen et al., 2012) propuso un manejo integral del riesgo usando este aplicativo.

En el caso de Flow R, se trata de un aplicativo para desarrollar evaluaciones a escala regional de flujos de escombros que permite identificar áreas potenciales como fuentes de inicio de deslizamientos y su extensión correspondiente. (Pastorello, Michelini y D'Agostino, 2017) utilizó el valle de Vize, un valle alpino italiano en donde tomerntas severas, los fenómenos típicos desencadenantes de *Debris Flow* ocurren frecuentemente en el año. En el 2012, una tormenta extrema desencadenó múltiples flujos de escombros ya que se registró una precipitación de 72.8mm en 6 horas, correspondiente a un período de retorno entre 200 y 300 años. Además, dado que el suelo estaba realmente saturado, el peligro de estos eventos se amplificó en gran medida. Para la calibración del modelo, en donde se pretendía reproducir 37 de los eventos ocurridos en dicha fecha, se realizó un retroanálisis a escala local con tres casos de estudio. Además, los parámetros de entrada utilizados corresponden a modelos del terreno de distintas resoluciones (en donde además se sugirió que para una escala regional una resolución de 10m es ideal) e información de los flujos de escombros. Además, utilizaron la acumulación de flujo, la pendiente y la curvatura derivadas de los modelos de elevación digital, como primer método para la evaluación de este aplicativo, y emplearon un segundo método correspondiente a solo ingresar las fuentes predefinidas a partir de la acumulación de flujo (concentraciones mayores a 10 Ha) y las fuentes predefinidas a partir de la pendiente (pendientes mayores a 15°). Dado que este aplicativo emplea distintos algoritmos de dirección de flujo, la metodología seguida correspondió a combinar los parámetros de estos algoritmos controlando la divergencia del flujo, y seleccionando las combinaciones que mejor reprodujeron el área de depositación real del evento del 2012. Dado que en la zona de estudio hay presencia de estructuras hidráulicas de control y dada la

incapacidad del aplicativo de tener en cuenta la presencia de dichas estructuras, los resultados en estas zonas específicas no reflejaron lo ocurrido realmente, dado que el aplicativo calculó áreas más extensas de inundación o extensión de los deslizamientos. Sin embargo, Flow R fue capaz de reconocer todos los eventos históricos de flujos de escombros en esta zona como áreas susceptibles, incluidas las ocurridas en el caso de estudio. (Xu et al., 2022) utilizó Flow R para identificar las áreas susceptibles y medir el riesgo por deslizamientos en el Tíbet, en una zona con elevaciones entre 3000 y 4000 msnm, pendientes entre 20 y 40° y zonas donde el uso del suelo estaba destinado a cultivos o simplemente no tenía ningún uso. (Ye et al., 2023) analizó la distribución espacial-temporal de los patrones del *Debris Flow* ocurrido en una mina en China en donde por ejemplo se identificó que la gran mayoría de deslizamientos ocurrían entre Mayo y Septiembre, siendo el mes de Julio el que tiene mayor actividad. (Putra et al., 2022) modeló los deslizamientos ocurridos en la Isla de Célebes en Indonesia en el año 2018, producto de un terremoto utilizando el modelo de elevación digital DEMNAS, que es un DEM nacional propio de Indonesia que utilizó datos IFSAR, TERRASAR-X y ALOS PALSAR que nunca había sido utilizado para este tipo de investigaciones.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, que son ejemplos particulares de casos de estudio en donde se emplearon aplicativos para la reproducción de eventos pasados, se fijó el objetivo fundamental de este trabajo, que no es más que la calibración de RAMMS, Flow R y el módulo *Gravitational Process Path* (GPP) del aplicativo SAGA GIS (que también está diseñado para determinar la extensión de un deslizamiento a partir del análisis de las direcciones de flujo) usando un caso de estudio de una cuenca tropical colombiana bien documentada. Esta corresponde a la cuenca de la quebrada La Liboriana, ubicada en el municipio de Salgar, Antioquia, en la que el 15 de mayo del año 2015 ocurrió una avenida torrencial ocasionada por una serie de deslizamientos que fueron desencadenados por una fuerte lluvia (Vega e Hidalgo, 2019; Velásquez et al., 2020; Ruiz-Vásquez y Aristizábal, 2018; Marin, Velásquez y Sánchez, 2021; Hidalgo y Vega, 2021; Hoyos et al., 2019). Se llevaron a cabo múltiples modelaciones con los aplicativos seleccionados y utilizando como parámetros de entrada fundamentales un modelo de elevación digital (DEM) con resolución 12.5m y un inventario de escarpes que fue digitalizado a partir del análisis de imágenes satelitales (Ruiz-Vásquez y Aristizábal, 2018). Posterior a la ejecución de estas modelaciones, se seleccionó la combinación de parámetros que gráficamente reprodujo mejor los eventos ocurridos para cada caso y se analizaron mediante un enfoque estadístico y la curva ROC (*Receiving Operatin Criteria*) para determinar el desempeño del modelo en términos de su capacidad para predecir el evento y su coincidencia en cuencas con características diferentes a las utilizadas para el desarrollo de cada uno de estos aplicativos.

Además, una última modelación fue ejecutada en la cuenca de la quebrada La Argelia. Esta cuenca, que cuenta con características similares a la cuenca de la quebrada La Liboriana, localizadas en la misma zona fue seleccionada ya que se contaba con un inventario de deslizamientos y su correspondiente modelo de elevación digital obtenido de la misión satelital ALOS PALSAR de la agencia espacial japonesa JAXA, que tiene una resolución de 12.5 x 12.5m. El objetivo de este ejercicio fue determinar si con la calibración de los modelos en una cuenca bien documentada, era posible reproducir eventos de otras cuencas de características similares sin necesidad de tener que volver a ejecutar dicha calibración y en términos gráficos evaluar la calidad de los resultados.

Todo lo anteriormente descrito, se desarrolló a partir de la determinación del objetivo general de este trabajo el cual consiste en evaluar la aplicabilidad y desempeño de los modelos de base física para la modelación de *debris flow* en cuencas tropicales de montaña, utilizando lo ocurrido en Salgar el 18 de mayo del 2015 como caso de estudio, determinando si es posible su reproducción y la precisión de estos modelos. Esto a partir de la calibración de los modelos con ayuda de información secundaria y el inventario de deslizamientos ocurridos en el caso de estudio y la validación de los resultados obtenidos, aplicándolos en una cuenca de características similares para así, a partir de un análisis estadístico de los resultados determinar el nivel de precisión de los resultados a partir del grado de coincidencia de las predicciones y lo ocurrido en el escenario real. A partir de esto, se concluyó respecto al desempeño de estos modelos y su capacidad de reproducir eventos localizados en zonas muy distintas a las utilizadas para su concepción y desarrollo y su posible implementación en mecanismos que permitan predecir eventos futuros además de la integración de sus resultados en la toma de decisiones para la planeación de territorios y la creación de medidas de mitigación del riesgo y la vulnerabilidad por deslizamientos en masa.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la aplicabilidad y desempeño de los modelos de base física para la modelación de debris flow en cuencas tropicales de montaña, calibrándolos a partir de los parámetros mecánicos del suelo utilizando un caso de estudio ocurrido bajo estos ambientes y ampliamente documentado, determinando si es posible su reproducción y la precisión de la misma.

2.2 Objetivos específicos

- Calibrar los modelos de base física seleccionados, partiendo de información secundaria y el inventario de deslizamientos del caso de estudio.
- Validar los resultados obtenidos posterior a la calibración de los modelos, concluyendo respecto a su utilidad dentro de la evaluación del alcance de un deslizamiento en cuencas tropicales.
- Comparar diferentes modelos de base física, estableciendo cuales ofrecen mejores resultados de acuerdo a las necesidades del modelador.
- Establecer la precisión de los resultados a partir del grado de coincidencia de las predicciones con lo ocurrido en la realidad.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 DESLIZAMIENTOS

La palabra deslizamiento es un término para describir el movimiento cuesta abajo de suelo, roca y material orgánico bajo los efectos de la gravedad y la forma del terreno (Highland, 2008). Para complementar esta definición, es necesario añadir el hecho de que estos movimientos están altamente influenciados por cambios internos en las presiones de poros y los esfuerzos cortantes.

Dependiendo del material geológico (roca, escombros o tierra), un deslizamiento puede ser clasificado en caídas, flujos, corrimientos laterales y deslizamientos y cada uno de ellos tiene un comportamiento diferente que depende de su composición, la forma en la que se depositan, la velocidad de propagación y el mecanismo de falla.

Varnes clasificó un amplio rango de procesos referentes a movimientos de laderas de acuerdo a características que son relevantes para su reconocimiento, control y mitigación. A continuación se presenta una tabla en donde se resumen en general todos los tipos de deslizamientos que pueden presentarse.

3.1.1 Flujos

Un flujo es un movimiento espacialmente continuo en el que las superficies de corte son de poca duración, están estrechamente espaciadas y, por lo general, no se conservan (Highland, 2008). La distribución de velocidades en la masa que se desplaza se parece a la de un líquido viscoso. El límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie a lo largo de la cual ha tenido lugar un movimiento diferencial apreciable o una zona gruesa de cortante distribuido (Cruden y Varnes, 1991).

Existen diferentes tipos de flujos, y todos difieren en cuanto a la composición del material en suspensión, el tamaño de las partículas deslizantes, la magnitud o la velocidad de propagación. Flujos de escombros, lahares (flujos de escombros volcánicos), avalancha de escombros y flujos de tierra son los más comunes.

Las trayectorias de movimiento de deslizamientos similares a flujos no son las mismas bajo ninguna condición, incluso si ocurren en el mismo contexto geomorfológico, ya que todos pueden mostrar características bastante diferentes en suelos de tamaño de partícula grueso o de grano fino. La experiencia sugiere que incluso pequeños detalles en las características geomorfológicas de la pendiente, en propiedades del suelo o en el campo de tensiones efectivo interno antes de la rotura puede ser responsable de uno u otro patrón de movimiento, ya sea en suelos de tamaño de partícula grueso o de grano fino (Picarelli et al., 2008).

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
			De grano grueso	De grano fino
Caídas		Caídas de rocas	Caídas de detritos	Caídas de suelos
Basculamientos		Basculamiento de rocas	Basculamiento de detritos	Basculamiento de suelos
Deslizamiento	Rotacionales	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelos
	Traslacionales	Deslizamiento translacional de rocas	Deslizamiento translacional de detritos	Deslizamiento translacional de suelos
Separaciones laterales		Separación lateral en roca	Separación lateral en detritos	Separación lateral en suelos
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de suelos
Complejos		Combinación de dos o mas tipos		

FIGURA 3.1: Clasificación de procesos de movimientos de laderas de acuerdo a Varnes (Varnes, 1978)

Debris Flow

Un deslizamiento de tierra como un flujo de escombros se puede definir como una forma de movimiento de masa rápido en el que tierra suelta, roca y, a veces, materia orgánica se combinan con agua para formar un lodo que fluye cuesta abajo (Highland, 2008).

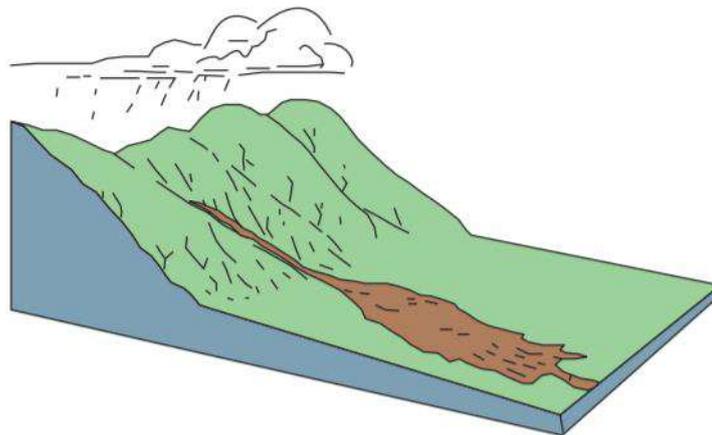


FIGURA 3.2: Esquema de un Flujo de Escombros (Highland, 2008)

Sin embargo, a medida que se han ido desarrollando investigaciones sobre este tipo de movimientos en masa, esta definición básica ha sido útil como base para nuevas definiciones más precisas que clasifican los flujos de escombros según los materiales que los componen, propiedades como límites de consistencia, el tamaño

de las partículas y el contenido de agua. Por lo tanto, palabras como escombros (suelo con un contenido de grava superior al 20 % y tamaño de partícula grueso), tierra (coluvios de arcillas o rocas erosionadas ricas en arcilla, con una consistencia más cercana al límite plástico que el límite líquido) y lodo (material arcilloso semilíquido con un contenido de arcilla superior al 50 %) (Fallis, 2013) son importantes para comprender los tipos de flujo propuestos por Hungr (Fallis, 2013) en su libro *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, donde el autor define un flujo de escombros como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de escombros no plásticos saturados que discurren en un canal empinado, cuyo índice de plasticidad es inferior al 5 % en arena y fracciones más finas y, un flujo de lodo es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de escombros plásticos saturados que discurren en un canal, cuyo contenido de humedad es relativamente mayor al de la fuente de material con un índice de plasticidad superior al 5 %.

En algunos flujos de escombros (*debris flow*), el agua necesaria para saturar la masa proviene de la mezcla del material con corrientes u otras superficies de agua, después de ocurrida la falla. Sin embargo, en la gran mayoría de flujos de escombros, el agua ya está en el suelo cuando ocurre la falla. De hecho, muchos flujos de escombros son desencadenados por los cambios en la distribución de la presión de poros que resulta de la infiltración de la precipitación o el derretimiento de nieve, lo que conduce a la falla (Iverson, 1997).

Los flujos de escombros se caracterizan por tener densidades aparentes que van desde 1800 a 2300 kg/m^3 , velocidades que varían en un rango de 3 a 25 m/s y contenidos de sedimentos entre el 40 % y el 80 %, que pueden ser desde materia orgánica hasta grandes rocas (Cabral, Reis y Veloso, 2022).

Generalmente, el movimiento en los flujos de escombros es relativamente superficial y el alcance (*runout*) es tanto largo como angosto, extendiéndose kilómetros en terrenos muy escarpados. Los escombros y el lodo terminan usualmente en la base de las pendientes y crean una especie de abanico, que también podría ser inestable (Highland, 2008). Los flujos de escombros pueden ser producto de fallas individuales o de numerosas fallas pequeñas que se juntan aguas abajo (Iverson, 1997). Sin embargo, el movimiento requiere que ocurra la falla, agua suficiente para saturar la masa y convertir suficiente energía potencial producto de la fuerza de gravedad en energía cinética interna para cambiar el estilo de movimiento de deslizamiento en una superficie de falla localizada a una deformación más extendida que puede ser reconocida como flujo (Iverson, 1997).

3.2 ANÁLISIS DEL RUNOUT DE UN DESLIZAMIENTO

El *runout* o alcance es la distancia y trayectoria de viaje de un deslizamiento desde que inicia su movimiento una vez ocurrida la falla, hasta alcanzar el lugar donde se deposita y se agota la energía.

El análisis del *runout* es el análisis post-rotura del deslizamiento. Involucra realizar simulaciones de eventos ocurridos previamente y la predicción de eventos futuros (McDougall, 2017). La predicción del alcance de un deslizamiento es usualmente requerido en la evaluación de la amenaza y el riesgo por deslizamiento (Willenberg

et al., 2009), además, también se pueden diseñar estructuras de contención y mitigación como barreras de escombros, presas (Mancarella y Hungr, 2010) y demás a partir de la definición de la distancia probable de un deslizamiento en una zona donde sea probable su ocurrencia.

El análisis del *runout* también se usa para evaluar los efectos secundarios potenciales de un deslizamiento, incluyendo oleajes generados por los deslizamientos (Pastor et al., 2009; Wang, Ward y Xiao, 2015; Yavari-Ramshe y Ataie-Ashtiani, 2017), inundaciones producto de presas artificiales generadas por un deslizamiento (Schneider et al., 2014), entre otros.

Los métodos para su análisis pueden ser clasificados en dos categorías: Modelos empíricos-estadísticos que se basan en correlaciones geométricas estadísticas y métodos analíticos que se basan en procesar información a partir de un modelo. En esta última categoría se incluyen los modelos numéricos (McDougall, 2017). En otro capítulo se extiende la información referente a estos últimos.

3.2.1 Modelos Empíricos

Los modelos empíricos para la evaluación del *runout* son útiles para la evaluación de riesgo en taludes y ayuda en la toma de decisiones de manera rápida. Este tipo de modelos son eficientes y apropiados cuando el tiempo y la incertidumbre geológica limitan el grado de precisión que debería tenerse en estos casos. Los métodos empíricos son rápidos, fáciles de replicar y útiles para agrupar las condiciones del sitio donde los datos detallados son limitados (Whittall, Eberhardt y McDougall, 2017).

Ángulo Fahrböschung

El concepto del ángulo Fahrböschung, que se define por la relación entre la diferencia de elevación del punto de inicio y parada de los escombros o detritos (h) y la distancia horizontal recorrida correspondiente (L), es la base para la predicción del *runout* en deslizamientos analizados en una dirección (Carvajal et al., 2018).

En la ecuación que se muestra a continuación, se presenta la relación entre H y L y el ángulo (Fahrböschung) es llamado α .

$$\tan \alpha = H/L \quad (3.1)$$

En donde H es la diferencia de elevación entre el punto de inicio y el punto mas bajo donde ocurre la depositación del deslizamiento. L es la distancia horizontal correspondiente, tal como se muestra en la Figura 3.3.

Esta relación es la mas usada para predicciones del *runout* dada su simplicidad. Es la base también para modelos mas complejos que son solución de modelos analíticos que consideran la distancia y trayectoria de un deslizamiento.

Modelo de Hunter y Fell 2003

Este modelo es derivado de la teoría del ángulo Fahrböschung explicado anteriormente. Hunter y Fell (2003) encontraron que el ángulo Fahrböschung de deslizamientos de flujo en llenos de suelo granular suelto y botaderos casi no dependía del volumen; más bien, la movilidad es proporcional a la inclinación promedio de la ruta de viaje. Las relaciones de movilidad basadas en el ángulo de la pendiente que

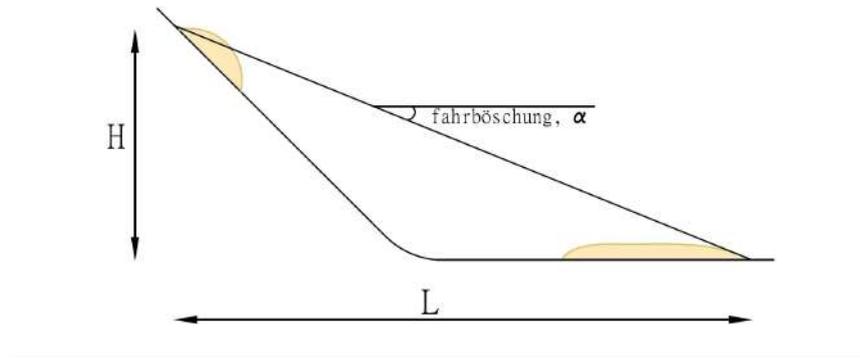


FIGURA 3.3: Definición esquemática de Fahrböschung

se analizaron incluyeron el ángulo Fahrböschung, la longitud del *runout* y la distancia de viaje máxima normalizada al *runout* total (Whittall, Eberhardt y McDougall, 2017). En la siguiente ecuación se muestra la relación entre la diferencia de elevación del flujo (H) y la distancia horizontal total (L).

$$H/L = 0,488(\alpha) + 0,117 \quad (3.2)$$

Gradiente modificado

Este modelo es resultado de una investigación desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia donde el objetivo fue la evaluación de la vulnerabilidad a deslizamientos. Allí, los investigadores desarrollaron una serie de ecuaciones para estimar la vulnerabilidad a deslizamientos a partir de la intensidad de la amenaza y la capacidad de resistencia de los elementos para soportar una amenaza. Todo esto condujo a una variable llamada Z . Esta variable es el gradiente modificado y representa la intensidad del proceso de deslizamiento, que en consecuencia, controla fuertemente la vulnerabilidad (Carvajal et al., 2018).

$$Z = H/d \quad (3.3)$$

Esta relación también surgió como una derivación del modelo Fahrböschung explicado anteriormente, lo que resulta en H como la diferencia de elevación del punto de inicio y fin y d como el posible trayectoria de la masa deslizante desde la ubicación de la amenaza hasta el centro del área en planta del edificio, en el caso de evaluación de la vulnerabilidad al deslizamiento, y hasta el punto de deposición final para este caso específico, como se muestra en la Figura 3.4.

3.2.2 Métodos analíticos

Los métodos analíticos buscan modelar un deslizamiento por medio de la aplicación de las leyes de la física en combinación con la dinámica de los sólidos y los fluidos. La mayoría de estos modelos son resueltos numéricamente, mediante el uso de diferencias finitas o elementos finitos.

Los tres grupos principales de las soluciones incluye los modelos de bloque, modelos bidimensionales que observan un perfil típico del deslizamiento y desprecian el ancho y modelos tridimensionales que tratan el flujo de un deslizamiento de tierra sobre un terreno tridimensional (Hung, Corominas y Eberhardt, 2005). La mayoría

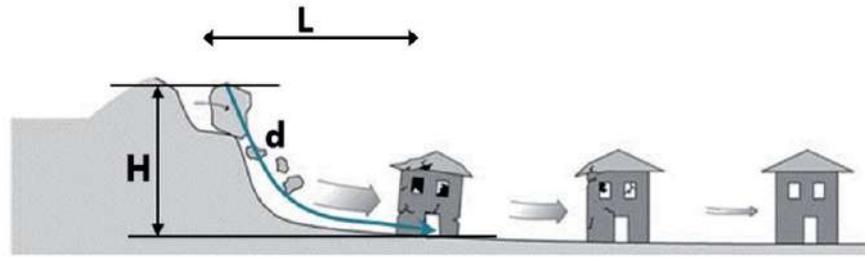


FIGURA 3.4: Definición de las variables topográficas H y d (Carvajal et al., 2018)

de los modelos que pertenecen a las dos últimas categorías se simplifican mediante la integración de las tensiones internas en direcciones verticales o normales al lecho para obtener una forma de ecuaciones de St. Venant, también conocidas como *Shallow water equations*.

Ecuaciones de St. Venant

Las ecuaciones de St. Venant son unas ecuaciones diferenciales que describen el flujo bajo una superficie de presión en un fluido. Estas ecuaciones son derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes, cuando la longitud horizontal es mucho mas grande que la longitud vertical.

Bajo esta condición, la conservación de la masa implica que la velocidad vertical del fluido es mucho mas pequeña en comparación a la velocidad horizontal.

- Ecuación de continuidad

$$v \frac{\delta A}{\delta x} + A \frac{\delta v}{\delta x} + b \frac{\delta h}{\delta t} = 0 \quad (3.4)$$

- Ecuación de momentum

$$g \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta t} = g(i - j) \quad (3.5)$$

En las ecuaciones anteriores, las variables equivalen a:

A : Sección transversal

h : Profundidad del flujo en la sección

v : Velocidad media en la sección

b : Ancho superior de la sección

x : Posición de la sección medida desde el inicio del canal aguas arriba

t : Tiempo

g : Aceleración de la gravedad

Las situaciones en la dinámica de fluidos donde la longitud horizontal es mucho mas grande que la escala vertical son comunes, por lo que estas ecuaciones son aplicables. Pueden ser utilizadas con las fuerzas de Coriolis para la modelación oceánica y atmosférica, o la modelación de fluidos donde intervienen fuerzas reológicas.

Estas ecuaciones son muy utilizadas en la mecánica de fluidos donde es conveniente trabajar con volúmenes controlados, puesto que es difícil identificar y darle seguimiento a un sistema de partículas fluidas.

La mayoría de los modelos analíticos le asignan relaciones constitutivas simples apropiadas para un material dado. La validez y los parámetros de un modelo reológico dado son determinados a partir de un análisis de eventos pasados con características similares al caso en consideración.

Modelo de bloque deslizante

El modelo del bloque que se desliza, inicialmente propuesto por Newmark en el año 1965, es la base de los modelos simples para la predicción del desplazamiento de laderas debido a los deslizamientos cosísmicos.

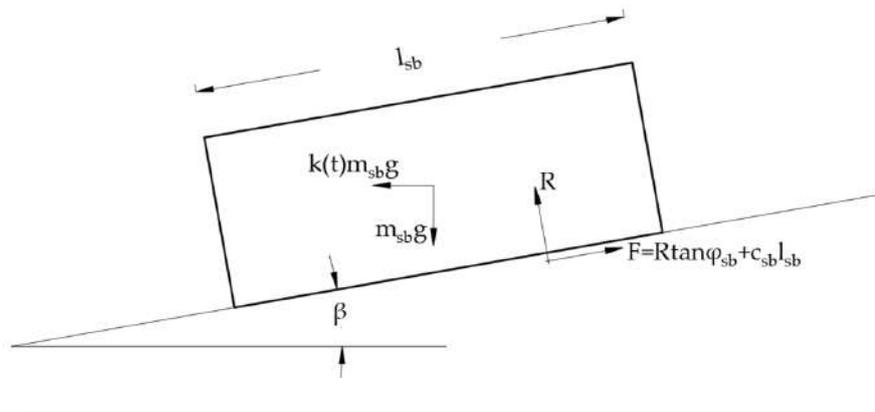


FIGURA 3.5: Modelo del bloque deslizante de Newmark (Stamatopoulos, Mavromihalis y Sarma, 2011)

Como se muestra en la Figura 3.5, un bloque con una resistencia simulada con la ley de Mohr-Coulomb reposa sobre un plano inclinado. La aceleración crítica es definida como la aceleración mínima horizontal que causa el movimiento del bloque.

En dicha figura, las variables corresponden a:

- $k(t)g$: Aceleración horizontal
- $m_s b$: La masa del bloque deslizante
- g : Aceleración de la gravedad
- R : Fuerza Normal

Del teorema de trabajo-energía, la tasa de cambio de la energía cinética del bloque iguala el trabajo de la fuerza neta actuante del bloque.

$$d \left(\frac{Mv^2}{2} \right) = FdL \quad (3.6)$$

Donde:

$$F = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi) \quad (3.7)$$

F es la diferencia entre la gravedad y la fuerza de fricción y L es la distancia o longitud de la trayectoria.

Reemplazando F en la Ecuación 3.6:

$$d \left(\frac{Mv^2}{2} \right) = Mg(\sin \beta) - \cos(\beta) \tan \phi) dL \quad (3.8)$$

Es importante mencionar que el teorema de trabajo-energía debe ser aplicado con referencia al centro de gravedad de la masa que se desliza, no entre la corona del punto donde se inicia el movimiento y el pié del lugar donde se deposita. Por lo tanto, en términos físicos, la teoría del bloque deslizante es una aproximación tosca del proceso de flujo para la mayoría de los tipos de deslizamiento.

Modelo de Voellmy-Salm

El modelo de Voellmy-Salm usa la siguiente ecuación de balance de masa:

$$\delta_t H + \delta_x(HU_x) + \delta_y(HU_y) = Q_{(xyt)} \quad (3.9)$$

En donde U_x y U_y son las velocidades en las direcciones x y y respectivamente, y $Q_{x,y,t}$ (m/s) es el término referente a la producción de masa, también llamado tasa de arrastre ($Q > 0$) o tasa de deposición ($Q < 0$). La ecuación de momentum promedio en profundidad en las direcciones x y y está dado por:

$$\delta_t(HU_x) + \delta_x \left(c_x HU_x^2 + g_z k_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) + \delta_y(HU_x U_y) = S_{g_x} - S_{f_x} \quad (3.10)$$

$$\delta_t(HU_y) + \delta_y \left(c_y HU_y^2 + g_z k_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) + \delta_x(HU_x U_y) = S_{g_y} - S_{f_y} \quad (3.11)$$

En dónde c_x y c_y son factores de forma de perfil determinados por el DEM y $k_{a/p}$ es el coeficiente de presión lateral de tierra que es determinado con un valor de 1 para modelar el flujo hidrostáticamente.

La fricción basal total en el modelo de Voellmy-Salm es partida en un coeficiente de fricción independiente de la velocidad relacionado con Coulomb (μ) y un coeficiente de fricción turbulenta dependiente de la velocidad (ξ (m/s²)).

3.3 ALGORITMOS DE MÚLTIPLE DIRECCIÓN DE FLUJO

La dirección de flujo o *Flow Direction* hace referencia a la dirección de una corriente que fluye en determinadas celdas. Esto, enmarcado dentro del análisis GIS mediante modelos de elevación digital.

Para la ejecución de dichos análisis existen distintas metodologías para la evaluación de la dirección de flujo, basadas en la evaluación de las múltiples direcciones probables que puede seguir un flujo determinado de acuerdo a las celdas vecinas a la celda analizada del modelo de elevación digital. Esto se conoce como algoritmo

de múltiple dirección de flujo.

Dentro de estos algoritmos, los que se basan en el análisis de las 8 celdas vecinas a la celda de análisis son ampliamente usados y son la base para los métodos numéricos desarrollados para la evaluación de las trayectorias de fluidos cuyo comportamiento se rige por las propiedades reológicas.

3.3.1 Algoritmo D8

El algoritmo determinístico de ocho nodos (D8) está basado en el análisis de una malla en la que para un punto dado dentro de esta malla, aproxima la dirección del flujo al seleccionar la dirección al vecino con el cual el gradiente es el máximo.

Surgió como la necesidad de simular la erosión debida a un drenaje natural. Por lo tanto, se generó una metodología para extraer dichos drenajes y determinar la dirección en la que se mueven.

Esta metodología consiste en determinar dichos drenajes a partir del análisis de las propiedades de puntos que hacen parte del flujo, enmarcados en una matriz de 3x3 con los puntos vecinos. Entonces, la dirección en un punto está determinada en la selección del vecino cuya elevación es la menor entre todos los 8 vecinos del punto de análisis.

$$DDIRN(i - j) = 2^{d-1}$$

para $d=1,2,\dots,8$
(3.12)

Donde d es la dirección del drenaje. Este valor permite que se definan múltiples trayectorias para el drenaje pero solo una es permitida (aquella definida con el vecino de menor elevación). De manera gráfica se ilustra lo anteriormente dicho.

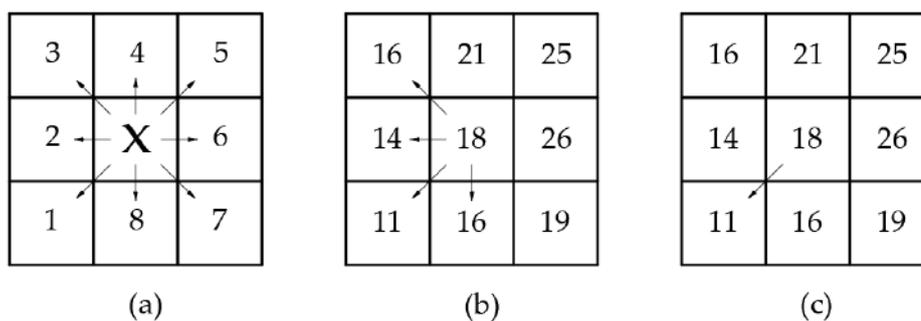


FIGURA 3.6: (a). Múltiple direcciones de flujo probables, (b). Ejemplo con altimetrías supuestas, (c). Dirección de flujo final (Holmgren, 1994)

3.3.2 Algoritmo de Holmgren

El algoritmo de Holmgren se desarrolló para la evaluación del *runoff* o la escorrentía en cualquier punto del terreno basándose en la suposición de que el agua discurre por la zona más escarpada. Esta hipótesis está fundamentada en el análisis de los

puntos o celdas vecinas del punto analizado, para lo cual se emplea una matriz 3x3, siguiendo la misma consideración del algoritmo D8.

El algoritmo asume que toda la escorrentía que alcanza una celda, se distribuye de igual manera en toda la celda, lo cual es una simplificación del problema ya que si se considerara que la escorrentía no se distribuye equitativamente en la celda, sería equivalente a que se tengan tamaños de celda variables en el análisis.

Contrario al algoritmo D8 (ver Figura 3.6), el propuesto por Holmgren considera que las 8 posibles direcciones que puede tomar el flujo son propensas a que el flujo se mueva en dicha dirección.

Por último, el algoritmo no admite que el flujo se desplace de una celda con menor elevación a una con mayor elevación, por lo que el algoritmo considera que en todo momento el flujo siempre está descendiendo (Holmgren, 1994).

Sin embargo, fue necesario determinar la función a partir de la cual se describe la forma en la que se distribuye el flujo, puesto que con una distribución unidireccional del mismo, como en el caso del algoritmo D8, toda la escorrentía es llevada directamente a la celda de menor elevación. En cambio, con una distribución multidireccional, como la aplicada con este nuevo algoritmo, el flujo es distribuido en todas las celdas de menor elevación (ver (b) en Figura 3.6) de manera proporcional al gradiente de sus pendientes. La primer distribución genera que el flujo se agregue a una sola celda lo que genera flujos estrechos, donde el flujo divergente es imposible. Sin embargo, con una distribución multidireccional se genera un flujo mas suave en donde el esparcimiento del flujo puede ocurrir en varias celdas y generar una trayectoria mas amplia.

La relación a continuación describe la proporción de flujo que se desplaza hacia cada celda dependiendo de la dirección analizada.

$$f_i = \frac{(\tan \beta)^x}{\sum_{j=i}^8 (\tan \beta_j)^x} \quad (3.13)$$

En donde i, j son las direcciones de flujo (1...8), f_i = proporción del flujo (0..01) en la dirección i , $\tan(\beta_i)$ = el gradiente de la pendiente entre la celda central y la celda en la dirección i y x = la variable del exponente.

Una de las características de esta función es que en el término $(\tan \beta)^x$, mientras mas alto sea el valor del exponente x , mas estrecho y convergente es el flujo, es decir, que mientras x se acerque mas a uno ($x = 1$) el flujo será mas divergente y multidireccional. Por el contrario, mientras x se acerque mas al infinito ($x = \infty$), la distribución tenderá a una distribución unidireccional.

3.3.3 Algoritmo Rho8

El método estocástico de ocho vecinos Rho8 está basado en la evaluación de cada vecino de la celda analizada teniendo en cuenta el verdadero "aspecto" de la pendiente. Cada píxel o celda analizada es tratada como una decisión. Cada celda debe seleccionar uno de sus ocho vecinos para direccionar el flujo. Sin embargo, el basarse en la hipótesis de algoritmo D8 en la que el flujo se mueve hacia la celda de menor elevación solo funciona exitosamente en pendientes perfectamente planares y orientadas

en el plano NESW. En pendientes curvas con múltiples direcciones en su trayecto este análisis no puede desarrollarse con el mismo éxito y tendría resultados que no asemejan la realidad de la distribución de un flujo.

Lo anteriormente dicho, es precisamente la base del algoritmo, puesto que la dirección del flujo debería precisamente tomar el aspecto de la pendiente. Entonces, para la evaluación de los 8 vecinos de un píxel p se sigue la siguiente lógica:

- Si todos los ocho píxeles vecinos del píxel p están por encima de p , entonces p discurre en sí mismo, si no,
- p apunta al vecino cuya $rhoslope_8$ es la mayor, en donde:

$$rhoslope_8 = z(p) - z(q) \quad (3.14)$$

con p como el píxel que se está analizando y q el píxel vecino, en las celdas ubicadas en NESW

- Para las celdas ubicadas en las esquinas (NE,SE,SW,NW)

$$rhoslope_8 = rho_8 \times (z(p) - z(q)) \quad (3.15)$$

donde rho_8 es una variable que toma valores al azar entre 0.5 y 1 teniendo en cuenta lo siguiente:

$$P = \begin{cases} rho_8 = 0 & \text{para } x < 0,5 \\ 2 - 1/x & \text{para } 0,5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

3.3.4 D_∞

Este algoritmo es una mejora al algoritmo de los 8 vecinos D8, en el que se asigna una sola dirección de flujo a cada celda (una cantidad continua entre 0 y 2π) en la pendiente de mayor valor aguas abajo de la celda analizada en las 8 facetas triangulares formadas en una ventana 3x3 con centro en el píxel de interés. El uso de facetas triangulares evita la aproximación involucrada en el ajuste de un plano y la influencia de vecinos más altos en el flujo cuesta abajo.

Donde la dirección no siga las direcciones cardinales o diagonales el área de pendiente ascendente se calcula distribuyendo el flujo de un píxel entre los dos píxeles de pendiente descendente de acuerdo con qué tan cerca está el flujo del ángulo directo al centro de ese píxel (Tarboron, 1997). Dado que un solo número debe ser guardado para cada píxel para representar el flujo, el almacenamiento computacional es simple y eficiente.

Se usa una representación centrada en bloques con cada valor de elevación tomado para representar la elevación del centro del píxel correspondiente. Cada uno de estos tiene un vector de pendiente descendente que, cuando se dibuja hacia afuera desde el centro, puede estar en un ángulo que se encuentra dentro o fuera del rango del ángulo de 45° de la faceta en el punto central. Si el ángulo del vector de pendiente está dentro del ángulo de la faceta, representa la dirección de flujo más empinada en

esa faceta. Si el ángulo del vector de deslizamiento está fuera de una faceta, la dirección de flujo más empinada asociada con esa faceta se toma a lo largo del borde más empinado. La dirección de flujo asociada con el píxel se toma como la dirección del vector de pendiente descendente más empinado de las ocho facetas (Tarboron, 1997).

Para implementar este procedimiento se debe considerar primero una sola faceta triangular, tal como se muestra en la Figura 3.7.

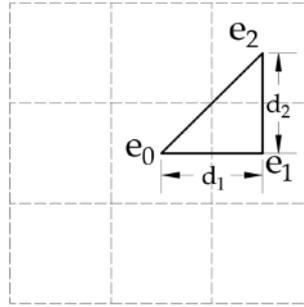


FIGURA 3.7: Definición de las variables para el cálculo de la pendiente en una sola faceta (Tarboron, 1997)

La pendiente cuesta abajo es representada por el vector (s_1, s_2) en donde:

$$s_1 = \frac{(e_0 - e_1)}{d_1} \quad (3.17)$$

$$s_2 = \frac{e_1 - e_2}{d_2} \quad (3.18)$$

Además, e_i y d_i son las elevaciones y las distancias entre los píxeles llamados como en la Figura 3.7. La dirección de la pendiente y la magnitud están dadas por:

$$r = \tan^{-1}\left(\frac{s_2}{s_1}\right) \quad (3.19)$$

$$s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (3.20)$$

En el caso donde un vector de pendiente no sea positivo, un ángulo de dirección de flujo con valor igual a -1 es usado para marcar el píxel como "no resuelto", lo que significa que es un área plana. Éstas direcciones de flujo no resueltas son resueltas de forma iterativa al obligarlas a fluir hacia un vecino de igual elevación que si tiene su dirección de flujo resuelta. Este es el mismo análisis para resolver planicies en el método del D8. Este método de representar direcciones de flujo basándose en facetas triangulares se llama D_∞ (un número infinito de posibles direcciones de flujo únicas).

Capítulo 4

Metodología

El marco metodológico de este documento tiene como objetivo describir el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo de las modelaciones y posteriormente el alcance de los objetivos planteados desde la identificación del problema. Este proceso constó de cinco etapas, las cuales se detallan a continuación.

4.1 ETAPA 1: ESTADO DEL ARTE, MARCO TEÓRICO Y CASO DE ESTUDIO

La primera etapa constó de la conformación del de estado del arte, en donde se recopiló información referente a estudios o investigaciones similares, enfocadas al uso de aplicativos informáticos para la predicción del *runout* de un deslizamiento y otras características consecuentes como su altura de depositación. A partir de este estudio preliminar de la literatura disponible y los enfoques de cada uno de estos estudios, se determinaron los fundamentos de esta investigación y la metodología a seguir para el desarrollo de las modelaciones y la selección misma de los aplicativos a implementar. Además, se construyó el marco teórico que sustenta este proyecto de investigación.

Además, se determinó realizar esta investigación, que se refiere a las cuencas de montaña en ambientes tropicales, teniendo como caso de estudio la cuenca de la quebrada La Liboriana, en el municipio de Salgar, Antioquia para desarrollar en ella la calibración de los modelos y aplicativos informáticos que se seleccionaron en una etapa posterior de esta metodología.

En 2015, en el municipio de Salgar, Antioquia, Colombia, en la cuenca de la quebrada La Liboriana ocurrieron deslizamientos detonados por una fuerte lluvia, cuyo material deslizado ocasionó un represamiento de la quebrada (Hoyos et al., 2019). Cuando la presa natural se rompió, destruyó varias casas y dejó más de 100 personas muertas.

Este caso en particular fue seleccionado para su análisis ya que se encuentra bien documentado (Aristizábal et al., 2019; Hidalgo y Vega, 2021). Se cuenta con un inventario de deslizamientos obtenido a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales de la zona (Ruiz-Vásquez y Aristizábal, 2018) y cuando ocurrieron, la magnitud y duración de la lluvia que los desencadenó, las pérdidas humanas y de infraestructura, entre otras.

El impacto que este suceso tuvo sobre la comunidad, las pérdidas materiales y el costo en vidas humanas, suscitó el interés tanto de los investigadores como de las

autoridades y entes de control de desastres por entender lo que ocurrió, los eventos previos, la magnitud de la lluvia (Hoyos et al., 2019), entre otros para reconstruir la cadena de eventos que dio como resultado dicho desastre. Sin embargo, dado que esta cuenca no estaba instrumentada (Marin, Velásquez y Sánchez, 2021; Ruiz-Vásquez y Aristizábal, 2018) para cuando ocurrió la avenida torrencial, múltiples fueron los obstáculos encontrados para sacar conclusiones inmediatas respecto a lo que pasó. Por lo tanto, distintos estudios se fueron desarrollando de manera que se pudiera tener una caracterización muy específica de las condiciones del terreno después de ocurridos los eventos (Velásquez et al., 2020), las condiciones meteorológicas que indujeron los deslizamientos y el contexto geográfico del municipio (Hoyos et al., 2019).

Dicho lo anterior, en este capítulo se pretende dar un contexto general de las condiciones geográficas, geológicas y meteorológicas de la cuenca de la quebrada La Liboriana, ya que son el punto de partida para el desarrollo posterior de los análisis de los resultados y las conclusiones que se obtengan a partir de estos. Es importante anotar, que de la cuenca se cuenta con un registro amplio de deslizamientos ocurridos tanto el 18 de mayo del año 2015, como de años anteriores. Sin embargo, para los fines de esta investigación solo se utilizaron los deslizamientos ocurridos en la fecha anteriormente mencionada, que son los que produjeron la avenida torrencial considerada y sobre la cual se generaron los estudios investigados como referencia. Estos deslizamientos ocurrieron en la zona del nacimiento del cauce de la quebrada, en el Cerro Plateado. La localización tanto de la cuenca como de los deslizamientos mencionados se presenta en la Figura 4.1.

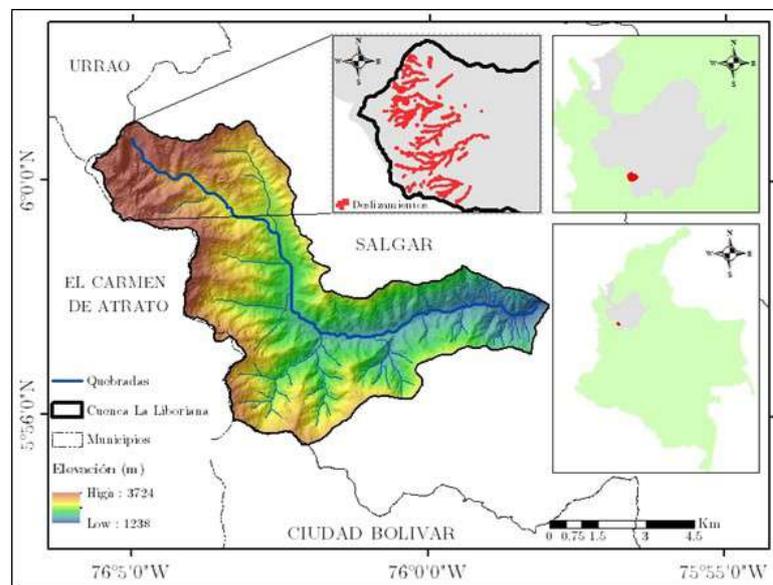


FIGURA 4.1: Ubicación de la zona de estudio

Salgar se encuentra en la parte centro-occidental de Colombia, en el suroeste del departamento de Antioquia, a 1250 msnm. Esta cuenca se une a la cuenca del río Barroso y ambos drenan en el río Cauca, uno de los ríos más importantes en el país.



FIGURA 4.2: Cerro Plateado, zona más elevada de la cuenca de la quebrada La Liboriana (Zona de Estudio). Imagen generada a partir de AutoDesk Infracad

La cuenca de la quebrada La Liboriana se caracteriza por sus pendientes empinadas y un clima húmedo tropical. La elevación promedio en la cuenca es de 2487 msnm. El Cerro Plateado, donde se encuentra el nacimiento de la quebrada, es la elevación mas alta que tiene la cuenca, que alcanza los 3609 msnm. Al rededor del 67% del área total de la cuenca tiene un gradiente de pendiente que excede los 30°. En la Figura 4.3 se muestra el mapa de pendientes de la zona de estudio.

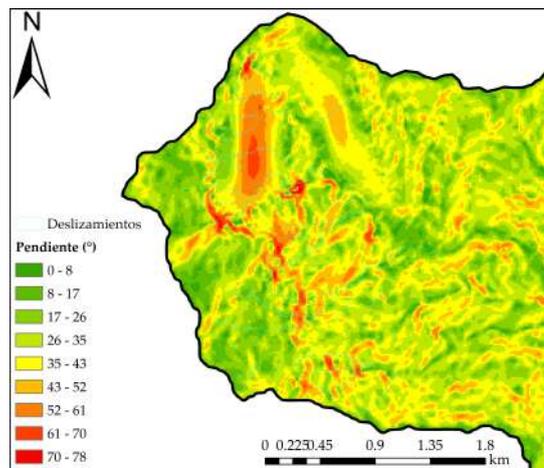


FIGURA 4.3: Pendiente en grados de la zona de estudio

La temperatura anual promedio es de 22° C y la precipitación es de 3073mm. El régimen de precipitación se caracteriza por presentar dos temporadas de lluvia, con picos en mayo y octubre.

Su geomorfología consiste en una región montañosa con una morfología rugosa, valles estrechos y pendientes muy empinadas con bosques en la parte superior. Además, en las zonas altas existen campos de cultivo y bosques tropicales profundos, sin embargo, el uso del suelo y la vegetación de la cuenca en general es muy variada. En la zona media y baja de la cuenca, tanto pastizales como cultivos de café han reemplazado los bosques. También se identifican áreas de pastoreo y desarrollo

urbano cerca del cauce.

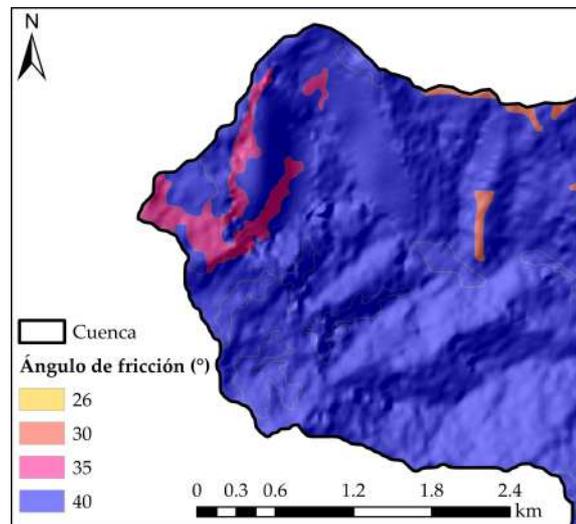


FIGURA 4.4: Ángulo de fricción de los suelos presentes en la cuenca

Una formación de roca sedimentaria del período cretácico (lutitas, limolitas, areniscas, sílex y conglomerados con algunas intercalaciones) y un cuerpo intrusivo del Mioceno predominan el ambiente geológico de la cuenca de la quebrada La Liboriana. Estos cuerpos rocosos sufren una severa meteorización in situ por el clima tropical húmedo, formando saprolito y suelos residuales bien desarrollados.

Se presentan suelos de diferente textura, con predominio de arcillas y calizas. En la primera capa predomina un material orgánico mientras que la segunda capa tiene un suelo arcilloso subyacente. Los suelos formados están bien drenados y tienen poca capacidad de retención. La profundidad del suelo depende de la pendiente, con valores que varían entre 0.2 y 1m (Hidalgo y Vega, 2021).

4.2 ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS APLICATIVOS

En el medio, existen una gran cantidad de aplicativos informáticos utilizados para la modelación de deslizamientos y ofrecen también una amplia variedad de resultados que permiten ser procesados con herramientas GIS de manera que puedan integrarse a otro tipo de estudios de mayor escala y con enfoques a la planeación de territorios y demás. Para la selección de los aplicativos a implementar en esta investigación se tuvo en cuenta como parámetro fundamental que fueran de libre descarga o en su defecto, que tuvieran facilidades para la obtención de licencias educativas. Esta premisa fue importante puesto que de la amplia cantidad de aplicativos encontrados, el conjunto se redujo, por lo que debían entonces tenerse otras consideraciones adicionales. Entre esas, era necesario verificar que estos modelaran el alcance del deslizamiento o que sus resultados pudiesen relacionarse con este parámetro, además de que la escala de trabajo fuera por lo menos regional. En este sentido, las opciones consideradas en dicha etapa fueron RAMMS, Flow-R, Debris 2D, R Avaflow, el módulo *Gravitational Process Path* GPP de SAGA GIS, RiverFlow2D y DEBRISFLOW PREDICTOR.

En el caso de RAMMS, un aplicativo comercial que modela deslizamientos de tipo avalanchas, *Debris Flow* y caídas de rocas, fue posible obtener una licencia estudiantil para su uso además de que permite hacer modelaciones en escala local y regional, por lo que fue el primer aplicativo que se utilizó para realizar las modelaciones. Tanto Flow R como el módulo GPP de SAGA GIS son de libre descarga, por lo que también fueron usados, teniendo en cuenta que estos dos permiten modelar eventos a escala regional, lo cual era otra de las premisas para la selección. La consecución de la licencia para Debris 2D debía hacerse directamente con sus desarrolladores, quienes después de evaluar las condiciones de esta investigación consideraron que por la disponibilidad de información y el objetivo planteado de este trabajo, su aplicación podría no haber brindado los resultados esperados por lo que no fue posible obtenerla. Para DEBRISFLOW PREDICTOR se hizo la solicitud de la licencia estudiantil pero tampoco fue posible obtenerla. RiverFlow2D no ofrece la posibilidad de obtener licencias estudiantiles y la escala de trabajo es local sin posibilidades de realizar modelaciones regionales, por lo que tampoco era adecuado para el caso de estudio.

Por lo anteriormente expuesto, RAMMS, FLOW R y el módulo *Gravitational Process Path* de SAGA GIS fueron los aplicativos seleccionados para la realización de esta investigación. En etapas posteriores, se calibraron los modelos seleccionados a partir de un inventario de escarpes que sucedieron el 18 de mayo del año 2015 en la cuenca y otros tantos registrados. Es importante mencionarlo, puesto que el último filtro para la selección final de los aplicativos consistió en la capacidad del aplicativo para modelar más de un escenario a la vez, ya que la calibración de estos se hizo a partir de este inventario de escarpes. A continuación se describen las generalidades de cada uno de estos aplicativos y su parametrización.

4.2.1 Modelo de evaluación de la trayectoria de flujo de amenazas gravitacionales a escala regional Flow R

Este aplicativo informático evalúa la susceptibilidad regional del flujo de escombros a partir del análisis GIS. Un mapa de susceptibilidad es el resultado principal desde donde es posible identificar áreas de fuentes potenciales y su posible extensión de propagación.

Para la evaluación de la propagación, el software utiliza dos tipos de algoritmos: el control de la ruta y la propagación del algoritmo de flujo de escombros y las leyes de fricción para determinar la excentricidad.

Luego, se incorporan al programa diferentes algoritmos de flujo para la evaluación de la propagación como The Holmgren (1984) donde se calcula la dirección del flujo y se usa un parámetro solo para controlar la divergencia del algoritmo; una versión modificada de Holmgren que produce una difusión más consistente, el algoritmo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984), D Infinity (Tarboron, 1997), Roh8 (Fairfield y Leymarie, 1991). Finalmente, también se utiliza el enfoque de dirección de flujo múltiple (Quinn et al., 1991) y The Freeman (1991).

En el caso del algoritmo de Holmgren, el aplicativo calcula la proporción de susceptibilidad en la dirección i , basándose en la Ecuación 3.13. A continuación se muestra la ecuación que resuelve el aplicativo para este algoritmo.

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^x} \forall \begin{cases} \tan \beta > 0 \\ x \in [1; +\infty[\end{cases} \quad (4.1)$$

Donde i, j son las direcciones de flujo, p_i^{fd} es la proporción de la susceptibilidad en la dirección i , $\tan \beta_i$ es el gradiente de pendiente entre la celda central y la celda en la dirección i y x es la variable exponente.

Parametrización del modelo

El aplicativo permite el ingreso de una amplia variedad de parámetros de entrada para realizar los análisis con los diferentes modelos de agotamiento de energía y dirección de flujo para así entregar la probabilidad máxima de ocurrencia de deslizamientos en las zonas donde se identifique que pueden ocurrir deslizamientos.

Para la simulación se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) con tamaño de celda 12.5×12.5 m obtenido de la misión satelital ALOS PALSAR (www.search.asf.alaska.edu). Además, se utilizó un ráster con las semillas, escarpes o iniciación de los deslizamientos que fueron identificados a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales de la zona, la pendiente del terreno, el mapa de aspecto y curvatura de la zona de estudio.

Dadas las condiciones de los parámetros de entrada, el modelo se configuró de acuerdo al algoritmo de dirección que iba a utilizarse, el método de cálculo y el algoritmo inercial en cada una de las modelaciones realizadas. Los conceptos anteriormente mencionados se amplían a continuación.

- **Método de cálculo**
Se refiere al tipo de corrida o modelación que quiera ejecutar quien esté realizando el proceso. El aplicativo ofrece tres opciones: *overview* que limita el modelo a solo evaluar las fuentes localizadas en la parte superior de cada deslizamiento, *quick* que también evalúa las celdas superiores como en el método anterior, pero además también propaga las fuentes restantes en una etapa posterior para luego realizar una prueba durante el procesamiento para identificar propagaciones previamente evaluadas que resultaron en valores mas altos de energía y susceptibilidad. Si tal propagación anterior se encuentra en el mismo lugar, el procesamiento actual se detiene. Por último ofrece el método *complete* el cual activa todas las áreas de origen, sin verificar las propagaciones procesadas previamente. Esta opción se puede elegir para controlar que la evaluación rápida no pase por alto ningún área de propagación, lo que puede ocurrir marginalmente en unas pocas celdas debido a las diferencias de propagación (Horton et al., 2013). En estas modelaciones, siempre se utilizó el método *quick* ya que con este los resultados obtenidos proporcionan información principalmente referente a la extensión total de los deslizamientos.
- **Algoritmos de dirección**
Tal como se explicó anteriormente, los algoritmos de dirección permiten la evaluación de las múltiples direcciones de flujo probables que puede seguir un flujo a partir del análisis de las celdas vecinas a la celda analizada utilizando como parámetro de comparación la altura de cada una de ellas. El aplicativo

permite evaluar 9 opciones de algoritmos, todos tomando como base el algoritmo D8. Todos fueron probados tal como se evidencia en el capítulo de la calibración de cada modelo y se analizan sus resultados con base al inventario de escarpes de la cuenca.

- Algoritmo inercial

Este algoritmo inercial, basado en una función de persistencia (Ecuación 4.2), en donde p_i^p es la proporción de flujo en la dirección i y $\alpha(i)$ es el ángulo entre la dirección previa y la dirección de la celda central a la dirección i , tiene como objetivo reproducir el comportamiento de la inercia y le da un peso a la dirección de flujo basándose en el cambio de dirección respecto a la dirección previa evaluada (Horton et al., 2013).

$$p_i^p = \omega_{\alpha(i)} \quad (4.2)$$

El programa permite evaluar tres opciones para la función de persistencia, las cuales son *proportional*, *cosines* y *Gamma(2000)*. En todos los casos, la dirección que permite el flujo ir hacia atrás es asignada con un valor de cero (0) precisamente para evitar la propagación hacia atrás. En la Tabla 4.1 se muestran los pesos dados de acuerdo a cada una de las opciones disponibles.

	ω_0	ω_{45}	ω_{90}	ω_{135}	ω_{180}
Proportional	1	0.8	0.4	0	0
Cosines	1	0.707	0	0	0
Gamma (200)	1.5	1	1	1	0

TABLA 4.1: Pesos de la función de persistencia (Horton et al., 2013)

Para esta investigación, se decidió utilizar siempre la opción de Gamma (2000) ya que es la que mayor peso le da a la dirección mas probable (ω_0) en la que el flujo se puede desplazar.

4.2.2 Modelo dinámico bidimensional de movimientos en masa rápidos en 3D en terreno alpino - RAMMS

Rapid Mass Movements RAMMS es un paquete informático que incluye tres módulos diferentes para el modelado de avalanchas, flujo de escombros y caída de rocas. Este software se basa en el modelo de fluido de Voellmy (ver Ecuación 4.3, que es un enfoque de una fase donde la deformación por cortante se ignora por completo.

$$S = \mu \rho H g \cos \phi + \left(\frac{\rho g u^2}{\zeta} \right) \quad (4.3)$$

Donde ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad, ϕ el ángulo de la pendiente, h es la altura del flujo y \mathbf{u} es el vector $u = (u_x, u_y)^T$ que consiste en la velocidad del flujo en la dirección x y y .

La fuerza normal en la superficie que se desliza $\rho h g \cos \phi$, puede ser resumida en un solo parámetro N . El modelo de Voellmy representa la resistencia de la fase sólida (μ es a veces expresada como la tangente del ángulo del corte interno) y una fase de fluido viscoso o turbulento (ζ fue introducido por Voellmy utilizando argumentos hidrodinámicos). Los coeficientes de fricción son los responsables del

comportamiento del flujo. La viscosidad domina cuando el flujo está a punto de detenerse y el coeficiente de fricción viscoso-turbulento cuando el flujo corre rápidamente.

Parametrización del modelo

Este aplicativo funciona a partir del ingreso de un modelo de elevación digital, para lo cual se usó el mismo que en las modelaciones realizadas en el aplicativo anterior, los valores de la viscosidad y el coeficiente de fricción viscoso turbulenta. Además, se calculó el espesor del suelo susceptible a deslizarse, el cual es esencial ante el análisis de problemas que involucran procesos hidrológicos desarrollados en laderas, así como en la propia estabilidad de taludes (Botero, 2018).

El modelo utilizado para calcular este espesor se basa en el comportamiento del suelo frente a las pendientes del terreno, teniendo en cuenta que cuanto más plana sea una región, mayor será la acción de la depositación y acumulación de material no consolidado, a medida que el ángulo de inclinación aumenta menor será la tasa de acumulación (Botero, 2018). El modelo del suelo susceptible a deslizarse está representado por la siguiente ecuación.

$$Z_s = (Z_{s_{max}} - Z_{s_{min}}) \times \left\{ \left[1 - \frac{1}{\tan \theta_{lim}} \tan \theta \right] \times [\tan h(a \times x)] \right\} + Z_{s_{min}} \quad (4.4)$$

Dónde:

- Z_s : Espesor del suelo resultante susceptible a deslizarse (m)
- $Z_{s_{max}}$: Espesor del suelo máximo sin consolidar previsto en el área de estudio (m)
- $Z_{s_{min}}$: Espesor del suelo mínimo sin consolidar observado en el área de estudio (m)
- θ : Valor de la pendiente en la ladera (°)
- θ_{lim} : Valor de la pendiente estipulado como límite de influencia para la alteración de capa de suelo (para valores mayores a esta pendiente no hay formación de suelo) (°)
- a : Parámetro adimensional que controla la curvatura del terreno (calibrado para la región de trabajo) (adimensional)
- x : Distancia horizontal de un punto considerado al drenaje mas cercano (m)

El valor de θ_{lim} se refiere a la inclinación a partir de la cual la actuación de este factor ya no interfiere en la variación del espesor del suelo, entendiéndose que los valores de pendiente iguales o superiores al nivel establecido representan aquellas áreas donde el espesor de suelo susceptible a deslizarse es mínimo/despreciable o incluso nulo.

4.2.3 Gravitational Process Path

El módulo GPP o *Gravitational Process Path* por sus siglas en inglés, es una herramienta del software SAGA GIS que simula el movimiento de un punto de masa sobre un modelo de elevación digital desde un sitio donde se inicia hasta el área de depositación. Por lo tanto, este incluye acercamientos para modelaciones empíricos, estocásticos y físicamente basados y provee la opción de modificar el terreno de acuerdo a la depositación del material durante su operación. El modelo ha sido exitosamente aplicado en la creación de mapas de susceptibilidad por riesgo a escala regional y el estudio de procesos geomorfológicos.

Para la modelación, el GPP incluye el acercamiento de O'Callahan y Mark (1984) basado en el flujo unidireccional, conocido como el acercamiento o algoritmo D8, que ha sido aplicado en hidrología y geomorfología. Además incluye distintos métodos para el cálculo del *runout* como el *Random Walk*, el modelo de dirección de un solo parámetro de Scheidegger y el PCM o *runout model of Perla et al. 1980*.

Con el modelo del *Random Walk*, que usa una forma estocástica para hallar la trayectoria del flujo, se hace posible calcular la dispersión lateral del proceso al realizar muchas iteraciones desde el mismo punto de inicio.

Este modelo cuenta con tres parámetros para calibrar el modelo y que permitan simular el comportamiento de un proceso geomorfológico. El primero corresponde a un umbral que define la pendiente del terreno máxima sobre la que es permitida el flujo divergente; el segundo corresponde a un exponente para flujo divergente, que controla el grado de divergencia del modelo y el tercero corresponde a un factor de persistencia que se usa para conservar la dirección del movimiento al ponderar la dirección de flujo actual de acuerdo a la inercia que se da en flujos de escombros o avalanchas de nieve (Wichmann, 2017).

Para una celda procesada, un conjunto \mathbf{N} de trayectorias potenciales de celdas es determinada a partir de los vecino inmediatos en ventans 3x3 que tienen una elevación igual o menor que la celda central. Esto se realiza en varios pasos. Primero que todo, para cada celda vecina i un valor de pendiente γ_i basado en el umbral de pendiente β_{thres} es calculado.

$$\gamma_i = \frac{\tan \beta_i}{\tan \beta_{thres}}, \quad \beta_i \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, 8\} \quad (4.5)$$

Donde β_i es la pendiente a la celda vecina en la dirección i . El valor máximo de $\gamma_{max} = \max \{\gamma_i\}$ es una medida de cuán cerca la pendiente al vecino más escarpado es al umbral de pendiente. En el caso en donde $\gamma_{max} > 1$, el conjunto de \mathbf{N} es únicamente evaluado en el vecino con mayor pendiente.

Parametrización del modelo

Para la parametrización de este modelo se utilizó el mismo modelo de elevación digital usado en los casos anteriores, las semillas en formato ráster que indican las zonas desde donde se iniciaron deslizamientos, tal como se utilizó para Flow R y el ángulo de fricción en formato vectorial de los suelos presentes en la cuenca, que se muestran en la Figura 4.4.

En la configuración de cada modelo, se debe determinar la forma en la que se espera que se deslice el suelo cuesta abajo desde el punto donde inicia el deslizamiento. El módulo GPP ofrece dos opciones: una en donde solo se analiza una única dirección de flujo que selecciona la celda como la siguiente en el camino siempre y cuando su altura sea la menor respecto a las demás celdas analizadas, la otra opción basada en el *Random Walk* es un acercamiento de múltiple dirección que es sensible a las condiciones locales de pendiente (Wichmann, 2017). En las modelaciones ejecutadas con esta herramienta, una pequeña porción fue ejecutada con el algoritmo unidireccional, solo para chequear los resultados. Todas las demás, se hicieron con el *Random Walk* ya que tiene en cuenta todas las posibles direcciones de flujo.

Para la determinación del *runout* que es usualmente descrita como las distancias verticales y horizontales recorridas por una partícula desde su posición de inicio y fin la herramienta ofrece tres opciones basadas en la energía: *Geometric gradient* que define el desplazamiento vertical como la distancia vertical entre el área de liberación y el final del depósito y la distancia horizontal se define como la distancia horizontal entre estos dos puntos (Heim, s.f.) y para su utilización se requiere utilizar un ángulo de fricción ya sea global o un ráster con un ángulo de fricción para cada una de las celdas analizadas. La otra opción, *Fahrboeschung* la distancia horizontal es calculada de la misma manera que en la anterior pero la distancia horizontal no se define como la distancia horizontal entre el punto de inicio y fin sino como la longitud de la proyección horizontal de la verdadera longitud. La última opción *Shadow angle* define el desplazamiento vertical como la distancia vertical entre la ubicación del primer impacto en el talud y el final del depósito. El desplazamiento horizontal se define como la distancia horizontal entre la ubicación del primer impacto y el final del depósito (Wichmann, 2017).

Adicional a estas opciones, el *runout* también se puede evaluar con un modelo de fricción de un solo parámetro que fue desarrollado para simular caídas de rocas y y el modelo PCM que es un modelo de fricción de dos parámetros que originalmente fue desarrollado para calcular el *runout* de avalanchas y que está basado en el modelo de Voellmy.

Todas las opciones anteriormente mencionadas fueron utilizadas y sus resultados, así como los resultados de todas las modelaciones ejecutadas con RAMMS y Flow R se muestran de forma gráfica en los apéndices A, B y C.

4.3 ETAPA 3: CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

En esta etapa se realizaron análisis de sensibilidad de los parámetros, buscando la calibración del modelo, de manera que cada uno de ellos fuera capaz de reproducir los eventos ocurridos el 18 de mayo del año 2015, en el municipio de Salgar, Antioquia.

En el caso de Flow R y el GPP, se sugiere hacer uso de ellos en situaciones a escala regional ya que los parámetros empíricos pueden ser transpuestos a ambientes similares, lo que permite realizar calibraciones de manera mas sencilla en zonas donde existen inventarios de eventos pasados y aplicar los parámetros mas óptimos a una región completa. En cambio, RAMMS permite hacer modelaciones de casos específicos y análisis regionales también, lo que es una ventaja sobre los otros dos

aplicativos, ya que podría considerarse realizar la calibración del modelo con un solo caso en específico y luego replicar los valores de los parámetros para los demás deslizamientos o realizar la calibración con un conjunto de datos mas extenso que involucre toda una región.

Las limitantes de Flow R y GPP en comparación con RAMMS están enfocadas a que los dos primeros no involucran parámetros físicos ni parámetros de control locales de las zonas de estudio. Sin embargo, la cantidad de información que se requiere para correr los dos primeros y el segundo es considerablemente mas baja o mas sencilla toda vez que es de mas fácil consecución y de calidad aceptable.

La integración de estos aplicativos en esta investigación consistió en la ejecución de múltiples modelaciones con diferentes combinaciones de parámetros de entrada de acuerdo sus requerimientos de datos de entrada y múltiples configuraciones de los algoritmos que ejecutan cada uno de ellos. A este proceso se le denominó como análisis de sensibilidad y calibración ya que el resultado que se esperaba de este ejercicio era poder reproducir los deslizamientos ocurridos en el evento seleccionado como caso de estudio.

Para el desarrollo de estas modelaciones, se utilizaron varios parámetros de entrada para cada uno de los aplicativos. Sin embargo, el modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la misión satelital ALOS PALSAR fue el parámetro de entrada común para todos los aplicativos, así como el inventario de escarpes de los deslizamientos. Es importante aclarar que este inventario contempla todos los deslizamientos ocurridos en toda la extensión de la cuenca de la quebrada La Liboriana, sin embargo, para efectos de este trabajo, solo se analizaron los deslizamientos ocurridos el 18 de mayo del 2015, que como se muestra en la Figura 4.5, corresponden a los deslizamientos señalados en color rojo. Los demás parámetros se detallan para cada aplicativo mas adelante.

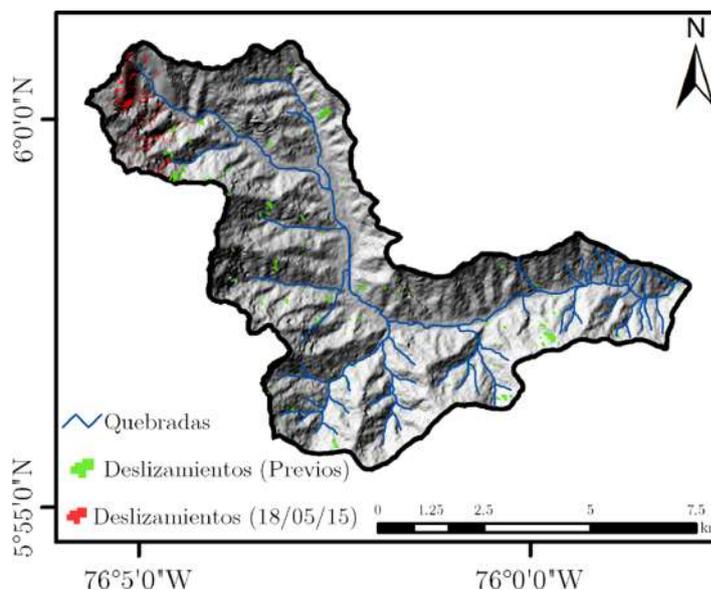


FIGURA 4.5: Inventario de deslizamientos de la cuenca de la quebrada La Liboriana

4.3.1 FLOW R

Con este aplicativo se ejecutaron un total de 20 modelaciones. Esta cantidad se determinó a partir de las características de los parámetros de entrada de este aplicativo y este mismo criterio fue aplicado en los otros aplicativos utilizados.

El aplicativo permite evaluar la dirección de flujo con diferentes algoritmos de dirección y distintos criterios para determinar la inercia y el mecanismo a partir del cual detiene cada modelación. Sin embargo, el manual de usuario de Flow R sugiere que el algoritmo de Holmgren (mencionado en la teoría del documento) o su variable modificada produce resultados de mejor calidad o mas ajustados a la realidad en comparación a los otros algoritmos. Por lo tanto, si bien se ejecutaron modelaciones para revisar los resultados obtenidos con cada uno de los algoritmos disponibles, el fuerte de la calibración de este aplicativo se direccionó a determinar la mejor combinación de parámetros con el algoritmo de Holmgren Modificado.

Modelación	Parámetros de entrada	Algoritmos de dirección
1		HM
2		H
3		D8
4		D ∞
5		Rho8
6	DEM	Freeman
7	Semillas	Quinn
8	Pendiente	Wichmann
9	Curvatura	Gamma
10		HM
11		HM
12		HM
13		HM
14		HM
15		HM
16	DEM	HM
17	Semillas	HM
18	Pendiente	HM
19	Aspecto	HM
20		HM

TABLA 4.2: Configuración de los ensayos ejecutados en Flow - R

En la tabla anterior, H corresponde al algoritmo de Holmgren y HM corresponde al algoritmo de Holmgren Modificado.

4.3.2 RAMMS

En el caso de RAMMS se ejecutaron un total de 30 modelaciones. Como ya se explicó anteriormente, de acuerdo a los parámetros de entrada del aplicativo, que son el DEM, las semillas donde inician los deslizamientos, la altura del estrato probable que se desliza explicada en la parametrización del modelo y los parámetros reológicos del suelo (viscosidad y coeficiente de fricción turbulenta), se decidió la cantidad

de modelaciones a ejecutar.

Dado que los parámetros concernientes al terreno y la iniciación de de los deslizamientos es exactamente la misma entrada para las modelaciones, los parámetros que se variaron fueron la viscosidad, el parámetro de fricción turbulenta y el espesor del suelo. El manual de usuario de RAMMS sugiere que para un deslizamiento como lo es un *Debris Flow*, los valores de viscosidad se encuentran entre 0.05 y 0.4 Pa.s y para el coeficiente de fricción turbulenta los valores se encuentran entre 200 y 1000 m/s^2 . No obstante, se decidió modificar los valores de viscosidad del suelo por encima del rango superior ya que en ensayos de sensibilización y aprendizaje de uso del aplicativo, se realizaron un par de ejercicios con los valores dentro de este rango y una pequeña porción de los deslizamientos reales y los resultados permitieron inferir que con estos valores no se estaban describiendo los suelos presentes en la cuenca del caso de estudio. Por lo tanto, se utilizó un rango de valores entre 0.5 y 0.7 Pa.s. Para el espesor del suelo se utilizó la expresión de la Ecuación 4.4. La densidad de la mezcla también podría ser modificada, pero se decidió dejarla como un valor estándar de 2000 kg/m^3 ya que los resultados no son sensibles al cambio de este parámetro. En la Tabla 4.3 se muestra la configuración de cada modelo ejecutado.

4.3.3 GRAVITATIONAL PROCESS PATH

Por último, para el *Gravitational Process Path* GPP, entre los parámetros de entrada se seleccionaron el modelo de elevación digital, los escarpes y el ángulo de fricción. Si bien, este aplicativo permite muchos otros parámetros para sus análisis, se decidió sólo utilizar aquellos que también se admiten en los otros aplicativos, para conservar la simplicidad de las modelaciones y para que la comparación entre sus resultados se base en la misma información tanto como sea posible.

Dicho lo anterior, se presenta la tabla con las combinaciones de algoritmos utilizados para realizar las modelaciones con el GPP. Tanto PDE como PDF significan parámetros de entrada y parámetros de fricción respectivamente. Además, UP, significa umbral de pendiente y A corresponde al ángulo de fricción interna del suelo. En la Tabla ??

En la tabla 4.4, el *runout* está numerado del 1 al 5, correspondiendo a lo siguiente: (1) *Geometric Gradient*, (2) *Fahrboeschung*, (3) *Shadow Angle*, (4) *Parameter friction model* y (5) PCM.

Todos los resultados obtenidos a partir de esta calibración, en la que se ejecutaron todas las modelaciones relacionadas en cada aplicativo, tanto para RAMMS, Flow R como para el módulo GPP de SAGA GIS se encuentran en los apéndices A, B y C, respectivamente.

4.4 ETAPA 4: VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Durante el desarrollo de esta investigación se determinó que era importante definir si la calibración de los modelos hecha podría aplicarse a cualquier cuenca con características topográficas, climáticas, altimétricas y geológicas similares al caso de estudio o si por el contrario, el ejercicio de calibrar los modelos debía hacerse para

Modelación	Parámetros de entrada		Parámetros de fricción		Altura
	DEM	Semillas	μ	ξ	
1	X	X	0.6	500	A
2	X	X	0.6	600	A
3	X	X	0.6	700	A
4	X	X	0.6	800	A
5	X	X	0.6	900	A
6	X	X	0.6	1000	A
7	X	X	0.5	500	A
8	X	X	0.5	600	A
9	X	X	0.5	700	A
10	X	X	0.5	800	A
11	X	X	0.5	900	A
12	X	X	0.5	1000	A
13	X	X	0.5	500	B
14	X	X	0.5	600	B
15	X	X	0.5	700	B
16	X	X	0.5	800	B
17	X	X	0.5	900	B
18	X	X	0.5	1000	B
19	X	X	0.7	500	A
20	X	X	0.7	600	A
21	X	X	0.7	700	A
22	X	X	0.7	800	A
23	X	X	0.7	900	A
24	X	X	0.7	1000	A
25	X	X	0.7	500	B
26	X	X	0.7	600	B
27	X	X	0.7	700	B
28	X	X	0.7	800	B
29	X	X	0.7	900	B
30	X	X	0.7	1000	B

TABLA 4.3: Configuración de los ensayos ejecutados en RAMMS

cada cuenca en específico.

Por lo tanto, se ejecutaron cada una de las modelaciones que mejor resultados brindaron en la calibración hecha para la cuenca de la quebrada La Liboriana, en una cuenca que tuviera características similares a las anteriormente mencionadas y sobre la cual existiera información que pudiera ser contrastada con los resultados obtenidos. La cuenca de la quebrada La Argelia, ubicada en el municipio del Carmen de Atrato en el departamento del Chocó fue la cuenca seleccionada para este ejercicio puesto que cuenta con un inventario de deslizamientos que fue realizado a partir de un análisis multitemporal de imágenes satelitales obtenidas del software SAS Planet y cuyo ejercicio fue similar al llevado a cabo por Ruiz-Vásquez y Aristizábal, en donde se digitalizaron tanto los escarpes como los cuerpos de cada deslizamiento. Esta es la única información que existe que puede ser contrastada en el análisis de los resultados obtenidos a partir de ésta validación. En la Figura 4.6 se muestra su localización.

Modelación	PDE			PDF		UP	A
	DEM	ESC	ϕ	MODELO	RUNOUT		
1	X	X		Random Walk	1		
2	X	X		Random Walk	2		
3	X	X		Random Walk	3		
4	X	X		Random Walk	4		
5	X	X		Random Walk	5		
6	X	X		Maximum Slope	1		
7	X	X		Maximum Slope	2		
8	X	X		Maximum Slope	3		
9	X	X		Maximum Slope	4		
10	X	X		Maximum Slope	5		
11	X	X		Random Walk	1	45	
12	X	X		Random Walk	2	45	
12	X	X		Random Walk	3	45	
14	X	X		Random Walk	4	45	
15	X	X	X	Random Walk	5	45	
16	X	X	X	Random Walk	1	40	
17	X	X	X	Random Walk	2	40	
18	X	X	X	Random Walk	3	40	
19	X	X	X	Random Walk	4	40	
20	X	X	X	Random Walk	5	40	
21	X	X	X	Random Walk	1	20	
22	X	X	X	Random Walk	1	25	
23	X	X	X	Random Walk	1	30	
24	X	X	X	Random Walk	1	21	
25	X	X	X	Random Walk	1	22	
26	X	X	X	Random Walk	1	23	
27	X	X	X	Random Walk	1	24	
28	X	X	X	Random Walk	1	26	
29	X	X	X	Random Walk	1	27	
30	X	X	X	Random Walk	1	28	
31	X	X	X	Random Walk	2	25	
32	X	X	X	Random Walk	2	26	
33	X	X	X	Random Walk	2	27	
34	X	X	X	Random Walk	2	28	
35	X	X	X	Random Walk	2	30	
36	X	X	X	Random Walk	3	20	5
37	X	X	X	Random Walk	3	20	10
38	X	X	X	Random Walk	3	20	15
39	X	X	X	Random Walk	3	20	20
40	X	X	X	Random Walk	3	20	25

TABLA 4.4: Configuración de los ensayos ejecutados en SAGA GIS con el módulo GPP

De acuerdo al esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio, hay tres climas dominantes en el Carmen de Atrato. Frío, templado muy húmedo y cálido muy húmedo, perteneciendo la cuenca al primero de ellos. Este piso térmico

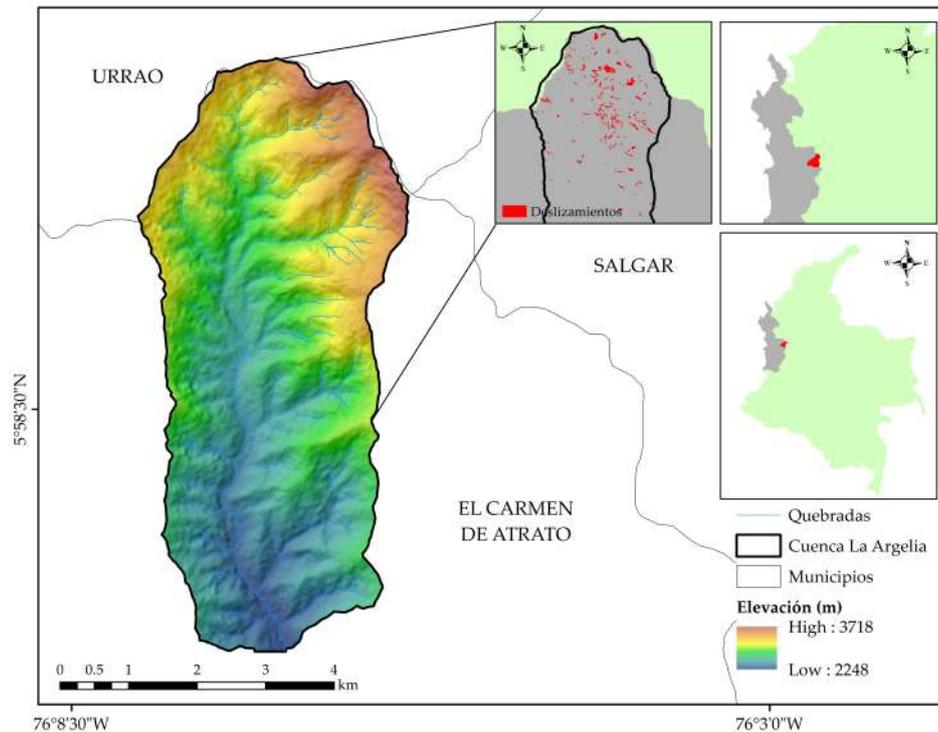


FIGURA 4.6: Ubicación de la cuenca de la quebrada La Argelia

comprende las partes altas de la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, entre 2000 y 3000 msnm, constituido por los Farallones de Citará. Además, de acuerdo a la información obtenida a partir de la memoria explicativa de la plancha 165 Carmen de Atrato del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) del año 1986, en esta zona, se identifica un bosque muy húmedo montano bajo, con límites climáticos de temperatura media aproximada entre 12° y 18°C, con un promedio anual de lluvias de 2000 a 4000mm.

El Carmen de Atrato es un territorio montañoso con formadas quebradas y escarpadas, suelos poco o moderadamente evolucionados y generalmente desaturados con afloramientos rocoso y en otros con residuos de cenizas volcánicas. El municipio además, se encuentra en las vertientes occidentales de la Cordillera Occidental cuyas características litológicas son muy variadas, pues hay afloramiento de rocas arcillo-arenosas, de buzamientos generalmente fuertes, rocas volcánicas y rocas graníticas; nuevamente rocas volcánicas y por último una secuencia arcillo-arenosa de buzamientos muy suaves a casi horizontales.

La formación predominante sobre la cuenca de la quebrada La Argelia es la formación Barroso, que hace parte del grupo Cañasgordas. En ella se encuentran rocas espilitas, diabasas, basaltos, basaltos porfídicos, aglomerados y brechas. Al norte del Carmen de Atrato afloran cuerpos lenticulares de diabasas con intercalaciones de cherts oscuros, importantes por su relación a mineralizaciones de tipo hidrotermal y volcano-sedimentarias.

Se calcula que el emplazamiento de la Formación Barroso a su posición actual se dio en una edad post- Coniaciano y Pre-Eoceno, si se tiene en cuenta que hacia el

Peste es intruida por el Batolito Mandé. No es posible aún precisar la edad de extrusión mas allá del Cretáceo-Pre-Eoceno.

Esta cuenca difiere a la cuenca seleccionada en el caso de estudio en el sentido de que la primera no está tan bien documentada como la segunda. De hecho, ésta área está cubierta de selva en un 80 %, es poco habitada y hay escasas vías de comunicación, por lo que los eventos ocurridos que son objeto de éste análisis pudieron haber pasado desapercibidos para las autoridades al no haber generado ningún tipo de pérdida material o repercusiones en la población del municipio.

Para poder afirmar que esta cuenca posee características similares a la cuenca del caso de estudio, se realizó un cuadro comparativo para determinar las similitudes entre ambas.

CARACTERÍSTICA	LA LIBORIANA	LA ARGELIA
Elevación promedio (msnm)	2487	2500
Temperatura (° C)	22	18
Pendiente promedio (°)	30	30
Precipitación anual (mm)	3073	2500
Usos del suelo	Agricultura Pastizales	Explotación de bosques Agricultura Ganadería

TABLA 4.5: Comparación de las características de cada cuenca

A partir de los datos de elevación promedio, la temperatura, los valores de precipitación y de pendiente, es posible concluir que las cuencas son similares sobre todo en la climatología que presentan, ambas pertenecen a una zona tropical y están fuertemente expuestas a ciclos de lluvia de gran intensidad, por lo que el análisis puede desarrollarse en la misma.

4.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la última etapa de esta investigación, se realizaron todos los análisis de los resultados obtenidos a partir del cálculo del error medio cuadrático y el uso de la curva ROC, un método estadístico para la determinación del desempeño de un modelo independientemente del área en la que se emplee. Este proceso se hizo tanto para los resultados obtenidos en la calibración de los modelos como para la validación de los mismos. Además, se discutieron los resultados obtenidos y se contrastaron respecto a otras investigaciones que desarrollaron ejercicios similares al desarrollado aquí y las diferencias entre las metodologías seguidas y los parámetros de entrada utilizados.

Por último, se desarrollaron las conclusiones a las que se llegó una vez elaborado todo el proceso anteriormente descrito y se da respuesta la hipótesis planteada desde la etapa del anteproyecto y que le dio origen y sustento al trabajo actualmente presentado. Sin embargo, dada la extensión de ésta etapa, se separó de la metodología y se presenta completa en el capítulo a continuación.

Capítulo 5

Análisis de Resultados y Discusión

Si bien se ejecutaron todas las modelaciones referidas en la calibración para cada aplicativo seleccionado, en este capítulo se hace mención a la modelación cuyos resultados son gráficamente mas parecidos a lo que ocurrió realmente el 18 de mayo del año 2015 en la cuenca de la quebrada La Liboriana, en el municipio de Salgar, Antioquia. En ese sentido, se presentan tanto para RAMMS, Flow R como para el módulo *Gravitational Process Path* los resultados obtenidos para cada uno de ellos y los análisis de los parámetros ingresados y su incidencia en los resultados.

Es importante mencionar que los resultados guardan relación en cuanto a que se están evaluando los mismos deslizamientos con los mismos parámetros o derivados de los mismos para cada aplicativo. Sin embargo, entre los tres aplicativos no se obtuvo necesariamente el mismo resultado (en términos del tipo de información que ofrecen) puesto que no todos están direccionados a la obtención de la altura de depositación o el alcance como tal del deslizamiento, aún cuando pueda concluirse algo al respecto a partir de estos.

Además, el criterio principal a partir del cual se seleccionó el mejor modelo para cada aplicativo fue su similitud gráfica con los deslizamientos analizados en el caso de estudio. Es decir, se revisaron todos y cada uno de los resultados obtenidos para cada aplicativo y se escogió el que aparentemente lograba reproducir en forma y longitud los deslizamientos del caso real.

5.1 Resultados

5.1.1 Flow -R

De acuerdo a las modelaciones ejecutadas (ver Tabla 4.2), se obtuvieron múltiples resultados. Sin embargo, el objetivo de realizar dichas modelaciones era encontrar la combinación de parámetros y algoritmos mas óptima que lograra simular los eventos ocurridos en el caso de estudio seleccionado. En ese orden de ideas, no todos los resultados lograron dicho objetivo, por lo que tuvieron que ser desechados.

Aquellos resultados que cumplían con el criterio de selección anteriormente mencionado, fueron analizados nuevamente entre ellos y fueron revisados nuevamente para seleccionar el que mas parecido tuviera con la realidad.

Es importante mencionar que con Flow R es posible obtener resultados relacionados a la probabilidad de que un deslizamiento tome esa dirección de flujo desde una celda señalada previamente como el sitio de inicio del movimiento.

Luego de analizados los modelos y sus resultados, se encontró que el modelo 19 fue el que mejores resultados proporcionó basado en la coincidencia gráfica entre los deslizamientos reales y los simulados. En la Figura 5.1 se muestran dichos resultados.

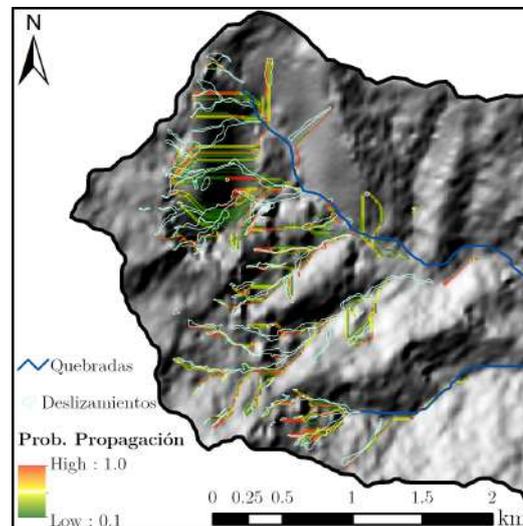


FIGURA 5.1: Resultados del modelo con Flow R

Para la ejecución de este modelo se utilizó el DEM con resolución de 12.5×12.5 m, las semillas donde se iniciaron los deslizamientos, la pendiente y el ráster correspondiente al aspecto de la zona de estudio. Además, para este se ejecutó el algoritmo de Holmgren modificado en el que se configuró un $dh=0.005$ y un valor de $x=25$. Es importante mencionar que el valor de dh corresponde a una modificación hecha por el desarrollador del aplicativo, al algoritmo de Holmgren, en donde la altura de la celda central (celda en análisis) es cambiada por este factor, por lo que el gradiente de pendiente también se modifica. Esto contribuye a mejorar la rugosidad del DEM y a producir una dispersión mas consistente ya que relaciona la altura real del flujo con las alturas de los vecinos adyacentes (Horton et al., 2013).

La configuración del modelo consistió en utilizar el DEM, la pendiente y el aspecto del terreno, así como el ráster con los escarpes de los deslizamientos como parámetros de entrada. El método de cálculo seleccionado fue el *Quick*, con el algoritmo de Holmgren Modificado como el algoritmo de dirección seleccionado, la inercia calculada a partir de definirle unos pesos con la función de Gamma.

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, en la sección 3.3.2, el valor de x corresponde a una variable que controla la divergencia del flujo, la cual mientras mas alejada de la unidad se encuentre, produce flujo mas convergente. Dentro del análisis de sensibilidad, se identificó la incidencia de este parámetro dentro de los resultados obtenidos, y se ejecutó un análisis de este tipo para valores de x equivalentes a 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 y 25.0. Es claro que para los primeros valores, se obtuvo una mancha de probabilidad muy extensa, es decir, divergente, que tenía en cuenta áreas muy alejadas desde donde se tienen registros de deslizamientos, por lo que estos valores fueron rápidamente descartados. En el caso de 15.0, 20.0 y 25.0

los resultados son muy similares y las diferencias entre uno y otro son apenas apreciables. Es por esto que se determinó no evaluar mas valores después de 25.0, al no encontrar diferencias con el aumento de este valor.

Respecto a los demás parámetros relacionados en la Tabla 4.2, el método de cálculo seleccionado *Quick* responde a la manera en la que se realiza el proceso de análisis interno. En este caso, corresponde a una evaluación rápida que activa primero todas las celdas de origen superiores (como en el tipo de vista general), pero que también propaga las fuentes restantes en una etapa posterior. Luego se realiza una prueba durante el procesamiento para identificar propagaciones previamente evaluadas que resultaron en valores más altos de energía y susceptibilidad. Si tal propagación anterior se encuentra en el mismo lugar, el procesamiento actual se detiene. El algoritmo inercial dentro de las modelaciones lo que pretende es reproducir el comportamiento de la inercia, en términos de la dirección que debe tomar el flujo basándose en la dirección de la celda anterior. En ese orden de ideas, la dispersión del flujo diagonalmente siempre se privilegió en todas las corridas, así como en la misma dirección que ya traía desde la celda anterior, y todas las celdas que estuviesen detrás dejaron de considerarse, puesto que no es posible que el flujo fluya hacia atrás. Todas estas fueron configuraciones del modelo que contribuyeron al resultado obtenido pero que solo representan limitaciones a la simulación para ahorrar tiempos de cómputo y determinan un comportamiento lógico de la mezcla que se estaba modelando.

5.1.2 RAMMS

Para RAMMS también se realizaron diferentes modelaciones que a diferencia de Flow R no variaron en cuanto a los parámetros de entrada, pues para cada corrida realizada se utilizaron el mismo modelo de elevación digital, la capa correspondiente a las semillas donde se generaron los deslizamientos registrados en el caso de estudio y la altura del estrato deslizando que fue calculado a partir de la metodología que ya fue descrita. En la Figura 5.2 se muestran los resultados obtenidos a partir del cálculo del espesor susceptible a deslizarse.

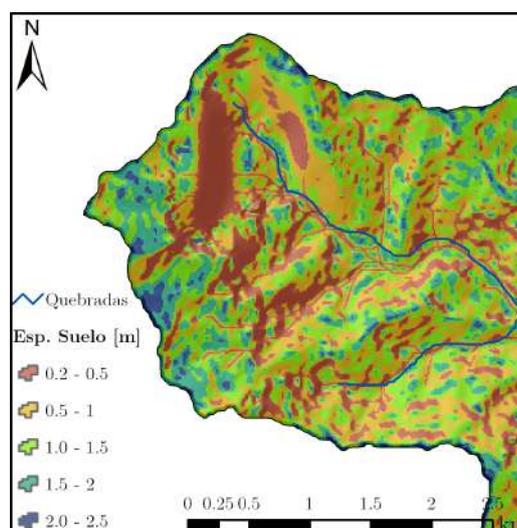


FIGURA 5.2: Espesores del estrato que se desliza considerados

Las variaciones de estas simulaciones estaban enfocadas en los valores de los parámetros de fricción de la viscosidad del suelo (μ) y el coeficiente de arrastre (ζ). La densidad de estas modelaciones se consideró siempre en $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ya que en la literatura este es un valor aceptable para el tipo de suelos que se considerando en estas simulaciones.

El modelo que mejores resultados ofrece, en términos gráficos corresponde al modelo 24 (ver Tabla 4.3). Para este se consideró una altura de acuerdo a la metodología explicada en el Capítulo 3.

El valor de viscosidad utilizado en esta modelación corresponde a $\mu=0.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ y el coeficiente de arrastre (fricción viscoso-turbulenta) $\zeta=1000 \text{ m}/\text{s}^2$. Estos dos parámetros son quienes describen el comportamiento del flujo. La viscosidad es la que gobierna cuando el flujo está a punto de detenerse o dicho de otra manera, cuando la energía cinética del flujo se está agotando, mientras que la fricción viscoso-turbulenta es la que gobierna cuando el flujo se está desplazando rápidamente. Si bien RAMMS permite que se consideren diferentes valores de viscosidad y fricción viscoso-turbulenta dentro de una misma simulación, para esta investigación se consideraron constantes a través del tiempo dado el limitante de no contar con información primaria y la variabilidad espacial de los parámetros.

Dicho lo anterior, los resultados obtenidos en RAMMS corresponden a la altura máxima de depositación del flujo, la velocidad máxima del mismo desarrollada en su trayectoria, la presión máxima y el momentum máximo (ver Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5. Sin embargo, este último resultado no se tuvo en cuenta para esta investigación puesto que no guarda relación con los resultados obtenidos con los demás aplicativos utilizados. A continuación se presentan tres figuras correspondientes a los tres primeros resultados mencionados anteriormente.

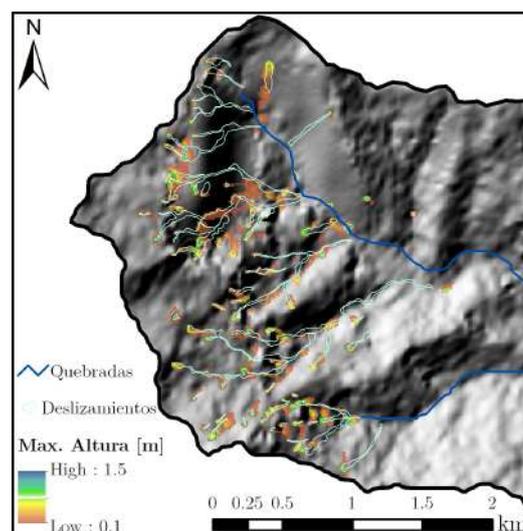


FIGURA 5.3: Altura máxima obtenida

La configuración del modelo seleccionado consistió en utilizar el DEM y los escarpes como parámetros de entrada referentes al terreno y los deslizamientos. La densidad de la mezcla se mantuvo en $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ por defecto, con una viscosidad de

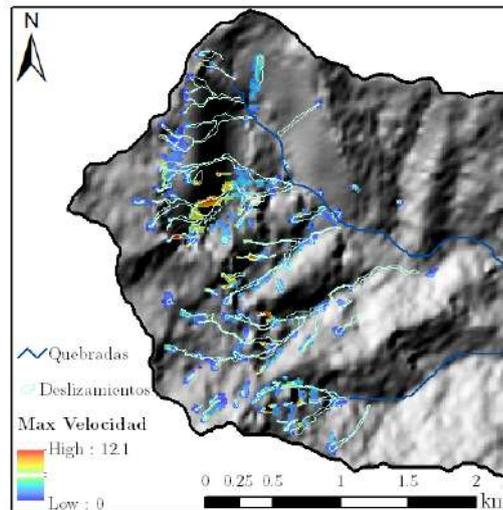


FIGURA 5.4: Velocidad máxima obtenida

0.7 y un coeficiente de arrastre o fricción viscoso-turbulenta de $1000m/s^2$. Los espesores ingresados se calcularon a partir de la expresión dada en la parametrización del modelo.

Respecto a estos resultados se puede observar en la Figura 5.3 que los espesores máximos obtenidos en las zonas de depositación del flujo corresponden a 1.5m de altura y que estos solo se producen en zonas donde probablemente el flujo se encontró con obstrucciones en su trayectoria. En el resto de cada escarpe de cada deslizamiento se identifican alturas bajas, del orden de 10cm o valores similares.

Como puede observarse en la Figura 4.3, se identifican pendientes entre 50° y 78° , que son valores considerablemente altos, configurando un terreno bastante escarpado por lo que espesores de 10cm de flujo podrían incluso considerarse demasiado altos teniendo esto en consideración. Esto también está estrechamente relacionado con el tiempo que podrían haber tomado los deslizamientos en ocurrir y transportarse hasta su lugar final de depositación. Sin embargo, el tiempo no hace parte del alcance de esta investigación por lo que no se ahonda en este concepto.

5.1.3 Gravitational Process Path

Respecto al módulo *Gravitational Process Path* de SAGA GIS, el resultado obtenido a partir de este es la delineación de la trayectoria de un deslizamiento. La configuración del modelo consistió en ingresar el DEM, los escarpes y el ángulo de fricción como parámetros de entrada. Los análisis se hicieron a partir del modelo de Random Walk con la medición del runput con el modelo de fricción de un parámetro.

Además, como consta en esta tabla, el ángulo de fricción del suelo fue ingresado como una capa. Dicha información se muestra en Figura 4.4. Respecto a los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta las combinaciones utilizadas para las modelaciones, el modelo que mejores resultados ofrece en términos gráficos corresponde al ensayo 36. Como se ha mencionado, los resultados obtenidos con este aplicativo corresponden a la propagación del deslizamiento bajo parespecíficos y el alcance o

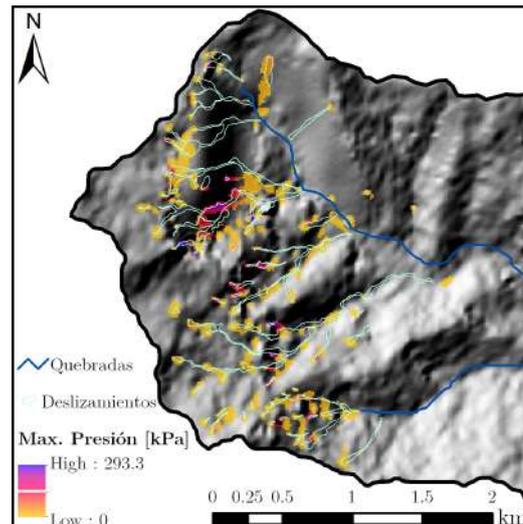


FIGURA 5.5: Presión máxima obtenida

runout del deslizamiento.

Con los algoritmos empleados para la ejecución de las modelaciones era posible controlar el grado de divergencia del flujo, por lo que la calibración se direccionó en encontrar la mejor combinación que guardara un balance entre divergencia y convergencia del flujo y al mismo tiempo reprodujera un evento similar al analizado con el caso de estudio.

Se utilizó un umbral de pendiente igual al 20 %, lo que significa que solo se permitió la ocurrencia de deslizamientos en zonas donde la pendiente máxima fuera 20 %, lo cual definitivamente no corresponde a las condiciones reales de pendiente de la cuenca, ya que según se puede observar en la Figura 4.3, se encuentran pendientes de 45° e incluso mayores, sobre todo en las zonas en donde se ubican los escarpes. Sin embargo, para pendientes mayores el modelo es incapaz de reproducir los deslizamientos ocurridos aún cuando se ejecutó un control con el grado de divergencia permitido para el algoritmo. Esto es importante dentro de las grandes conclusiones del ejercicio.

En la Figura 5.7 se muestran gráficamente los resultados obtenidos con esta modelación.

Como se observa, los resultados dan valores de 0 a 96078. Este indicativo señala la frecuencia de la cantidad de veces que una celda fue atravesada.

5.2 Análisis de Resultados

5.2.1 Análisis de resultados para la cuenca de la quebrada La Liboriana

Para analizar los resultados obtenidos con los modelos mencionados anteriormente, se determinó empezar por analizar las coincidencias gráficas entre lo que pasó en realidad y lo obtenidos con las simulaciones.

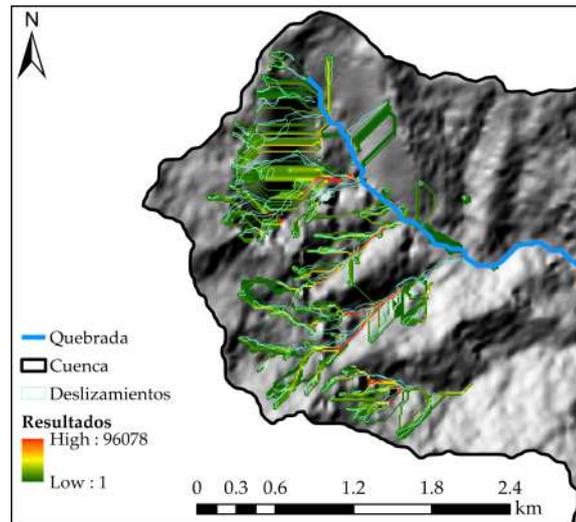


FIGURA 5.6: Configuración del modelo en el GGP en SAGA GIS

En el caso de RAMMS por ejemplo, se identifica que las zonas en donde la simulación muestra que ocurre deslizamiento y que se desplaza, coincide con las huellas de los deslizamientos reales principalmente en la parte superior o en las zonas en donde inicia el movimiento. En las zonas en donde se termina el movimiento o se presume ocurre la depositación, el modelo falla y no hay mayor coincidencia. En términos numéricos, se podría decir que los deslizamientos reales ocupan un área de 0.37 km^2 , o 37 Ha, mientras que los deslizamientos obtenidos con RAMMS ocupan un área de 0.85 km^2 , o 85 Ha, alrededor de 2.3 veces lo que ocupan en la realidad. Realizando este mismo ejercicio, en el caso de Flow R, se encontró que los resultados dan una serie de deslizamientos que ocupan un área equivalente a 0.65 km^2 , o 65 Ha y en el caso del *Gravitational Process Path* el área equivale a 1.11 km^2 , o 111 Ha; 1.75 veces para Flow R y 3 veces para GPP. En todos los casos, las áreas obtenidas son mayores a las reales. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos modelos tienden a sobredimensionar los resultados que ofrecen, particularmente Flow R y GPP ya que son aplicativos utilizados para la elaboración de mapas de susceptibilidad y riesgo y por lo tanto deben contener todas las posibilidades que puedan presentarse ante la ocurrencia de un evento, incluyendo el peor de los casos. En ese sentido, Flow R obtuvo el resultado mas parecido a lo ocurrido en el caso de estudio, tanto en el análisis gráfico como en la magnitud de las áreas que estima van a verse afectadas por los deslizamientos. Sin embargo, en términos de coincidencia entre el área que logró coincidir entre lo evaluado, RAMMS tiene un porcentaje de coincidencia en las áreas del 40 %, Flow R del 34 % y el módulo GPP del 55 %. Bajo este concepto, el módulo GPP es el que mayor coincidencia muestra con el escenario real, luego RAMMS y por último está el aplicativo Flow R.

Esto no quiere decir que los otros resultados deban descartarse ya que involucran variables diferentes a las utilizadas en Flow R y por lo tanto, dan cuenta de otro tipo de procesos distintos que también deben tenerse en cuenta. En general, de manera gráfica, todos los modelos logran reproducir en gran medida, unos mas que otros, lo que ocurrió en la cuenca de la quebrada La Liboriana, pero es RAMMS el que se queda mas corto puesto que los polígonos obtenidos se quedan muy concentrados sobre las zonas en donde inician los deslizamientos y no se mueven cuesta abajo

como se esperaría que ocurriera. Esto es un indicio que los valores utilizados para la viscosidad podrían ajustarse mejor, puesto que el flujo no está lo suficientemente fluido para permitirle tener trayectorias más amplias que acerquen el volumen deslizado al cauce principal de la quebrada. Además, otro punto importante dentro de este resultado específico es que durante el proceso de la modelación se utilizó un supuesto muy grande al utilizar el modelo del espesor del suelo. Sobre la zona no se cuenta con un perfil estratigráfico que permita comprobar o evidenciar los espesores reales del suelo, por lo que este es un factor de incertidumbre. Además, se asumió que los deslizamientos que se modelaron son superficiales y que el espesor máximo de suelo probable es de 2.5m. Esto entonces limita el volumen o cantidad de material que se puede deslizar, por lo que es probable que con los espesores encontrados en la cuenca no se genere un volumen suficiente para que pueda discurrir y llegar hasta el cauce de la quebrada.

Por otro lado, se analizaron los resultados contra los parámetros ingresados a cada aplicativo, especialmente la pendiente del terreno. Si se analizan por ejemplo las profundidades obtenidas con RAMMS y se analizan las pendientes en las mismas zonas en donde se ve la que se obtuvo los valores de profundidad más altos (ver Figura 5.3) se identifica que los escarpes por ejemplo están localizados en zonas de altas pendientes (entre 50 y 70° aprox.) pero los cuerpos de los deslizamientos en muchos casos están localizados en zonas con pendientes más bajas que el escarpe por lo que la depositación va ocurriendo más pronto de lo esperado. Pero también, si se analizan los espesores del estrato que se desliza (ver Figura 5.2), estos mismos escarpes están ubicados en zonas donde estas profundidades tienen una magnitud de 1.0 a máximo 1.5m, por lo que es probable que con esta profundidad y el área que se está considerando que se va a deslizar no generen un volumen lo suficientemente grande para poder desplazarse cuesta abajo y tener el alcance que se supone tuvo en la realidad cada evento analizado. Esta incertidumbre ya fue considerada y es una de las limitaciones que se tienen en cuanto al uso de RAMMS para la modelación de deslizamientos.

Sin embargo, estos cambios de pendiente en Flow R no afectaron como tal el *runout* de estos deslizamientos, porque tal como se evidenció en la Figura 5.1, en muchos casos incluso se extendió mucho más que el cuerpo de los verdaderos deslizamientos. En otros, se deslizó lo justo y siguió la dirección de las corrientes que se encontró a su paso. Lo llamativo de estos resultados, es que por ejemplo en las zonas en donde los deslizamientos iniciaron en puntos con pendientes relativamente bajas, las trayectorias y el alcance seguido por los deslizamientos es muy similar a las trayectorias reales, mientras que en los deslizamientos que iniciaron en las zonas de alta pendiente, es decir, en la parte más superior de la cuenca, en Cerro Plateado, se identifica un comportamiento similar en varias trayectorias señaladas. Es decir, se logra identificar que hay una zona en donde se ven unas rayas "todas paralelas que coincidentalmente están ubicadas sobre una franja del terreno que tiene toda la misma pendiente. Esto podría ser algún error del modelo de elevación digital utilizado, ya que analizando el resto de las pendientes de la cuenca, encontrar una zona tan extensa con una pendiente tan homogénea es atípico, lo que está afectando los resultados para Flow R en este punto. Éste análisis se traslada también a los resultados obtenidos con el módulo GPP de SAGA GIS en donde las mismas franjas paralelas son identificadas en la zona alta de la cuenca.

Sin embargo, a partir del análisis anterior no es posible medir el desempeño de

cada uno de los aplicativos , ya que solo se aborda una evaluación cualitativa de los resultados obtenidos. Por lo tanto, se buscaron metodologías que permitieran hacer la evaluación de los resultados a partir de análisis numéricos que además pudieran ser tratados estadísticamente. Para esto, se pensó que entonces los ráster que contienen los resultados de las modelaciones deberían unificarse en un valores que permitan establecer si ocurrió o no ocurrió un deslizamiento. Es decir, todos los ráster fueron convertidos de manera que en las celdas en donde se registraron deslizamientos, se asignó un valor de uno (1) y en donde no ocurrió se asignó un valor de cero (0).

Como lo que se pretende es hacer un análisis binario de los resultados, se utilizó en primera instancia la raíz del error cuadrático medio (RMSE) en donde se evaluaron las celdas de los archivos ráster que contenían los resultados y se cuantificó el error de predicción en términos de las unidades de la variable calculada por el modelo.

El indicador del RMSE está dado por la ecuación que se muestra a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (5.1)$$

En donde O_i y P_i representan la muestra que tiene tamaño N y que corresponden a las observaciones y estimaciones del modelo. El resultado esperado varía entre 0 (cero) y 1 (uno), donde valores cercanos a cero demuestran un ajuste del modelo perfecto de acuerdo a los datos experimentales obtenidos (Ritter y Muñoz Carpena, 2013).

Además, se calculó un tercer indicador de bondad que está dado por la ecuación que se muestra a continuación y que es un coeficiente de eficiencia que es el complemento a la unidad de la relación entre el error cuadrático medio de los valores observados frente a los valores modelados y la varianza de las observaciones (Ritter y Muñoz Carpena, 2013).

$$NSE = 1 - \left(\frac{RMSE}{SD}\right)^2 \quad (5.2)$$

Dónde SD corresponde a la desviación estándar de los resultados obtenidos con cada uno de los aplicativos. A partir de esto, es posible verificar la bondad del ajuste del modelo obtenido respecto a las modelaciones ejecutadas a partir de la relación entre $SD/RMSE$ y los valores obtenidos para NSE (ver Tabla 5.1).

Clasificación de rendimiento	Interpretación de la eficiencia del modelo	NSE
Muy bueno	$[SD/RMSE] > 3.2$	> 0.9
Bueno	$2.2 < [SD/RMSE] < 3.2$	$0.8 - 0.9$
Aceptable	$1.2 < [SD/RMSE] < 2.2$	$0.65 - 0.8$
Bajo	$[SD/RMSE] < 1.7$	< 0.65

TABLA 5.1: Criterio para la evaluación del desempeño del modelo (Ritter y Muñoz Carpena, 2013)

De acuerdo a lo explicado anteriormente, los resultados obtenidos para los modelos analizados se muestran a continuación.

Aplicativo	RMSE	NSE	SD/RMSE	Rendimiento
Flow R	0.3288	-0.0293	0.9856	Bajo
GPP/SAGA	0.3287	-0.0989	0.9539	Bajo
RAMMS	0.3136	-0.2478	0.8952	Bajo

TABLA 5.2: Resultados del desempeño de los aplicativos con el RMSE

Como se observa, los resultados obtenidos para la evaluación de bondad y desempeño del modelo dan bajos, aún cuando la raíz del error cuadrático medio es un valor mas cercano a cero que a la unidad. Esto sucede porque esta evaluación castiga en demasía los resultados en términos de coincidencias. Solo hay dos posibles situaciones que pueden presentarse a partir de este tipo de análisis: el modelo predijo correctamente el fenómeno en la celda o no lo predijo. Es decir, únicamente tiene en cuenta si el modelo es preciso respecto a lo que sucedió o no, y no se analiza si los resultados de una u otra manera reproducen un fenómeno similar a lo verdaderamente ocurrido. No hay una manera de integrar los análisis cualitativos a este resultado y solo se está enfocando en que los resultados coincidan completamente con la información utilizada para contrastar. Esto señala un problema grande y de inmediato descarta la aplicabilidad de estos modelos, pero porque no se están teniendo en cuenta factores como la fuente de información utilizada, la precisión en la digitalización de los deslizamientos del caso de estudio, los parámetros referentes al suelo como la viscosidad, entre otros con los que se desarrollaron los modelos.

Dada esta situación, se consideró que un análisis adicional debía llevarse a cabo, puesto que con las anteriores métricas no era posible analizar si se dieron predicciones falsas en algunas zonas cercanas a las celdas en donde si ocurrieron los procesos. La curva ROC (*Receiving Operating Characteristic curve*) es una herramienta estadística que se basa en una variable de decisión, con el objetivo de clasificar a los individuos de una población en dos grupos: uno que presente un evento de interés y otro que no (Rocío Del Valle Benavides, Manuel y Pichardo, s.f.).

Las celdas del resultado asociado al alcance de la depositación del material deslizado usando RAMMS, Flow R y el módulo GPP, fueron clasificadas en cuatro categorías de interpretación posibles que guardan correspondencia con la matriz de confusión o tabla de contingencia en el análisis ROC.

Dichas categorías se denominan verdadero positivo (TP), que para este caso corresponde a las celdas que se determinaron como posibles celdas donde se genera un deslizamiento y que en efecto el modelo identificó como tal; verdadero negativo (TN) que son aquellas celdas donde no se generan deslizamientos y el modelo identifica efectivamente como tal; falso positivo (FP) que son aquellas celdas propensas a generar deslizamientos pero que el modelo no las identificó como tal y falso negativo (FN) que representa las celdas en las que se generaron predicciones erróneas porque no generan deslizamientos pero el modelo las identifica como celdas probables a que se generen deslizamientos. A continuación se presentan las matrices de confusión para cada uno de los modelos.

A partir de estos resultados, se calculó la rata de aciertos (TPR) con la cual se cuantificó la cantidad de celdas clasificadas positivamente, es decir, se tienen en cuenta tanto las verdaderas positivas como las falsas positivas. Entonces la rata de positivos nos da el porcentaje de verdaderos positivos, sobre el total de positivos

VALORES PREDICCIÓN	Verdaderos positivos	Falsos positivos
	Falsos negativos	Verdaderos negativos
	VALORES REALES	

FIGURA 5.7: Matriz de confusión

VALORES PREDICCIÓN	807	1447
	3389	66885
	VALORES REALES	

FIGURA 5.8: Matriz de confusión Flow R para la quebrada La Liboriana

VALORES PREDICCIÓN	751	1553
	4765	65509
	VALORES REALES	

FIGURA 5.9: Matriz de confusión RAMMS para la quebrada La Liboriana

obtenidos en el análisis. Para el caso de la tasa de falsos positivos, lo que se obtiene es la proporción de casos negativos que fueron identificados incorrectamente como casos positivos.

Para Flow R, se obtuvo una TPR correspondiente al 35 % y una FPR del 5 %. Este primer valor concluye el porcentaje de coincidencias de las manchas de propagación

VALORES PREDICIÓN	1274	1018
	1274	65013
		VALORES REALES

FIGURA 5.10: Matriz de confusión módulo GPP para la quebrada La Liboriana

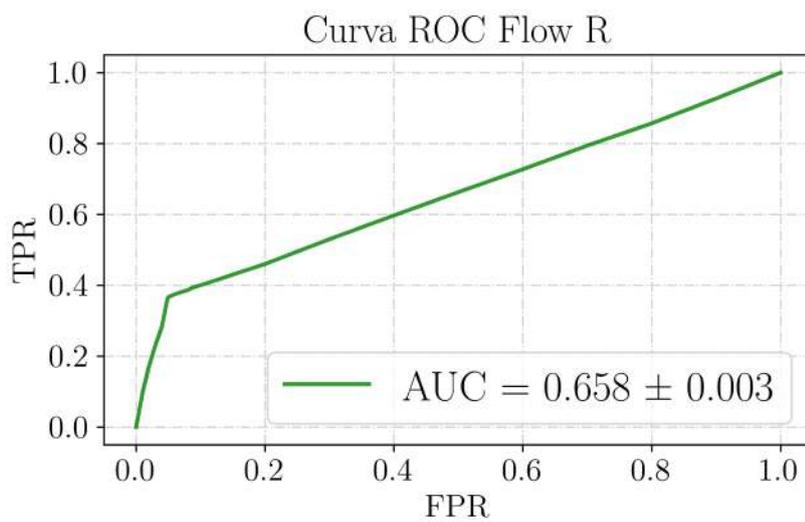


FIGURA 5.11: Curva ROC para Flow R, quebrada La Liboriana

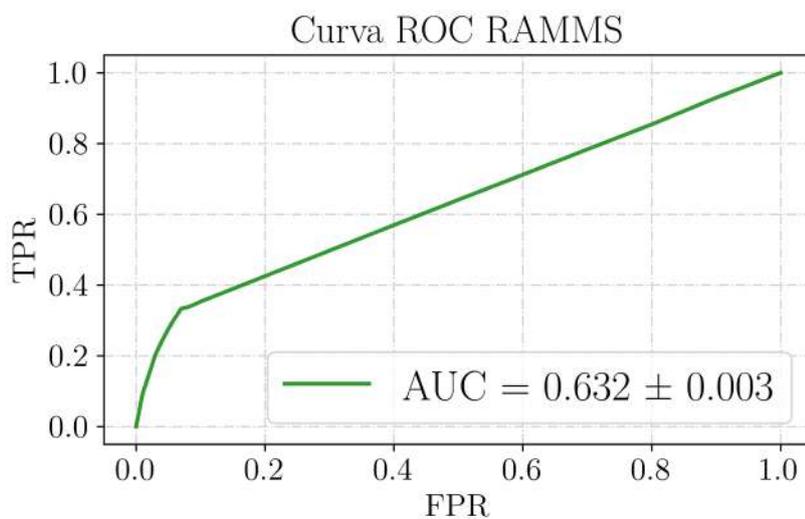


FIGURA 5.12: Curva ROC para RAMMS, quebrada La Liboriana

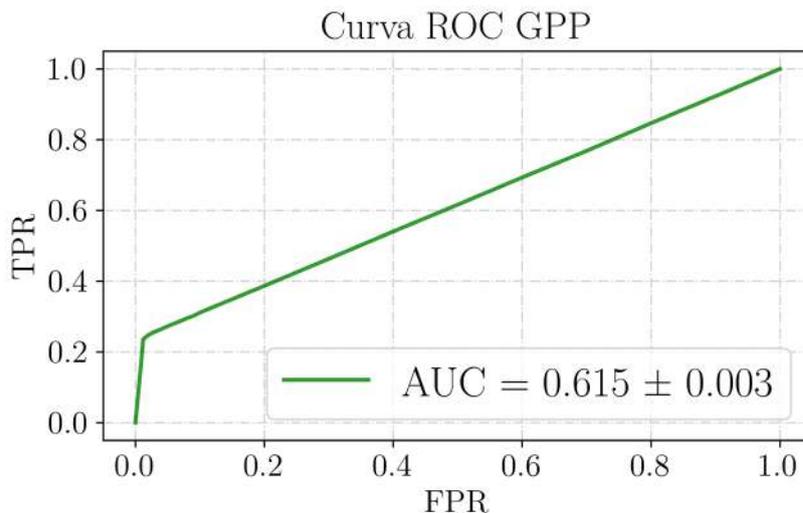


FIGURA 5.13: Curva ROC para el módulo GPP de SAGA GIS, quebrada La Liboriana

obtenidas con la modelación en comparación con las huellas que se cuentan dentro del inventario de deslizamientos utilizados como información base. En el caso de RAMMS, este valor del TPR se encuentra alrededor del 33 %, un valor ligeramente inferior para las coincidencias entre las manchas, pero no muy alejado del valor obtenido para el caso del Flow R, lo que indica que los resultados obtenidos con ambos modelos son muy similares y logran reflejar el caso de estudio seleccionado de forma parecida. El FPR de RAMMS está en el 7 %, dos unidades porcentuales por encima de lo obtenido con Flow R, pero que se encuentra en el mismo orden de magnitud, por lo que ambos aplicativos tienen tasas muy similares en la falsa predicción de celdas donde ocurren deslizamientos. Para el caso del *Gravitational Process Path* se obtuvo una TPR de 56 % y una FPR del 8 %, siendo el que mayor coincidencias obtuvo en comparación con el caso real y en relación a los otros dos aplicativos. En el caso de las falsas predicciones se encuentra con resultados similares a Flow R y RAMMS.

Es importante mencionar que la única información que se dispone para hacer esta validación es el alcance, toda vez que es posible compararla con los resultados del inventario de deslizamientos encontrado en la literatura. De los demás parámetros no se tienen registros de campo que permitan una validación mas completa y detallada.

Además, a partir de este análisis, se construyeron tres mapas de confusión, uno para cada aplicativo, para poder observar de manera gráfica los sitios en donde se desarrollaron las coincidencias y en donde se generaron las predicciones fallidas.

A partir del análisis de estos mapas de confusión, se puede observar que para el caso de RAMMS, a parte de la clara coincidencia entre las celdas en donde no ocurrió un deslizamiento y la predicción fue correcta (TN), se puede observar que el modelo determinó una gran cantidad de falsos positivos (FP), pues el modelo predijo que en todas estas zonas verdes ocurriría o se esparciría un deslizamiento y en comparación con los ocurrido realmente, no fue así. Por otro lado, aunque la proporción de

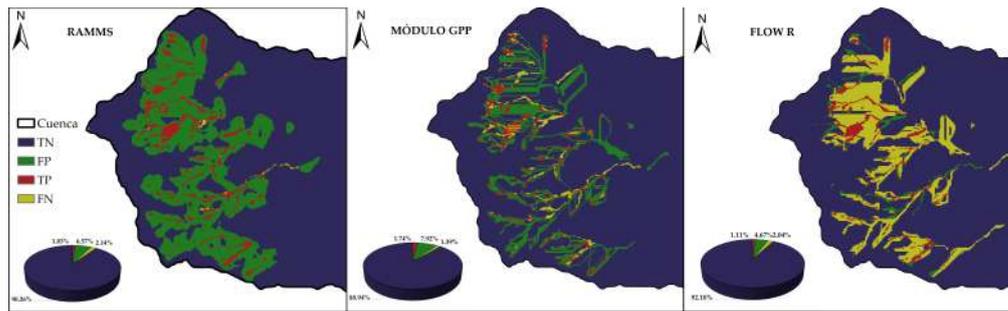


FIGURA 5.14: Mapas de confusión para la quebrada La Liboriana

verdaderos positivos es baja en comparación a las demás categorías, si se observa el patrón que siguen las manchas conformadas por este clase, se observa que si se logra reproducir en gran medida los deslizamientos ocurridos que fueron analizados, es decir, que aún cuando los resultados que se obtuvieron sean una sobreestimación de lo que ocurrió en la realidad, con estos se logra cubrir en gran medida el fenómeno real y es posible identificarlo.

Par el módulo GPP de SAGA GIS se observa que la clase mayoritaria son los verdaderos negativos (TN) (ver Figura 5.17). Sin embargo, al analizar los verdaderos positivos (TP) se logra ver que aunque su porcentaje de coincidencia es mayor en comparación al obtenido por ejemplo con RAMMS (1.74 % y 1.03 % en el primer y segundo caso respectivamente) no se logra identificar un patrón claro de esta clase como por ejemplo sí se observa en RAMMS. Por otro lado, también se observa el mismo fenómeno observado con RAMMS, hay una gran cantidad de celdas que fueron predichas como que ocurrían y hacían parte de la trayectoria de un deslizamiento pero en zonas en donde no ocurrió nada en el caso real. Pero ya que este aplicativo funciona a partir del análisis de la dirección del flujo, es muy probable que en estas zonas él esté mostrando todas las posibles direcciones que toma el flujo con las condiciones de pendiente, aspecto y ángulo de fricción que fueron ingresadas para cada una de las celdas. Esto, es totalmente aplicable al caso de Flow R, en donde (Horton et al., 2013) especifica que este aplicativo tiene a sobredimensionar los resultados puesto que uno de los objetivos de sus resultados es presentar todas las probabilidades de dirección de flujo de un deslizamiento bajo las condiciones mencionadas anteriormente. En ese sentido, se puede observar que aunque hay una gran cantidad de celdas que pertenecen a la clase de falsos positivos (FP), cuando se analizan las celdas de verdaderos positivos, es posible identificar un patrón mas claro de los deslizamientos reales (similares a lo obtenido con RAMMS). Es decir que aunque los deslizamientos simulados por Flow R son mas anchos y extensos que los que realmente ocurrieron, el modelo fue capaz de reproducir de manera aceptable la gran mayoría de deslizamientos pertenecientes al caso real de estudio.

Ahora, a simple vista podría decirse que los porcentajes de coincidencia obtenidos por ejemplo para cada uno de los casos evaluados es demasiado bajo en comparación a las demás clases. Sin embargo, al analizar el ráster del caso real, en proporción, en el 97 % de las celdas no ocurren deslizamientos, y solo un 3 % de el área que representan estas celdas hacen parte de las áreas de los deslizamientos de los casos reales. Dicho esto, los verdaderos positivos obtenidos en cada caso están dentro del mismo orden de magnitud de la proporción real de celdas en donde sí ocurrió el

proceso y consecuentemente pasa lo mismo para las celdas en donde no ocurrió.

Es interesante observar que en el caso de Flow R y RAMMS, la tasa de verdaderos positivos (TPR) que corresponde a las celdas en donde ocurrieron deslizamientos en el caso real y el modelo las predijo como tal, los valores sean relativamente similares a los obtenidos en el RMSE, mientras que para el GPP no se mantiene esa proporción. Sin embargo, al analizar la expresión con la que se calcula dicha tasa (que se muestra a continuación), se identifica que este porcentaje depende de los falsos negativos y que en el caso de SAGA, este valor es similar a los verdaderos positivos, mientras que en los otros dos aplicativos la cantidad de falsos negativos es considerablemente mayor a los verdaderos positivos, es decir que el GPP generó menos falsos negativos o dicho de otra manera, es el que mas coincidencias tuvo entre los tres aplicativos evaluados.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.3)$$

Adicionalmente, a cada una de estas curvas ROC, se les calculó el área bajo la curva (AUC) ya que este valor puede utilizarse como métrica para la cuantificación del rendimiento de un modelo, independientemente del área en la que se desempeñe. Un área mayor bajo la curva se asocia a un mejor rendimiento del modelo. Para Flow R se obtuvo un valor AUC de 0.658, para RAMMS un AUC de 0.632 y para el GPP un AUC de 0.615. Quiere decir, que en el conjunto, analizando no solo los verdaderos positivos, Flow R es el aplicativo que mejor rendimiento presenta entre los tres aplicativos evaluados de acuerdo a esta metodología. De acuerdo a los valores obtenidos con estas áreas los resultados pueden clasificarse como conservadores o aceptables (en otros estudios se obtuvieron valores similares, pero estos serán objeto de la discusión mas adelante).

Otras métricas pueden analizarse a partir de la matriz de confusión para medir la precisión y exactitud de los modelos. Por ejemplo, la exactitud (*accuracy*) de Flow R está en el 93 % y la de RAMMS y GPP en el 91 %. Esta se mide a partir de la suma de verdaderos positivos y los verdaderos negativos sobre el total de celdas evaluadas.

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5.4)$$

En ese orden de ideas, es lógico que los modelos sean exactos, puesto que se identificó que los verdaderos negativos son la clase mayoritaria al tener el mayor porcentaje de coincidencias, representando un 92.2 % de coincidencias para Flow R, un 90.3 % para RAMMS y un 89 % para GPP. Esto también es consecuente pues en los archivos ráster analizados, el mayor porcentaje de área está cubierto por celdas en donde no ocurrieron deslizamientos, por lo que es evidente que en esta clase se obtendrían mayor coincidencias respecto a las demás. La Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17 resumen lo anteriormente dicho.

En el caso de la precisión, los resultados no son tan buenos, pues esta depende exclusivamente de los verdaderos positivos en relación a la suma de estos con los falsos positivos. Para esto, se obtuvieron valores del 19 % para Flow R, 14 % para RAMMS y del 18 % para GPP. También es lógico este resultado, considerando que se ha dicho en múltiples ocasiones que los verdaderos positivos en todos los resultados fueron la clase minoritaria. En otras palabras, solo en estos porcentajes, el modelo dio predicciones correctas respecto a las comparaciones realizadas.

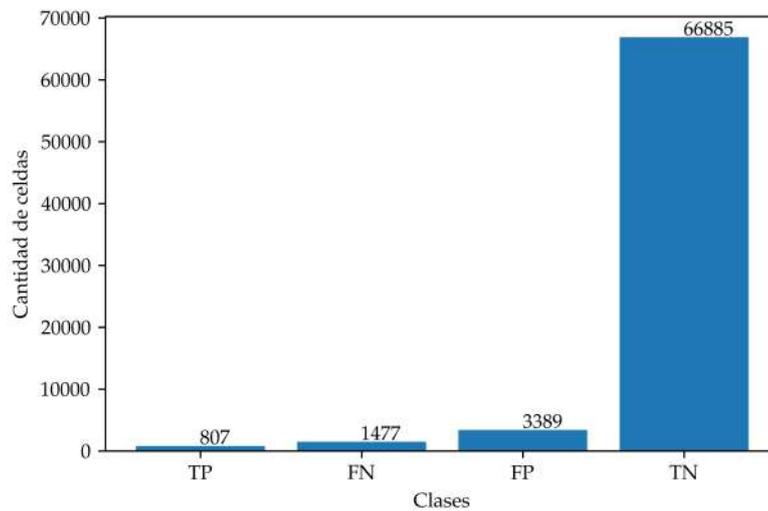


FIGURA 5.15: Gráfico de barras para los resultados obtenidos con Flow R

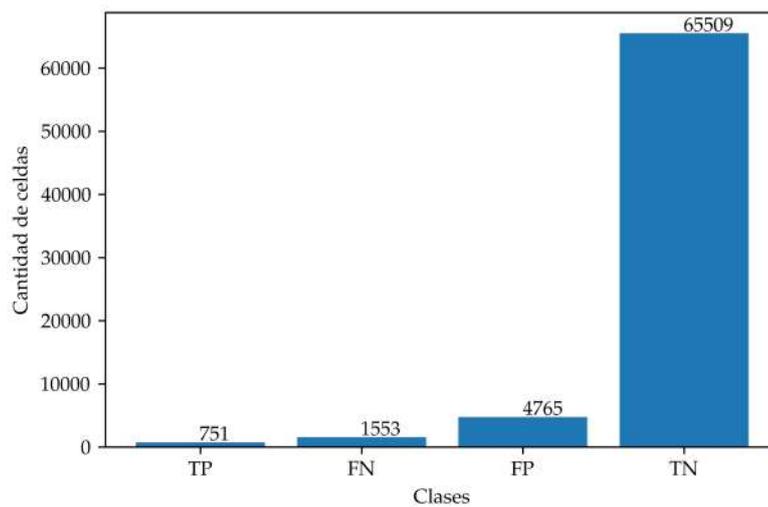


FIGURA 5.16: Gráfico de barras para los resultados obtenidos con RAMMS

Hay otras variables que pueden reforzar lo anteriormente dicho, como por ejemplo la tasa de clasificación errónea, que en realidad es muy baja para cada modelo (7% para Flow R, 9% para RAMMS y GPP), que expresa el porcentaje de que tan seguido es incorrecta la predicción hecha por cada modelo. Es decir, que en realidad las predicciones hechas por los modelos son correctas, pero por las razones antes expuestas, las predicciones coincidieron mucho en las zonas donde no ocurrieron deslizamientos pero porque estos ocupaban la mayor cantidad de área respecto a las zonas en donde si ocurrieron.

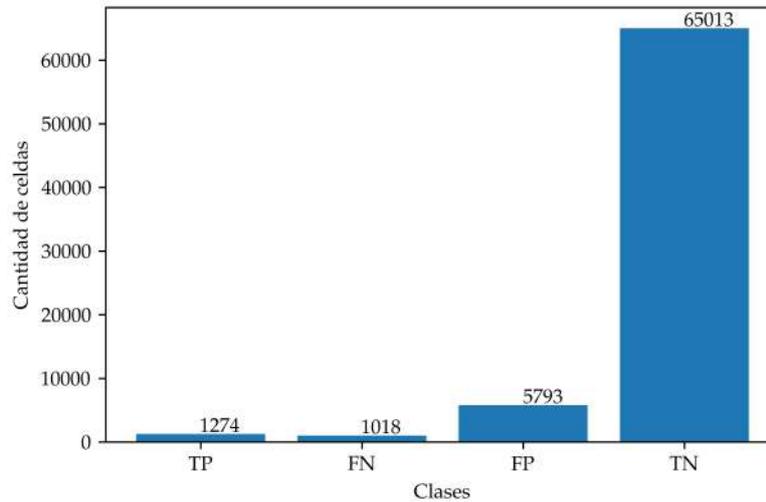


FIGURA 5.17: Gráfico de barras para los resultados obtenidos con SA-GA GIS

5.2.2 Análisis de resultados para la cuenca de la quebrada La Argelia

Para ejecutar el modelo de RAMMS (ver Tabla 4.3), fue necesario primero determinar los espesores del estrato probable que se desliza. Se utilizó exactamente la misma metodología aplicada y los resultados se muestran en la Figura 5.18, en donde se puede observar que se obtienen valores de espesores entre 0.1m y 2.4m, coincidiendo ambos con las zonas más planas y más escarpadas de la cuenca respectivamente.

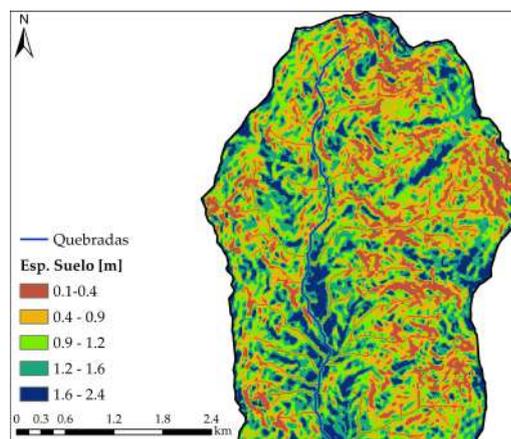


FIGURA 5.18: Espesores del estrato que se desliza para la cuenca de la quebrada La Argelia

Los resultados obtenidos corresponden a la altura máxima de deposición, la velocidad y la presión máxima. Estos se muestran en la Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21.

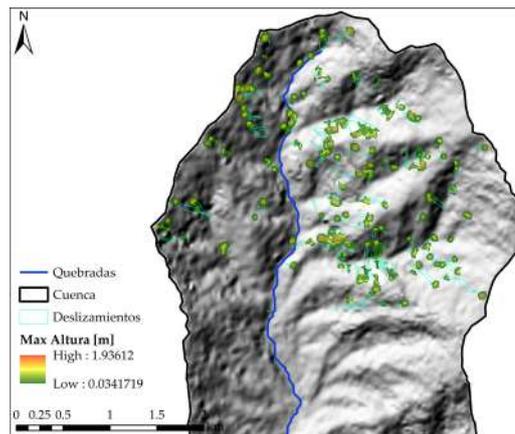


FIGURA 5.19: Altura máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia

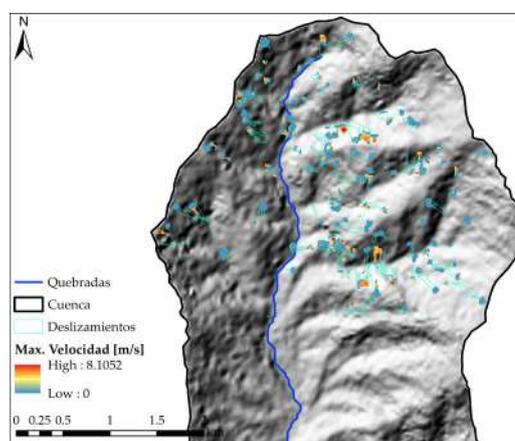


FIGURA 5.20: Velocidad máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia

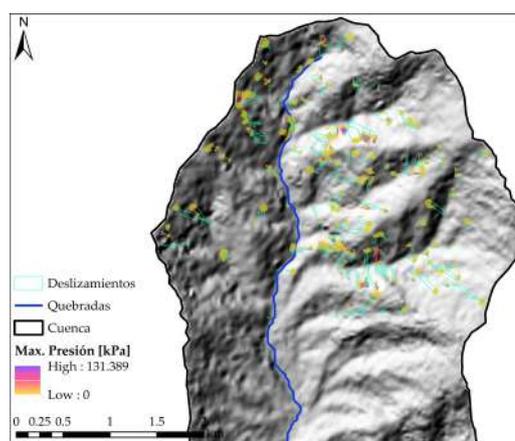


FIGURA 5.21: Presión máxima obtenida para la cuenca de la quebrada La Argelia

Como se puede observar en la Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21, si bien se desplazan volúmenes de material desde las zonas señaladas donde se inician deslizamientos, se puede notar que estos en ningún caso logran tener una trayectoria lo suficientemente larga para lograr reproducir el deslizamiento como tal, salvo en los casos en donde los polígonos son muy pequeños y en estos en realidad queda la duda de si el resultado obtenido en estos puntos específicos si es correcto o solo se debe al tamaño de la huella.

Esto en comparación por ejemplo a los resultados obtenidos para la calibración del modelo con la cuenca de la quebrada La Liboriana (ver Figura 5.3), deja ver que es posible que el modelo deba calibrarse para cada caso en específico, ya que allí se puede observar que las trayectorias seguidas por los flujos son mucho mas similares a las huellas de los deslizamientos que efectivamente ocurrieron, por lo que los parámetros usados allá reproducen mejor esas condiciones que las presentes en la cuenca de la quebrada La Argelia.

Respecto a las magnitudes de los resultados obtenidos no tiene sentido hacer ninguna comparación con los obtenidos durante la calibración puesto que son dos cuencas diferentes en las que claramente las topografías no son iguales y la proporción de las altas pendientes no es la misma en ambas cuencas. Además, al esta cuenca no estar instrumentada y no contar con información de eventos pasados, no existen registros que permitan hacer comparaciones respecto a los valores obtenidos para la profundidad, la velocidad y la presión.

Lo anteriormente descrito ocurre para todos los parámetros evaluados (altura de depositación, velocidad y presión). Es entonces necesario modificar la viscosidad ya que por los resultados se puede asumir que la masa no es lo suficientemente fluida como para desplazarse cuesta abajo en la gran mayoría de los casos, sobre todo en la parte superior de la cuenca, en donde tal como se observa en la Figura 5.22 se desarrollan gran parte de las pendientes mas altas de toda la zona de estudio, con valores entre los 50° y los 70° .

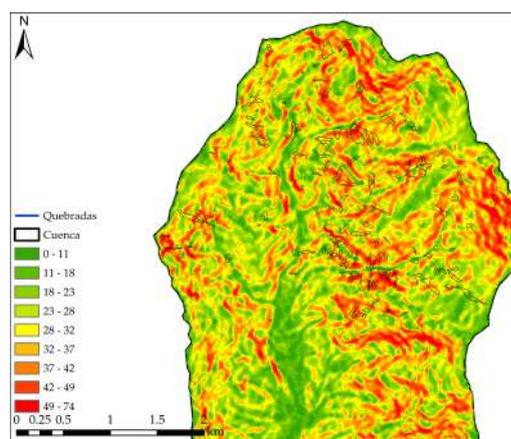


FIGURA 5.22: Pendientes de la cuenca de la quebrada La Argelia

Por otro lado, también se realizó la misma modelación con el módulo *Gravitational Process Path* en SAGA GIS para analizar el comportamiento del modelo en las

condiciones de esta cuenca. En la Figura 5.23 se observan dichos resultados.

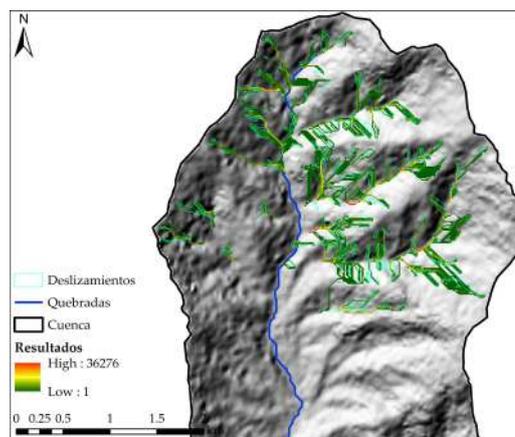


FIGURA 5.23: Resultados del módulo GPP en la cuenca de la quebrada La Argelia

En este caso dichos resultados están mostrando las trayectorias de los deslizamientos que se extienden hasta las corrientes hídricas presentes en la cuenca. No hay relación alguna con parámetros reológicos de la mezcla, por lo que no hay relación con la viscosidad ni nada similar como en el caso de RAMMS. El aplicativo solo señaló la dirección de flujo de la mezcla desde las celdas de iniciación del movimiento. Sin embargo, la forma en la que se esparce el flujo de acuerdo a este resultado es mucho más divergente que en la realidad. Se pueden notar algunos deslizamientos en los que los resultados son muy similares a las huellas del inventario. En la parte inferior de la zona de estudio por ejemplo puede observarse esto. Sin embargo, no es algo que sea generalizado, ya que en los deslizamientos superiores y en la zona central, el flujo diverge mucho obteniendo trayectorias mucho más amplias que las reales seguidas por los deslizamientos estudiados.

Si bien el modelo utilizado reproduce en cierta medida lo ocurrido, se nota que es necesario seguir calibrándolo, ajustando los parámetros que controlan la divergencia del flujo del algoritmo seleccionado en este módulo, de manera que se force el flujo a seguir un camino más demarcado y unidireccional, de acuerdo al patrón mostrado por los deslizamientos reales.

Por último, se llevó a cabo el mismo ejercicio con el aplicativo Flow R, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.24.

En este caso se observa una situación similar a lo ocurrido con el módulo GPP de SAGA GIS. Se presentan flujos divergentes, inclusive en mayor proporción a este último pero con la diferencia que aquí se observa bien dentro de los polígonos de los deslizamientos reales, en la gran mayoría de casos, la probabilidad de propagación en estos es la más alta, es decir que el aplicativo predice que en esas zonas es cien por ciento probable de que ocurra un deslizamiento, lo cual es, independientemente del nivel de coincidencia de los polígonos obtenidos, una garantía de que en esas zonas sí ocurrió el evento.

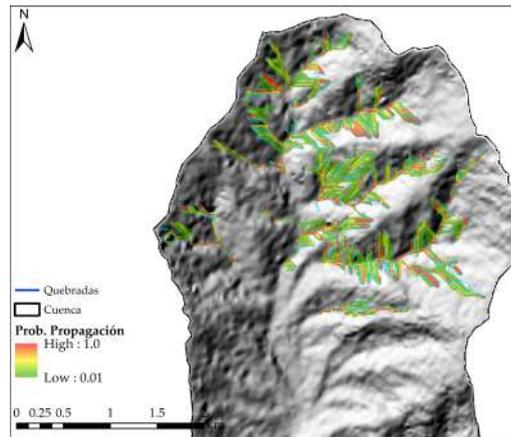


FIGURA 5.24: Resultados de Flow R en la cuenca de la quebrada La Argelia

Por lo que se ha podido observar en los resultados mostrados anteriormente, si bien la calibración de los modelos con la cuenca de la quebrada La Liboriana sentaron las bases para la utilización de los aplicativos en otras cuencas con características similares, los resultados obtenidos no cuentan con la misma calidad, en términos gráficos, puesto que es muy evidente la diferencia entre los resultados de la primera cuenca y de la segunda. Si bien se nota que los resultados no son ajenos a lo ocurrido, en realidad no alcanzan a reproducir las condiciones de la cuenca de la quebrada La Argelia. Se debe principalmente a que pueden existir diferencias significativas entre los parámetros reológicos de la primera cuenca y la segunda. No se comportan totalmente igual mientras se están deslizando ni cuando la energía del movimiento se está agotando. Además, la topografía, las pendientes y la configuración de estas mismas afectan directamente en estos procesos y por consiguiente en los resultados, por lo que definir umbrales de análisis en los algoritmos de dirección debe hacerse entonces de manera particular para cada condición específica que se vaya a evaluar.

Aún así, para ser concluyentes respecto a el proceso llevado a cabo con la cuenca de la quebrada La Argelia, se analizaron los resultados de la misma manera que los obtenidos con el caso de estudio. Se realizó el análisis ROC para determinar el desempeño del modelo con esta cuenca. Se construyeron las matrices de confusión para cada uno de los modelos ejecutados, las cuales se muestran a continuación.

Entonces, de acuerdo a la información presentada anteriormente las TPR obtenidas para los modelos Flow R obtuvo una del 13 %, RAMMS del 15 % y el módulo GPP de SAGA GIS del 7 %. En el caso de las FPR, para Flow R se obtuvo un valor de 83 %, RAMMS del 82 % y para el módulo GPP del 59 %. Es decir, con solo estos resultados se afirma lo anteriormente dicho, los modelos con la calibración realizada para la cuenca de la quebrada La Liboriana no tuvieron mucha coincidencia con lo que se tiene como inventario de deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Argelia. Es más, en comparación a los resultados de las tasas obtenidas para la cuenca del caso de estudio, los valores obtenidos en este caso son la mitad de esos valores, es decir, son mucho más bajos. En cambio, en el caso de la FPR, los valores obtenidos con esta cuenca son muchísimo mayores en comparación a los obtenidos con el caso de estudio, lo que significa que para este caso los modelos generaron mayores imprecisiones o falsas predicciones que cuando se evaluaron con el caso de estudio.

VALORES PREDICCIÓN	2284	453
	9721	67670
	VALORES REALES	

FIGURA 5.25: Matriz de confusión Flow R para la quebrada La Argelia

VALORES PREDICCIÓN	2235	500
	11756	65381
	VALORES REALES	

FIGURA 5.26: Matriz de confusión RAMMS para la quebrada La Argelia

VALORES PREDICCIÓN	1612	1125
	5814	71890
	VALORES REALES	

FIGURA 5.27: Matriz de confusión módulo GPP para la quebrada La Argelia

En el caso de la precisión o *accuracy* de los modelos en esta cuenca, se obtuvieron valores del 87 %, 85 % y 91 % para Flow R, RAMMS y el módulo GPP respectivamente. Como antes se explicó esto es lógico y consecuente, considerando que la precisión se calcula sumando los valores positivos sobre el total de celdas analizadas y al ser los verdaderos negativos la clase mayoritaria, en donde el modelo predijo exitosamente que no ocurrirían deslizamientos, la precisión corresponde a estas coincidencias.

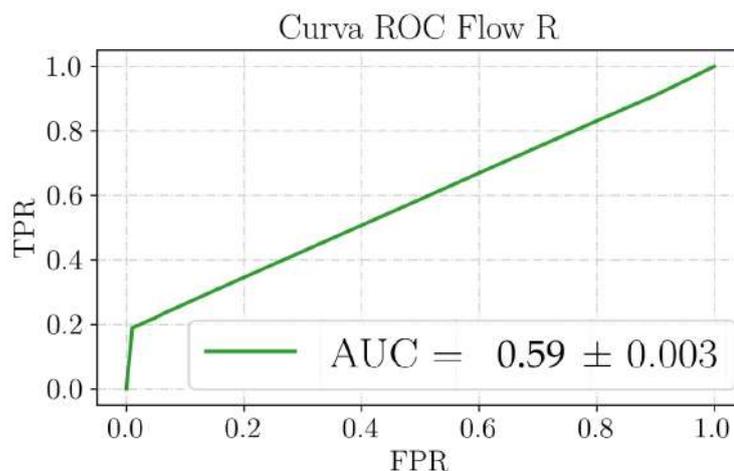


FIGURA 5.28: Curva ROC para Flow R, quebrada La Argelia

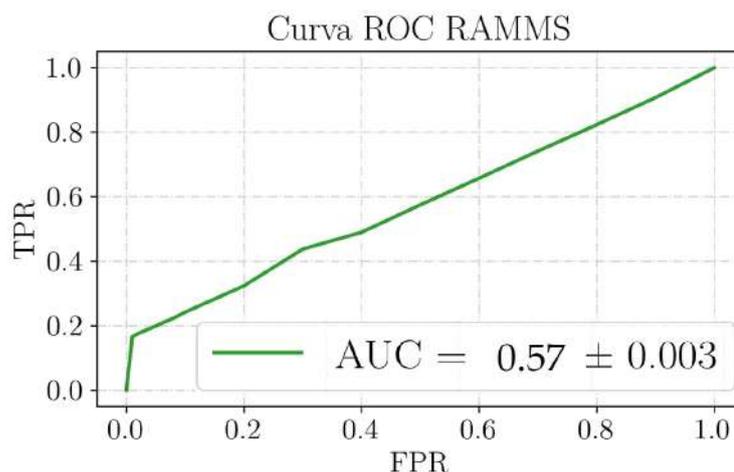


FIGURA 5.29: Curva ROC para RAMMS, quebrada La Argelia

Además, también se calcularon las áreas bajo la curva para cada uno de los modelos. En el caso del GPP de SAGA GIS se obtuvo un AUC de 0.6, para RAMMS se obtuvo un AUC de 0.57 y para Flow R un valor de 0.59. De acuerdo a lo analizado anteriormente, estos valores están relativamente cercanos a los obtenidos en el caso de estudio. Sin embargo RAMMS y Flow R tienen valores que están por debajo de 0.6. Esto da un indicio que los modelos requieren ser mejor calibrados o calibrados particularmente para la cuenca ya que estos valores si bien están cercanos a 0.6, hacen parte de la aleatoriedad y por lo tanto no se puede concluir a partir de ellos.

Además, a partir de este análisis, se construyeron tres mapas de confusión, uno para cada aplicativo, para poder observar de manera gráfica los sitios en donde se desarrollaron las coincidencias y en donde se generaron las predicciones fallidas.

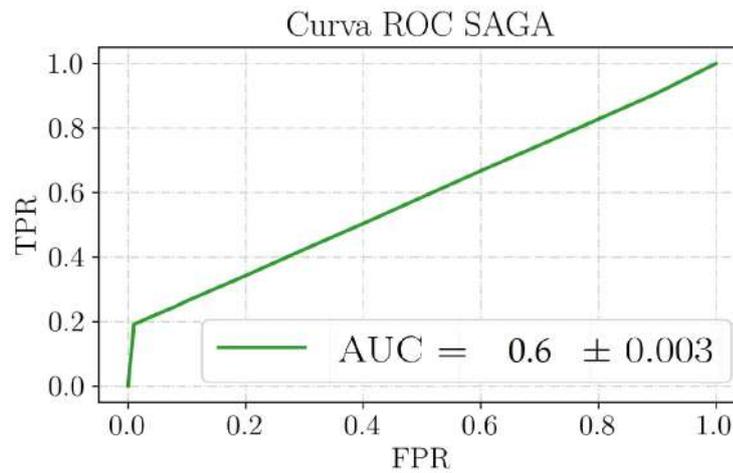


FIGURA 5.30: Curva ROC para el módulo GPP de SAGA GIS, quebrada La Argelia

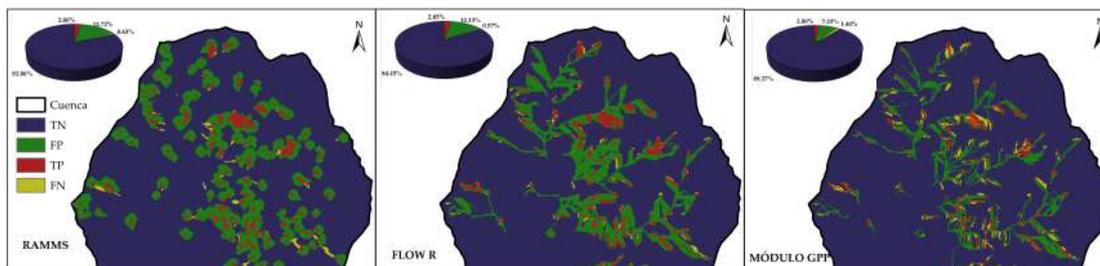


FIGURA 5.31: Mapas de confusión para la quebrada La Argelia

Entonces, analizando los resultados que se pueden observar en estos mapas de confusión, se repite el hecho de que los verdaderos negativos (TN) son la clase mayoritaria en todos los casos. Además, la clase que le sigue en cantidad de celdas tal como se observan en los diagramas circulares son los falsos positivos (FP), especialmente el módulo GPP de SAGA GIS, esto se traduce a que esta herramienta predijo entonces muchas zonas con deslizamientos en donde en realidad no ocurrieron. En el caso de RAMMS se observa que esta proporción en realidad es muy pequeña, por lo que entonces las predicciones hechas se ajustan a los polígonos del inventario de escarpes en gran medida, así con este modelo no se haya logrado modelar la condición real exactamente. Esta misma situación se presentó en Flow R, en donde los falsos negativos también son la clase minoritaria. En el caso de los verdaderos positivos (TP) se obtuvo una relación de celdas con predicciones ciertas mayor a las obtenidas con los modelos en el caso de estudio, en parte porque los cuerpos de los deslizamientos del caso de validación son mas pequeños que los del caso de estudio, entonces al modelar áreas probables grandes, es mucho mas probable también que estos pequeños polígonos estén incluidos en estas áreas.

5.3 Discusión

La información utilizada para el desarrollo de esta investigación fue completamente obtenida de fuentes secundarias, lo que la hacía atractiva por su aplicabilidad en zonas donde probablemente la información sea escasa pero que precisamente es la razón por la que los resultados no fueron mas precisos o exactos en comparación a lo que ocurrió en realidad.

Por ejemplo, para todos los aplicativos se debió utilizar un modelo de elevación digital que tal como fue señalado, se obtuvo a partir de la misión satelital ALOS PALSAR, que además tiene una resolución de 12.5m x 12.5m. En otros estudios realizados en donde se utilizaron estos mismos aplicativos para modelar eventos previos ocurridos (Franco-Ramos et al., 2020; Díaz-Salas, Guevara-Pérez y Vidal-Moren, 2021; Cesca y D'Agostino, 2008) la información referente al terreno fue levantada con metodologías mas precisas como LiDAR, por lo que se contaba con información primaria del estado real y actual del terreno en donde ocurrieron los eventos. Aquí se identificó el primer factor que indujo los modelos a perder precisión respecto a sus predicciones, ya que a partir del modelo de elevación digital o del terreno se derivaban otros parámetros utilizados tales como la pendiente del terreno, el aspecto, la curvatura y hasta la acumulación del flujo que se utilizó para Flow R. Lo anteriormente dicho se puede comprobar al analizar los resultados obtenidos en los aplicativos, en donde gráficamente los resultados son en cierta medida coincidentes o por lo menos las predicciones guardan similitudes con los polígonos registrados en el inventario utilizado.

Por otro lado, en lo referente a los parámetros reológicos del suelo, se presentó una situación similar. Para esta investigación no se contaba con información referente a los suelos involucrados en los eventos analizados. No hay registros de valores de viscosidad para este tipo de suelos y en general de ningún parámetro de fricción y demás, mas allá de generalizaciones que se encuentran en la literatura de valores probables de acuerdo a la geología presente en la zona. Particularmente se utilizaron los valores de viscosidad y de fricción viscoso-turbulenta, en el caso de RAMMS, que se sugieren en el manual de usuario del aplicativo, mientras que por ejemplo Hussin et al., 2012 utilizó valores obtenidos de estudios realizados en zonas con características similares a las que se estaban evaluando y en cuencas instrumentadas y ampliamente estudiadas por lo que la calidad de la información era buena y precisa.

Sin embargo, se esperaba que al usar valores de la literatura, los resultados de igual manera pudiesen reflejar el caso real, ya que Cesca y D'Agostino, 2008 en un estudio similar en donde comparaba RAMMS con Flo 2D (este último no fue usado en esta investigación), utilizó valores para el factor de fricción turbulenta ζ entre un rango de 15 y 1000 m/s^2 de acuerdo a valores típicos que extrajo de la literatura. En este caso, el valor seleccionado para este parámetro fue justamente de 1000 m/s^2 . Por ejemplo, en otros estudios analizados, se utilizaron valores de 0.05 y 1200 $/s^2$ para modelar las condiciones en los Alpes Suizos (Frank et al., 2015), 0.15 y 400 m/s^2 con una densidad de 1400 kg/m^3 para modelar la condición del volcán Pico de Orizaba en México (Franco-Ramos et al., 2020) y por ejemplo, en el caso evaluado en el Perú, en donde se analizó una subcuenca en la zona andina peruana, los valores utilizados fueron de 0.12, 1000 m/s^2 y 1000 kg/m^3 para la viscosidad, el coeficiente de fricción viscoso-turbulenta y la densidad. Tal como se puede ver, en los valores de viscosidad

no se encuentra un consenso respecto a los valores utilizados en esta investigación y las otras de referencia, con la diferencia de que en todos los casos mencionados se contaba con información levantada en campo en algunos casos, registros gubernamentales de estudios de campo hechos posterior a los eventos o se extrajeron de otros casos ampliamente documentados ocurridos en zonas similares al caso evaluado. Mientras que para el caso del coeficiente de fricción viscoso-turbulenta, los valores rondaban los $1000m/s^2$ tanto para las zonas alpinas como para el usado en la región andina de Perú. Esto de una u otra manera permite inferir que los resultados obtenidos a partir de RAMMS son más susceptibles a los valores de viscosidad que del coeficiente de fricción viscoso-turbulenta.

Por otro lado, respecto al estrato de suelo que se consideró que se estaba deslizando (ver Figura 5.2), se tuvieron dos consideraciones importantes debido a la configuración de la ecuación a partir de la cual fue calculado. Una de ellas corresponde a que no se consideraron pendientes mayores de 45° . Para esto se procesó el ráster de pendientes de la cuenca en ArcGIS para limitar los valores de pendiente a 45° , dado que el modelo considera que en pendientes mayores a este valor no hay formación de suelo. La otra consideración corresponde a que se eliminaron las pendientes con valor de 0° (cero grados), ya que se generaban divisiones por cero dentro de la expresión, por lo que este valor fue reemplazado por 0.001° . Ortiz y Vega, 2021 utilizó en el 2021 esta misma expresión para calcular los espesores del estrato deslizando en los márgenes de la quebrada Ovejas en Antioquia y los valores obtenidos para las zonas de media a alta pendiente (18° a $>45^\circ$) se encontraba en un rango entre 0.51m y 1.5m. Estos valores son similares a los obtenidos tanto para la cuenca de la quebrada La Liboriana como la cuenca de la quebrada La Argelia. Como ya se mencionó esto es un supuesto dado que no se cuentan con perfiles estratigráficos para chequear las profundidades reales de los estratos que se deslizaron y por tanto, limitar la profundidad al máximo obtenido de 1.5m, es limitar el volumen que puede desplazarse y por tanto, el *runout*.

En el caso de Flow R, (Xu et al., 2022) utilizó como parámetros de entrada para ejecutar sus modelaciones un DEM obtenido de la misión espacial ALOS PALSAR con resolución $12.5 \times 12.5m$, la acumulación del flujo, la pendiente, la curvatura y un ráster con el uso del suelo con una resolución de $10 \times 10m$. La forma en la que verificaron los resultados fue utilizando una distribución de datos de la lista de puntos de desastre utilizando ArcGIS. Básicamente verificaron cuantos deslizamientos fueron simulados de una lista total de 89 puntos. En total pudieron predecir 78 puntos (deslizamientos), lo que se traduce en un valor de precisión de la simulación del 87.6%. Esto por ejemplo solo habla de la precisión en cuanto a su capacidad de predecir un evento sin involucrar la coincidencia total entre el área o la extensión predicha por el modelo y la extensión real de los deslizamientos. Es mucho más simple que los análisis ejecutados en esta investigación y aún así son concluyentes respecto a la utilidad de este aplicativo. (Pastorello, Micheli y D'Agostino, 2017) propuso para la identificación de las celdas en donde se inician los deslizamientos un método en el que analizaban el ráster del flujo de acumulación de la zona de estudio y todas aquellas celdas cuya acumulación fuera mayor a 10 Ha fue seleccionada como semilla o esarpe. En esta investigación no se tuvo que hacer ese análisis por ejemplo, puesto que se partió desde el inventario generado a partir de las imágenes satelitales. Sin embargo, traer esto a colación se considera importante ya que en muchos casos, donde no sea posible contar con un inventario de escarpes o la calidad de las imágenes satelitales no sea buena o incluso, se pretenda hacer la predicción de eventos que

aún no han sucedido, el emplear esta metodología para seleccionar celdas de inicio de deslizamientos es rápido y ofrece el generar un panorama de las probabilidades de que ocurra un deslizamiento en una zona específica. En todas las simulaciones que ejecutó, utilizó el algoritmo de dirección de Holmgren modificado con un valor de $dh=1m$, mientras que en esta investigación se utilizó uno mas pequeño ($dh:0.5m$) y valores de x distintos (6,7 y 20). Estos dos parámetros son importantes para refinar los resultados pero en realidad no son comparables entre cada caso ya que estos van a depender exclusivamente del nivel de divergencia que se esté buscando de acuerdo al caso que se está analizando.

En la evaluación de los resultados obtenidos para *Gravitational Process Path*, (Goetz et al., 2021) utilizó el *Random Walk* para modelar la máxima dispersión lateral del *runout*, notando que con este una gran proporción de las trayectorias de los deslizamientos se ubicaron en la periferia de las trayectorias reales, algo similar a lo que se obtuvo con la modelación de este aplicativo dentro de este trabajo. Además, sostiene que utilizar DEM con resoluciones superiores a 20m puede ser demasiado general para capturar cárcavas menores que pueden tener gran acumulación de flujo (Goetz et al., 2021), además, que es posible que el DEM utilizado para el procesamiento de los datos, que en el caso de el y en el presente fue de 12.5m pueda ser derivado de un DEM con una resolución espacial que podría incluso ser mayor a 30m, por lo que las celdas del nuevo DEM podrían contener algunas de las generalizaciones del terreno del DEM original. No obstante, si bien esto representa un factor importante a la hora de evaluar los resultados, no es impedimento para que se puedan obtener resultados valiosos, lo cual se evidenció con los resultados obtenidos con las modelaciones ejecutadas, pues se logró modelar las condiciones reales en todos los casos a pesar de su baja coincidencia en términos de áreas, además que también se trazaron todas las demás posibles trayectorias que podría tener el flujo, permitiendo entonces determinar incluso toda la extensión del área susceptible a la ocurrencia de estos deslizamientos.

Entonces teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, y el hecho de que la variabilidad de estos parámetros en términos espaciales es alta, los resultados esperados estaban supeditados a muchas variables que claramente afectan la calidad de su rendimiento. Sin embargo, como bien pudo observarse en los resultados obtenidos, principalmente para la cuenca de la quebrada La Liboriana, que es el objetivo principal de esta investigación, los deslizamientos simulados por los aplicativos guardan cierta consistencia con los polígonos que se formaron en el caso real, aunque no suceden precisamente dentro de la misma área, es decir, se observa que estos deslizamientos están levemente desplazados de los reales y no son absolutamente iguales, no tienen exactamente el mismo *runout* pero tampoco son extremadamente diferentes entre ellos.

Caso contrario por ejemplo, con los resultados obtenidos para la cuenca de la quebrada La Argelia. En esta cuenca se observa que los resultados obtenidos para los aplicativos en realidad no guardan mucha concordancia con el inventario de deslizamientos que se tiene. La información respecto a esta cuenca es incluso mas escasa en comparación a la de la quebrada La Liboriana, particularmente porque está ubicada en una zona rural poco poblada en donde estos deslizamientos no han afectado a ninguna población ni han generado pérdidas económicas por lo que no hay un interés en inventariar estos sucesos ni instrumentalizar la cuenca para poder monitorearla y estudiarla detalladamente. Dicho esto, y tal como fue el ensayo de validación realizado en esta investigación, para tratar de modelar estos eventos

se deben usar datos provenientes de otras cuencas de características climatológicas, geológicas y geotécnicas similares. Pero debe haber cuencas que estén bien documentadas y ampliamente estudiadas, en donde la información que se tenga sea verdaderamente correspondiente a ella y no como el caso particular donde toda la información utilizada también provenía de fuentes secundarias. Los resultados obtenidos con RAMMS por ejemplo, no son concluyentes, ya que ni siquiera se identifica que se haya generado un derramamiento de los deslizamientos en la dirección de la pendiente y para el GPP y Flow R es necesario terminar de calibrar los coeficientes que controlan la divergencia del flujo para obtener resultados más ajustados.

Profundizando en los resultados obtenidos con los modelos propuestos, se puede decir en forma generalizada que hay una coincidencia de alrededor del 60 % entre las zonas donde se generaron deslizamientos, teniendo como base los polígonos del inventario de deslizamientos utilizados. Para la clasificación del área bajo la curva obtenida con cada uno de los modelos se tuvo en cuenta la clasificación propuesta en Pradhan y Kim, 2016 en donde para valores que rondan 0.6, tal como los obtenidos con estos aplicativos, son aceptables o conservadores ya que básicamente este valor significa que el éxito general de cada aplicativo propuesto para la predicción de un deslizamiento es del 60 %. En el desempeño de los modelos se considera que también fue conservador o aceptable considerando la incertidumbre de los parámetros involucrados en el proceso de cálculo de estos deslizamientos y la variabilidad de los mismos espacialmente, incidiendo directamente en el grado de coincidencia y precisión de los modelos propuestos, especialmente si estos parámetros fueron obtenidos desde fuentes de información secundaria.

En estudios que guardan cierta similitud con esta investigación y que fueron realizados en la cuenca de la quebrada La Liboriana se obtuvieron valores de AUC similares a los registrados en este documento. Por ejemplo, Hidalgo y Vega, 2021 realizaron una evaluación probabilística del riesgo de deslizamientos en cuencas de abastecimiento de agua en esta cuenca. Allí se obtuvieron valores de casi el 60 % de correspondencia para los resultados obtenidos con el modelo que ellos propusieron que además estaban dentro del rango de valores obtenidos en otros estudios realizados en la misma zona y que también son mencionados tal como Ruiz-Vásquez y Aristizábal, 2018 que obtuvieron valores de AUC de 0.69 usando un análisis de regresión logística estadística multivariado y Marin, Velásquez y Sánchez, 2021 obtuvieron un desempeño de los modelos cercanos a valores AUC de 0.8 para la cuenca completa y de 0.56 para la parte superior de la misma (Hidalgo y Vega, 2021). Múltiples diferencias en las metodologías aplicadas y en los resultados objetivos de cada uno de ellos, sin embargo, es claro que en todos se utilizó el inventario de deslizamientos generado por Ruiz-Vásquez y Aristizábal y a partir de este fue que se realizaron las comparaciones respectivas. En ese sentido, los resultados obtenidos en esta investigación, con las consideraciones y limitaciones planteadas no están lejos de otros estudios que se han hecho y que han involucrado otro tipo de variables como la lluvia que desencadenó dichos eventos.

En otros estudios donde se han implementado RAMMS y Flow R por ejemplo, para la calibración del modelo o la determinación de la calidad de sus resultados se utilizaron los datos reales del evento contra los obtenidos con la simulación. Por ejemplo Hussin et al., 2012 contaba con todos los parámetros referentes al evento que estaba evaluando (volumen desplazado, total del volumen depositado, el *runout*, etc) y calculó la desviación estándar de los resultados obtenidos con el modelo

en comparación con los reales. A partir de estos valores concluyó respecto a la precisión y exactitud del modelo. Este mismo ejercicio podría haberse implementado en esta investigación, pero al no contar con información de este tipo para los deslizamientos y considerando que se estaba analizando un inventario con una cantidad considerable de eventos, simplemente no se consideró que fuera aplicable para el caso particular.

Capítulo 6

Conclusiones

De acuerdo a los análisis ejecutados a los resultados obtenidos con los modelos RAMMS, Flow R y GPP se llegó a la conclusión de que el desempeño de los modelos es conservador pero sus resultados son aceptables ya que los valores obtenidos para los análisis ROC se encuentran dentro del rango de valores obtenidos para investigaciones similares desarrolladas en la zona y que fueron evaluadas con esta misma metodología. Es claro que el origen y la calidad de la información tuvo influencia directa en los resultados. Sin embargo, si se considera que en Colombia, encontrar cuencas instrumentadas que estén ampliamente documentadas y sobre las que haya registros de eventos de deslizamientos que hayan ocurrido y los parámetros inherentes a cada uno de ellos es tarea difícil, por no decir imposible, por lo que investigaciones como estas abren la posibilidad de implementar herramientas como las aquí expuestas que brindan resultados que pueden usarse de manera conservadora y que dan nociones respecto a situaciones que podrían ocurrir en la realidad.

En el caso de RAMMS, que es el único aplicativo que tuvo en cuenta parámetros reológicos de los suelos, los resultados obtenidos dependían de la viscosidad, la fricción viscoso-turbulenta y la altura del estrato que se desliza. Como se mencionó anteriormente, estos parámetros utilizados provienen de fuentes de información secundaria y el procesamiento de esta con herramientas bajo ambientes SIG, dado que no se cuenta con información levantada en campo ni registros de eventos que se hayan presentado previamente al caso de estudio que permitieran tener información que describiera completamente la realidad. Tal como se mencionó, estas limitaciones en la información influenciaron los resultados obtenidos. En las primeras modelaciones ejecutadas en RAMMS, se utilizó un espesor de suelo que se desliza de 1m, de manera generalizada, para todas las semillas que se estaban teniendo en cuenta. Los resultados obtenidos no asemejaban de ninguna manera lo que había ocurrido aun cuando la viscosidad y el parámetro de fricción viscoso turbulenta estaba dentro de los rangos sugeridos por el manual de usuario del aplicativo para este tipo de deslizamientos. En otras palabras, el aplicativo es altamente sensible a este parámetro y dentro de los análisis realizados por esta investigación se mencionó que para determinar este espesor se tuvieron en cuenta consideraciones que limitaban las condiciones reales topográficas de la cuenca, por lo que estas profundidades son una aproximación que no hay manera de demostrar que tan fiel a la realidad de lo que se deslizó es. En ese sentido, aunque visualmente los resultados sí parecen ser consecuentes con el inventario de escarpes y las huellas de los deslizamientos, al hacer un análisis más minucioso se encontró que en realidad es necesario refinar los parámetros de entrada y probablemente volver a realizar una calibración de ellos.

En el caso de Flow R, no estuvieron involucrados parámetros reológicos del suelo. Solo se tuvo en cuenta un modelo de elevación digital del suelo, un archivo ráster

que daba cuenta de las celdas en donde se iniciaron deslizamientos, el mapa de pendientes de la zona, la acumulación del flujo, el mapa de aspecto o de orientación de la pendiente y el mapa de curvatura para la identificación de zonas cóncavas o convexas. Esto se debe principalmente a que Flow R determina la trayectoria más probable de un deslizamiento a partir del análisis de celdas y las diferencias altimétricas con sus vecinas. Por esto, tiene en cuenta dentro de sus parámetros de entrada tanta información respecto a la forma del terreno y la pendiente de este. El resultado de este aplicativo es una probabilidad de susceptibilidad de deslizamiento que pueda tomar esa trayectoria y por eso sus resultados tienen un valor que va de 0 a 1. En este, a diferencia de RAMMS no es posible obtener ningún otro tipo de información que sea aplicable a la planeación de territorios más que la probabilidad de extensión de un deslizamiento en una zona que cumple con ciertos requisitos específicos.

Por otro lado, como se mencionó en distintos capítulos, Flow R no entrega el posible runout de un deslizamiento como resultado. Sin embargo, indirectamente es un dato que puede conocerse a partir del mapa de probabilidad que entrega, puesto que se pueden conocer las celdas susceptibles a que un deslizamiento las tome como trayectoria, por lo que se puede determinar con las celdas con más alta probabilidad el alcance total del runout del deslizamiento que se está analizando y procesar esta información en un ambiente SIG para determinar la magnitud real de dicho alcance.

Por último, el Gravitational Process Path es el más sencillo de los aplicativos que se utilizaron en términos de configuración e información que debe tenerse disponible para su implementación, aunque también es el que menos resultados ofrece, puesto que lo único que puede determinarse con este es el alcance o runout del deslizamiento, pero basándose únicamente en la cantidad de celdas que pueden verse involucradas en el desplazamiento. No entrega magnitud de esta variable, por lo que sus resultados deben ser inevitablemente analizados con herramientas SIG para poder ser comparados. Tiene una lógica y un funcionamiento similar al Flow R, en el sentido que también analiza las posibles direcciones de flujo que puede tomar un deslizamiento, basándose en las características topográficas de la zona de análisis. Sin embargo, el tiempo computacional de este aplicativo es ínfimo, entregando resultados casi que de inmediato, lo que lo hace una herramienta útil puesto que se pueden usar parámetros de entrada de fácil consecución y los resultados que ofrece pueden dar una noción de lo que sucedió podría suceder (en casos futuros) y trazar zonas potenciales en donde podrían ocurrir deslizamientos o a donde podrían depositarse.

Aunque Flow R tiene un requisito también mínimo de información para producir resultados, el módulo GPP de SAGA GIS tiene como ventaja que permite visualizar los parámetros de entrada y los resultados inmediatamente después de calculado el proceso dentro de su misma interfaz, mientras que con Flow R esto no es posible y debe utilizarse un software SIG para poder ver sus resultados. Es por esta razón que, en caso de requerir hacer un análisis rápido de las posibles eventualidades en una zona en particular, el módulo GPP es el más recomendado para utilizar. Respecto al ejercicio de la validación de los resultados utilizando la cuenca de la quebrada La Argelia en el Chocó, los resultados fueron muy dicentes puesto que en realidad en ningún caso lograron reproducir, al menos con la misma calidad de la calibración, lo ocurrido en realidad. Se nota que hay mucha divergencia en las direcciones de flujo calculadas por los aplicativos y en el caso de RAMMS, ni siquiera se logra que el flujo se desplace lo suficiente como para poder determinar una trayectoria clara del flujo

que se está desplazando, denotando entonces que los parámetros reológicos utilizados no pueden utilizarse de manera generalizada para suelos similares y entonces es necesario hacer una calibración particular para cada caso que vaya a evaluarse.

Es posible que incluso puedan desarrollarse ejercicios similares a este incluyendo información incluso más detallada respecto por ejemplo a los hidrogramas de las lluvias que desencadenan estos eventos, relacionarlos con distintos períodos de retorno y así encontrar la probabilidad de que ocurran ciertos eventos con magnitudes estrechamente relacionada con la probabilidad de ocurrencia. Muchos más parámetros topográficos pueden ser involucrados, la curvatura, ángulos de fricción y demás que ayuden a refinar y darle más exactitud a estos modelos y así lograr que las predicciones sean mucho más precisas y el desempeño de estos aplicativos mejoren. Los resultados obtenidos se consideran aceptables y la metodología propuesta en esta investigación es de fácil aplicación y replicación. Es probable que la información más difícil de conseguir respecto a todo lo que se utilizó en este documento sea un inventario de deslizamientos o una imagen satelital actualizada de la zona de estudio desde donde esta información pueda ser digitalizada para comparar. Sin embargo, pueden ejecutarse ensayos en zonas en donde no hayan ocurrido deslizamientos recientemente y se requiera determinar la probabilidad de que ocurran ante ciertas condiciones que puedan presentarse y den sospecha de la ocurrencia de un evento de este tipo. Además, en lo que respecta a dos de los tres aplicativos utilizados, son de libre descarga por lo que esto no representa una limitación en su implementación y uso por parte de entidades gubernamentales y no gubernamentales, que además cuentan con una interfaz amigable de fácil manejo que permite realizar predicciones de manera casi que instantánea.

Apéndice A

Resultados Modelos RAMMS

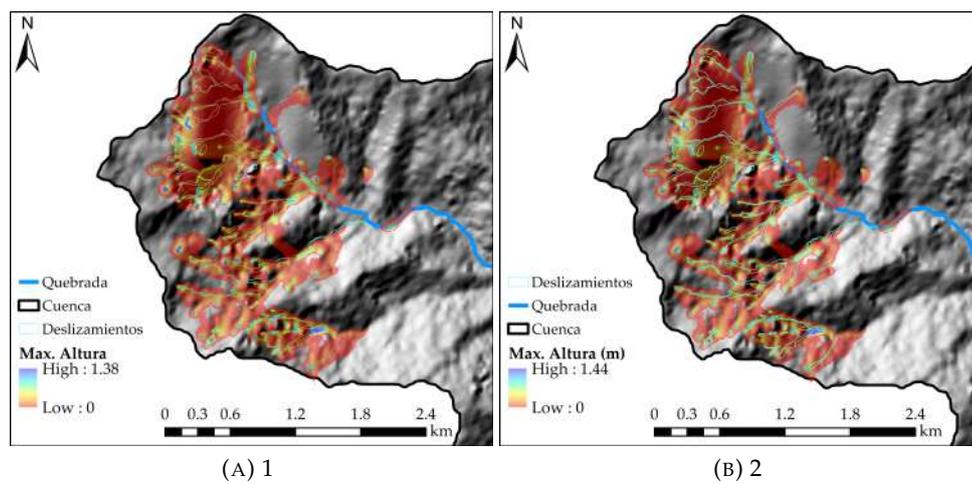


FIGURA A.1: Modelo 1 y Modelo 2 RAMMS

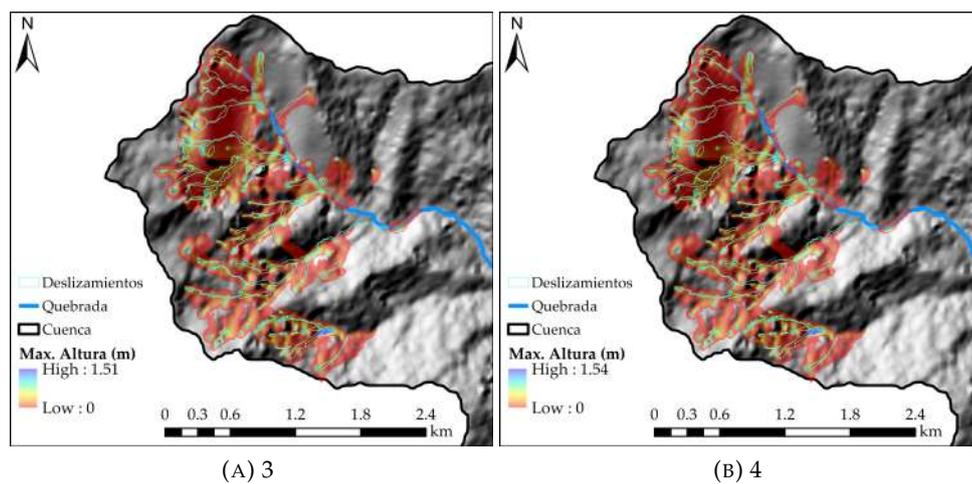


FIGURA A.2: Modelo 3 y Modelo 4 RAMMS

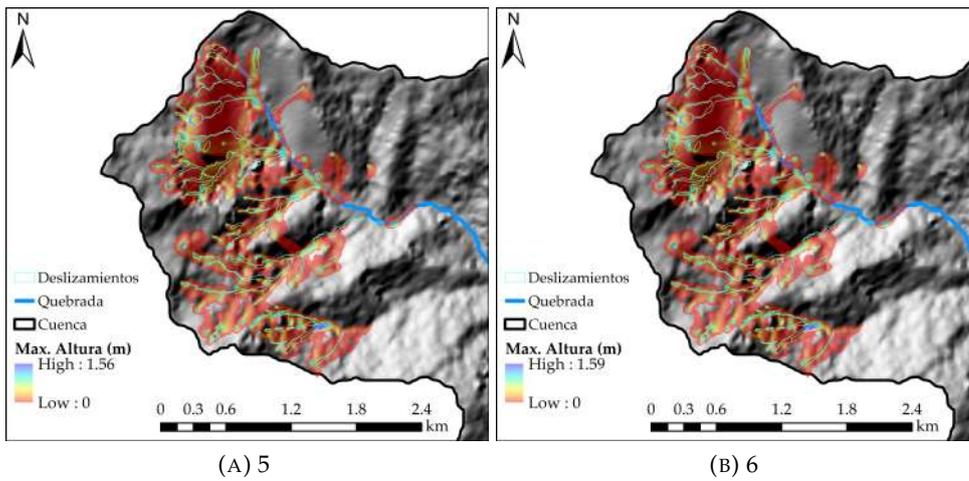


FIGURA A.3: Modelo 5 y Modelo 6 RAMMS

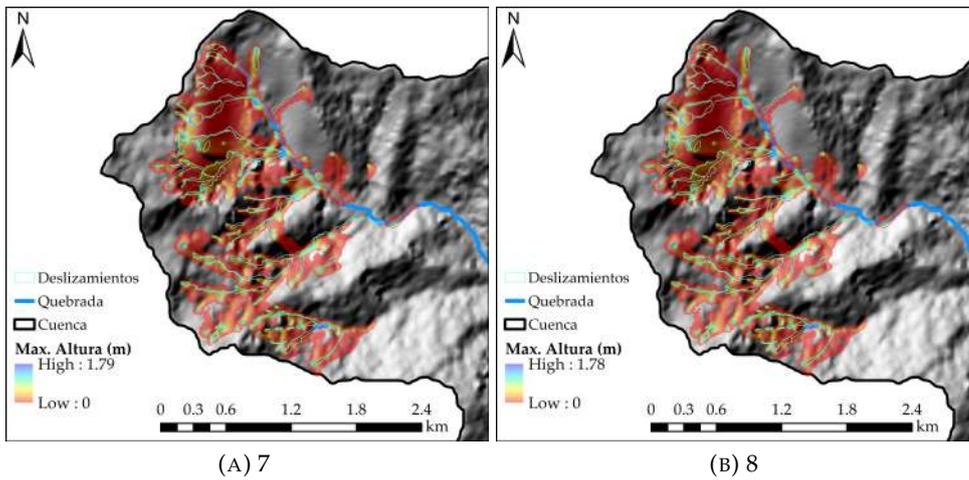


FIGURA A.4: Modelo 7 y Modelo 8 RAMMS

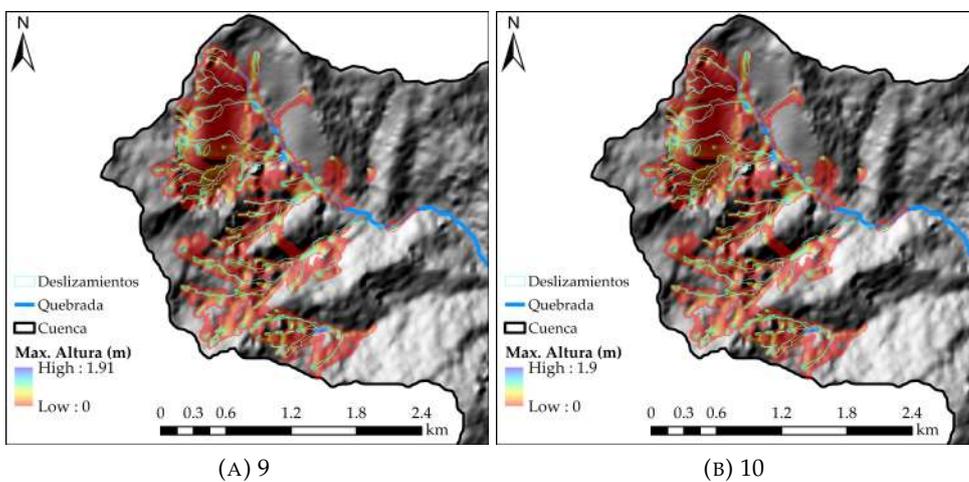


FIGURA A.5: Modelo 9 y Modelo 10 RAMMS

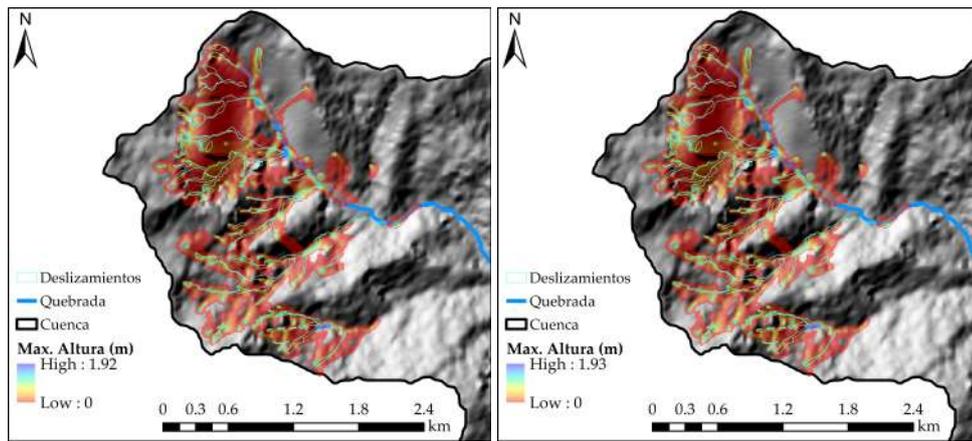


FIGURA A.6: Modelo 11 y Modelo 12 RAMMS

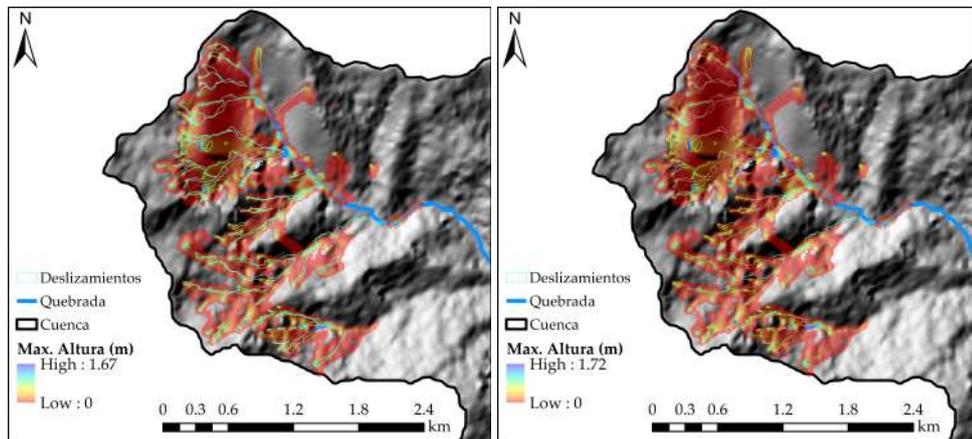


FIGURA A.7: Modelo 13 y Modelo 14 RAMMS

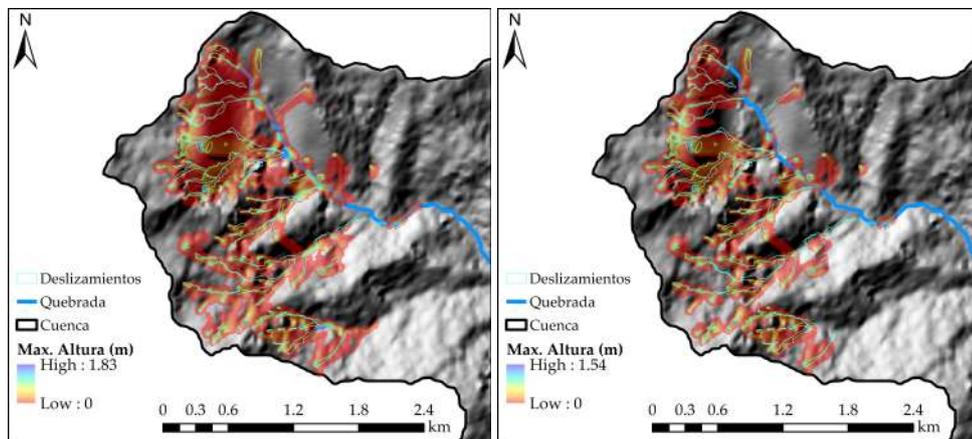
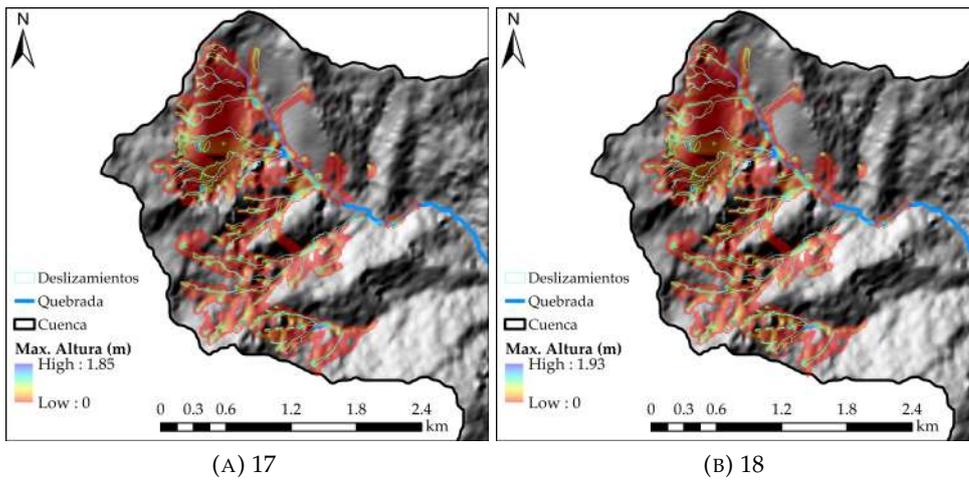


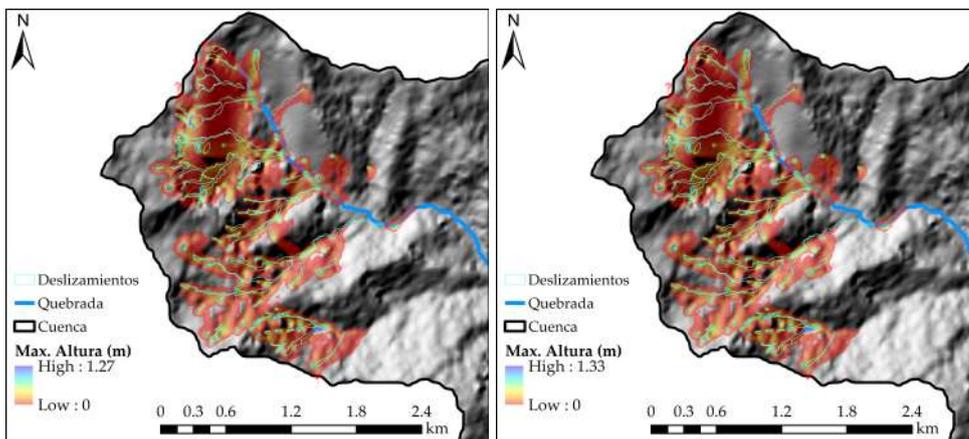
FIGURA A.8: Modelo 15 y Modelo 16 RAMMS



(A) 17

(B) 18

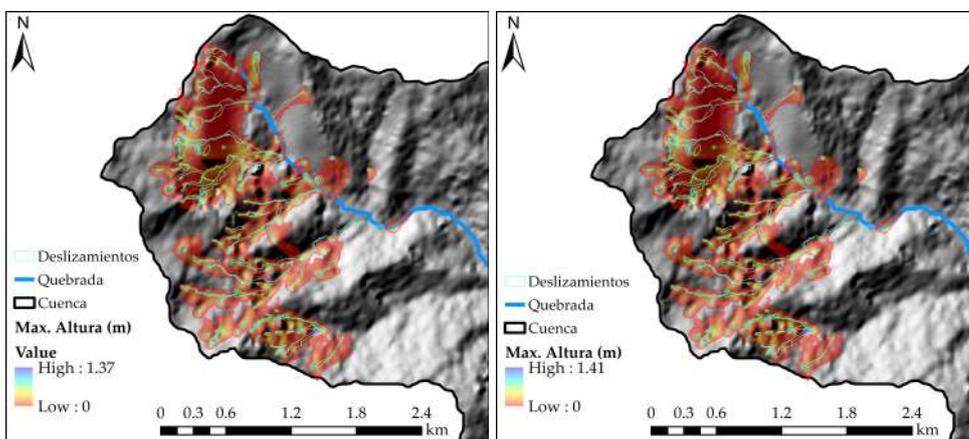
FIGURA A.9: Modelo 17 y Modelo 18 RAMMS



(A) 19

(B) 20

FIGURA A.10: Modelo 19 y Modelo 20 RAMMS



(A) 21

(B) 22

FIGURA A.11: Modelo 21 y Modelo 22 RAMMS

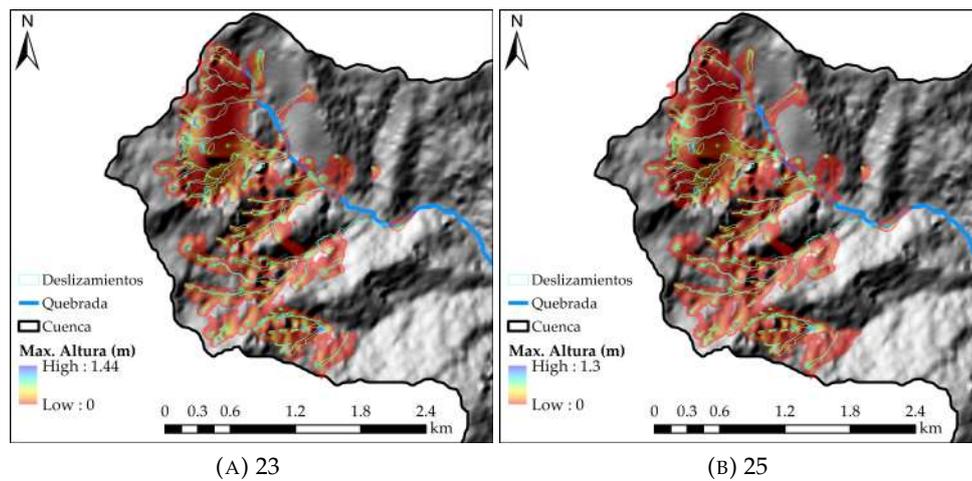


FIGURA A.12: Modelo 23 y Modelo 25 RAMMS

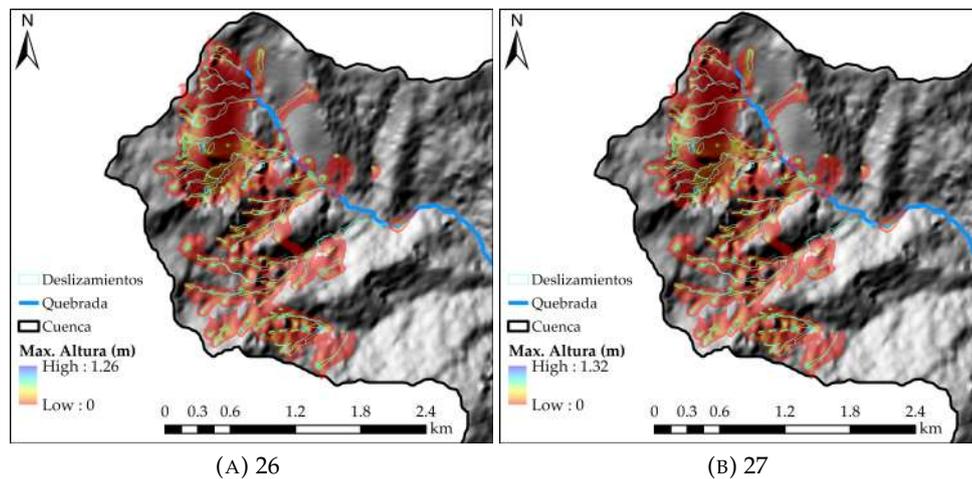


FIGURA A.13: Modelo 26 y Modelo 27 RAMMS

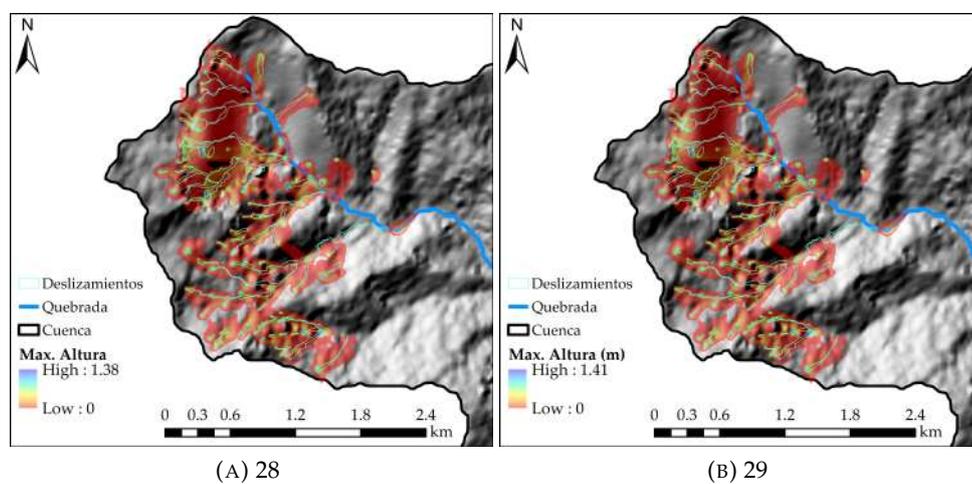


FIGURA A.14: Modelo 28 y Modelo 29 RAMMS

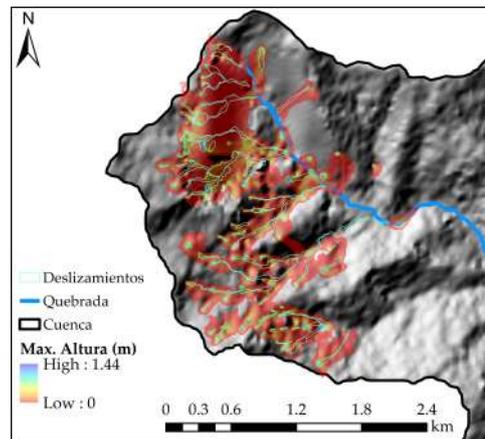


FIGURA A.15: Modelo 30 RAMMS

Apéndice B

Resultados Modelos Flow R

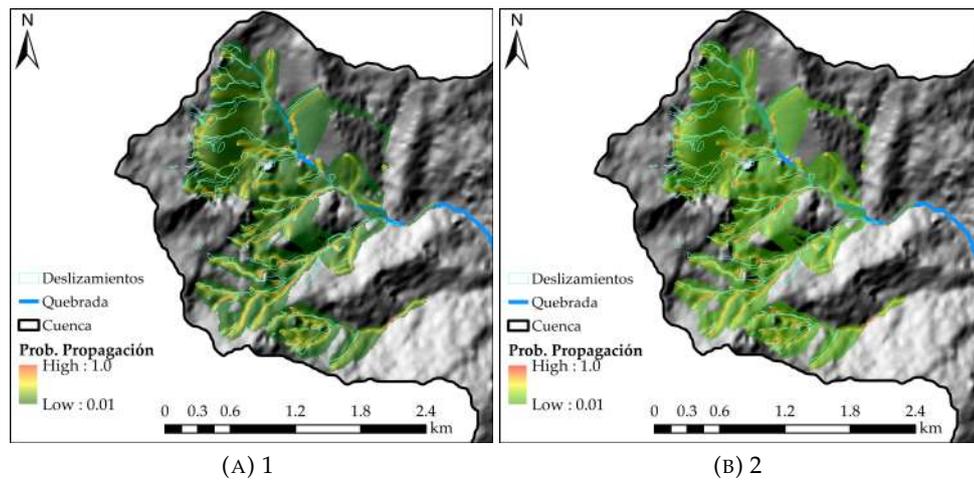


FIGURA B.1: Modelo 1 y Modelo 2 Flow R

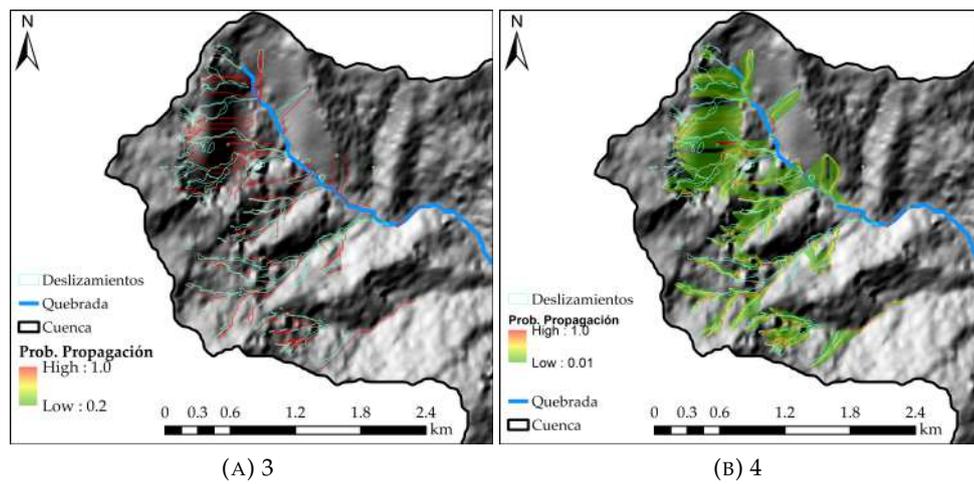


FIGURA B.2: Modelo 3 y Modelo 4 Flow R

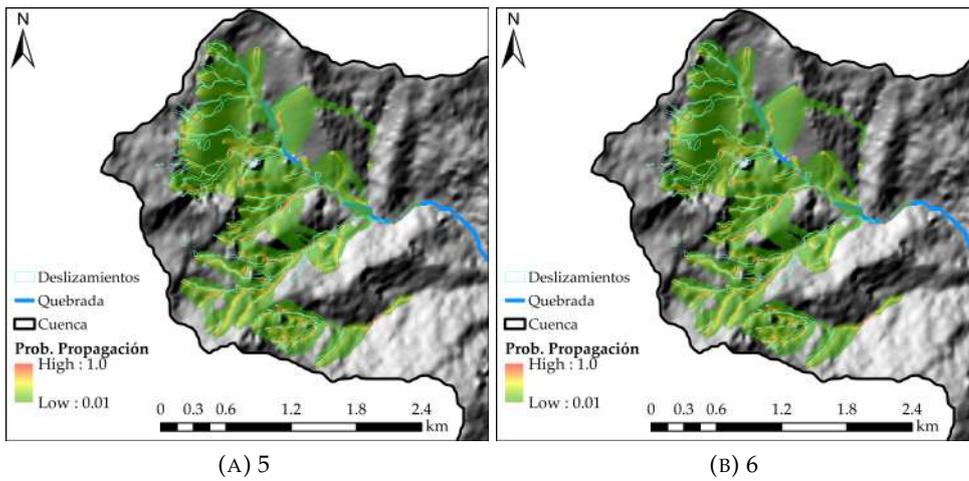


FIGURA B.3: Modelo 5 y Modelo 6 Flow R

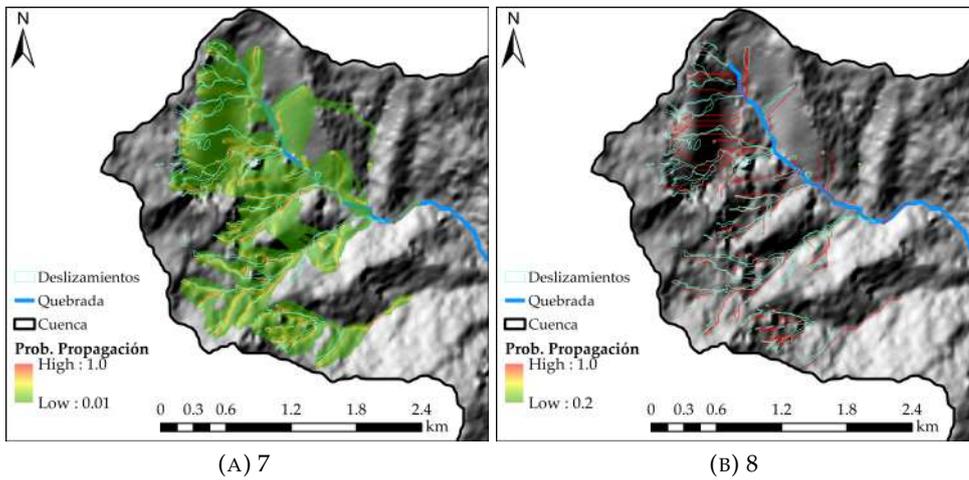


FIGURA B.4: Modelo 7 y Modelo 8 Flow R

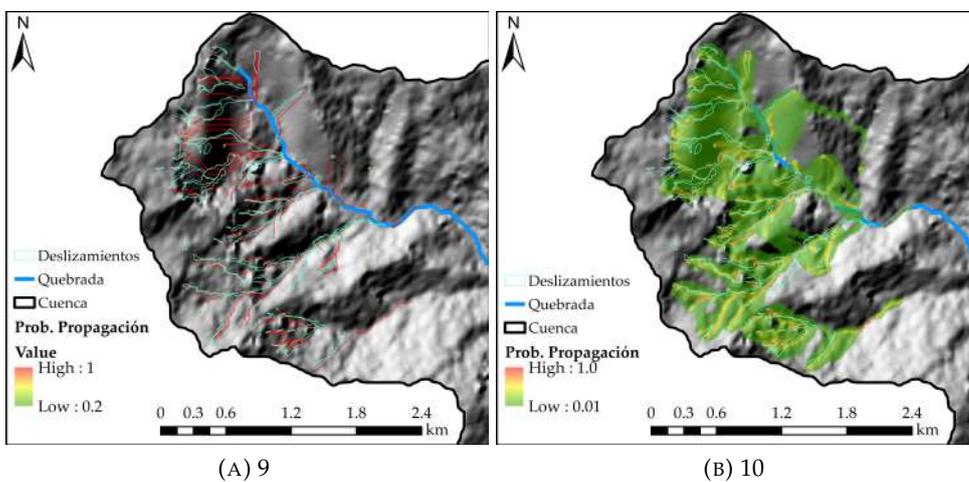


FIGURA B.5: Modelo 9 y Modelo 10 Flow R

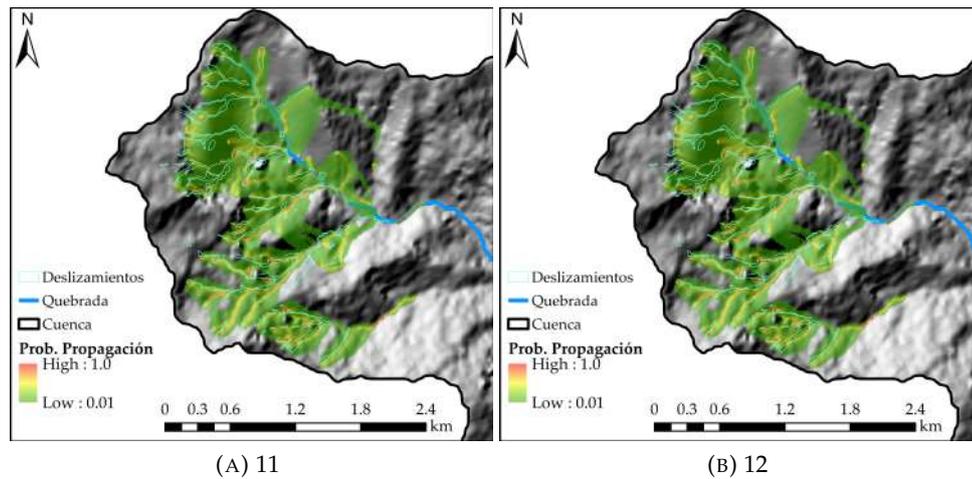


FIGURA B.6: Modelo 11 y Modelo 12 Flow R

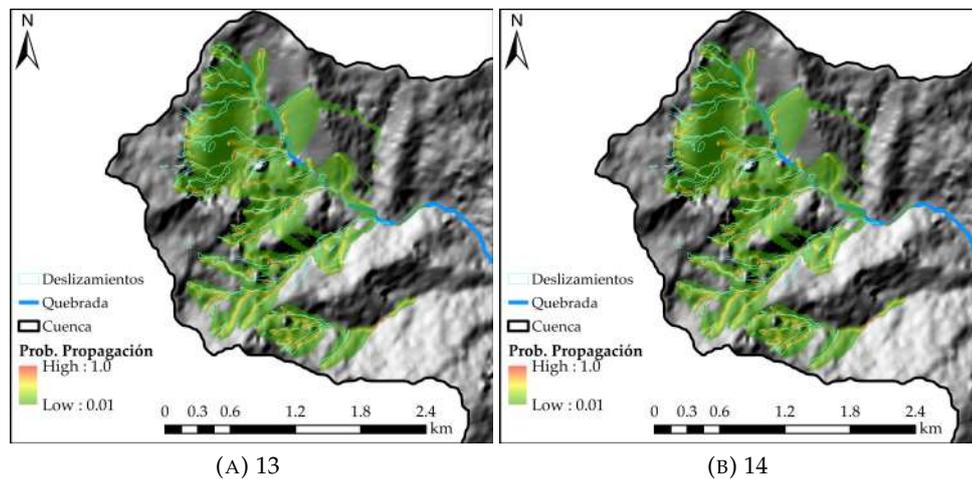


FIGURA B.7: Modelo 13 y Modelo 14 Flow R

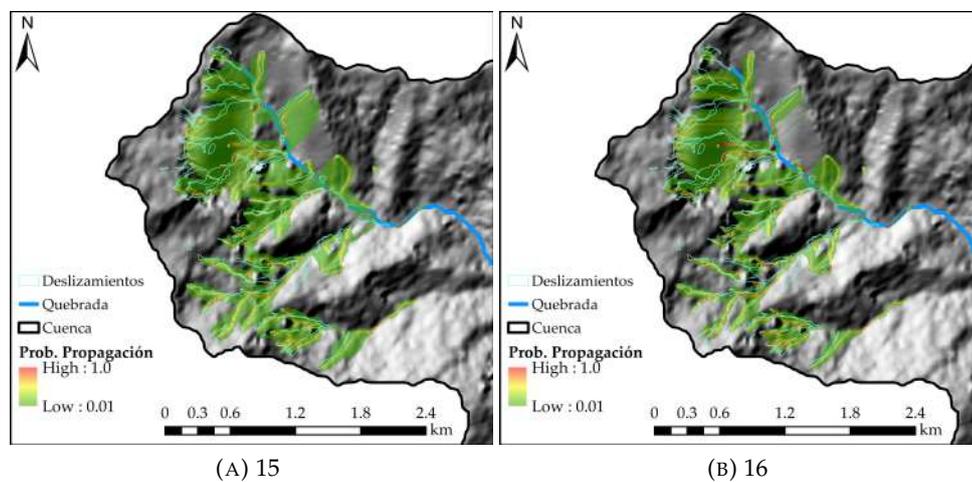


FIGURA B.8: Modelo 15 y Modelo 16 Flow R

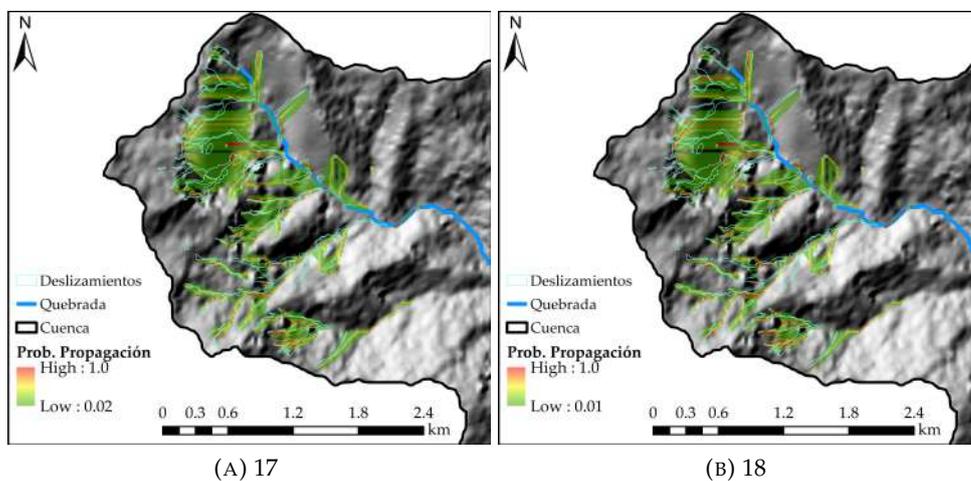


FIGURA B.9: Modelo 17 y Modelo 18 Flow R

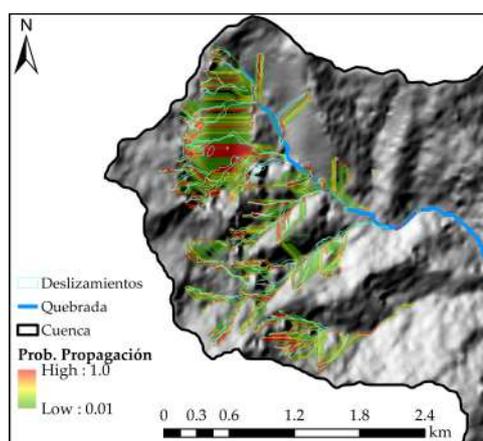


FIGURA B.10: Modelo 20 Flow R

Apéndice C

Resultados Modelos GPP con SAGA GIS

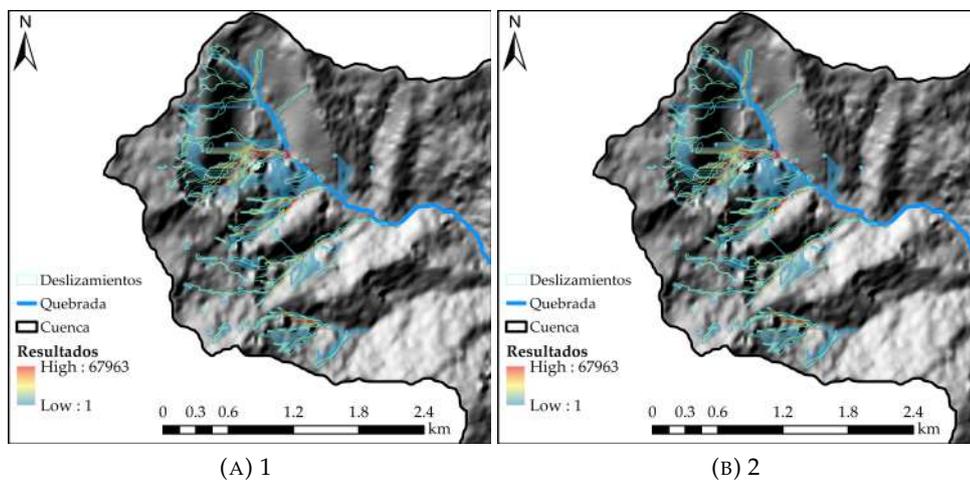


FIGURA C.1: Modelo 1 y Modelo 2 GPP-SAGA GIS

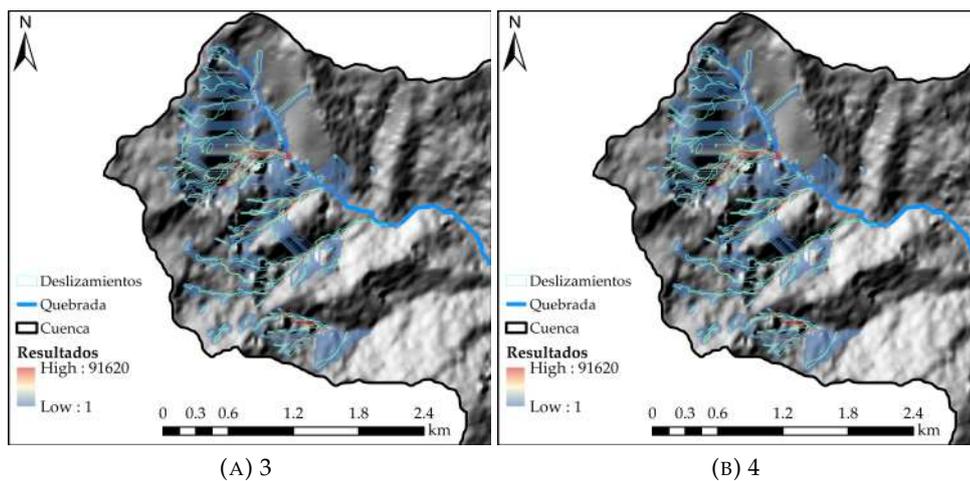


FIGURA C.2: Modelo 3 y Modelo 4 GPP-SAGA GIS

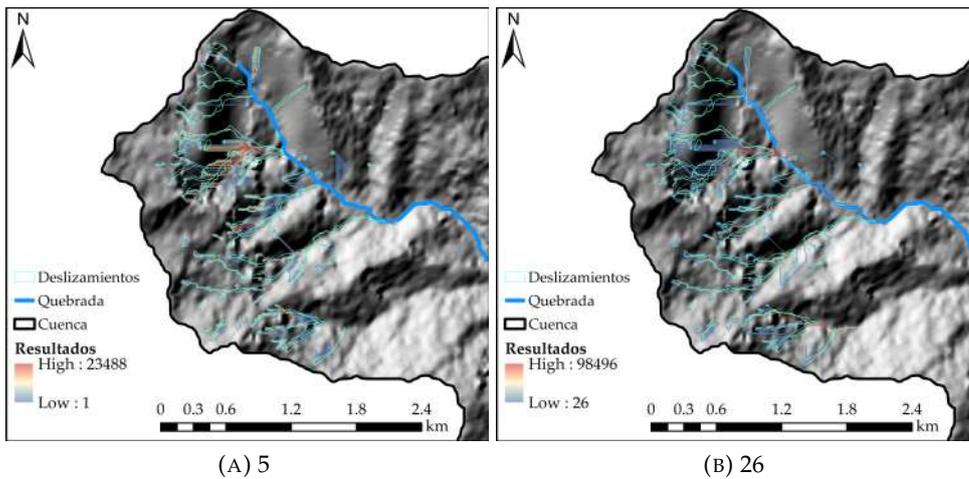


FIGURA C.3: Modelo 5 y Modelo 6 GPP-SAGA GIS

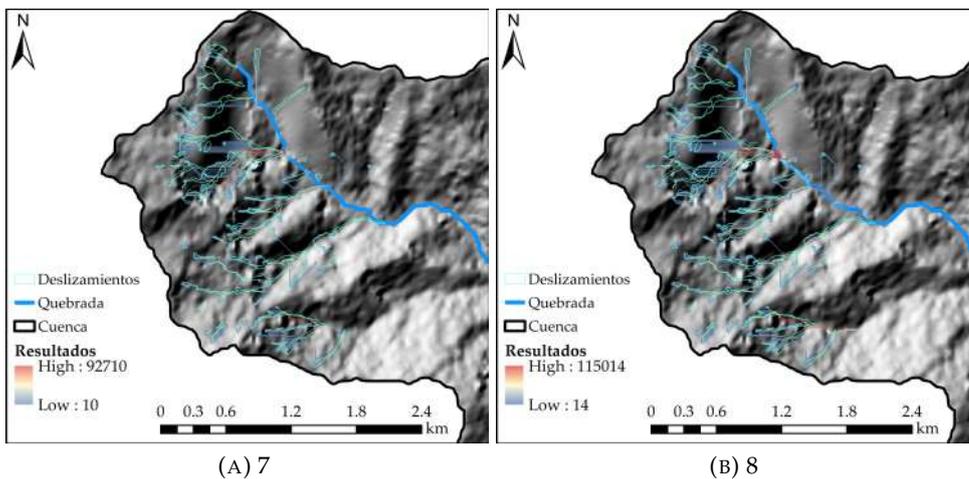


FIGURA C.4: Modelo 7 y Modelo 8 GPP-SAGA GIS

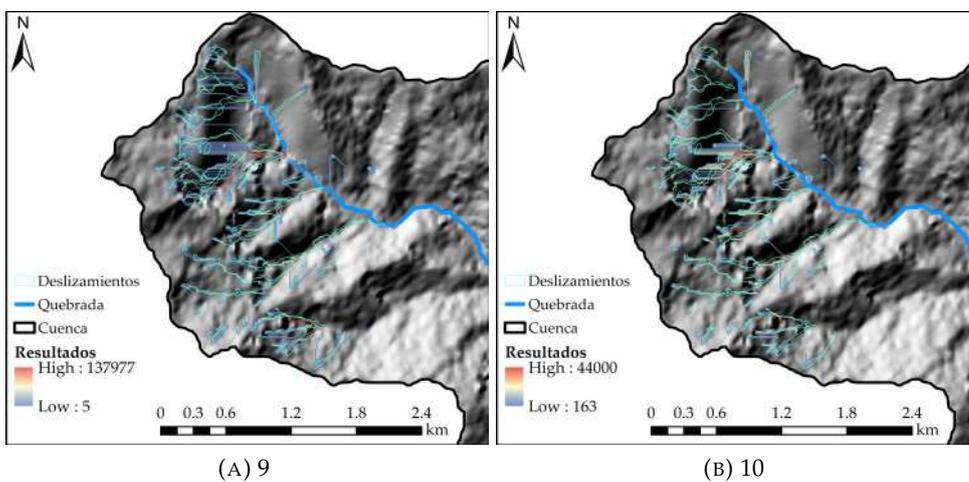
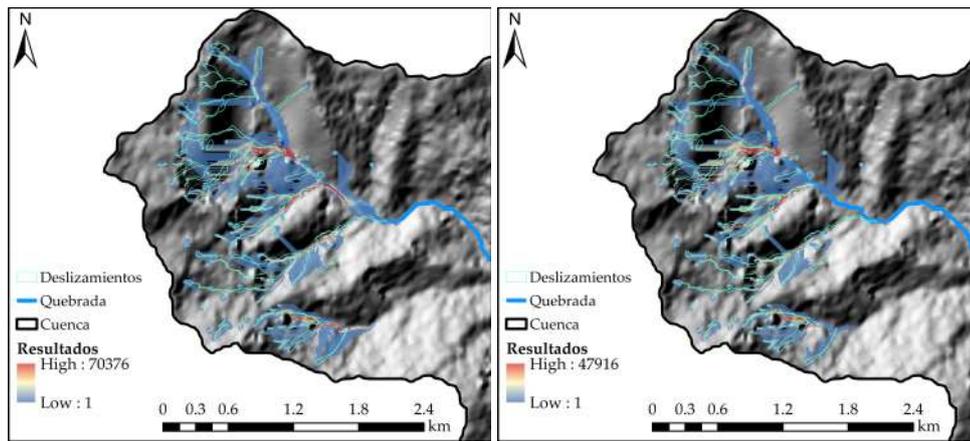


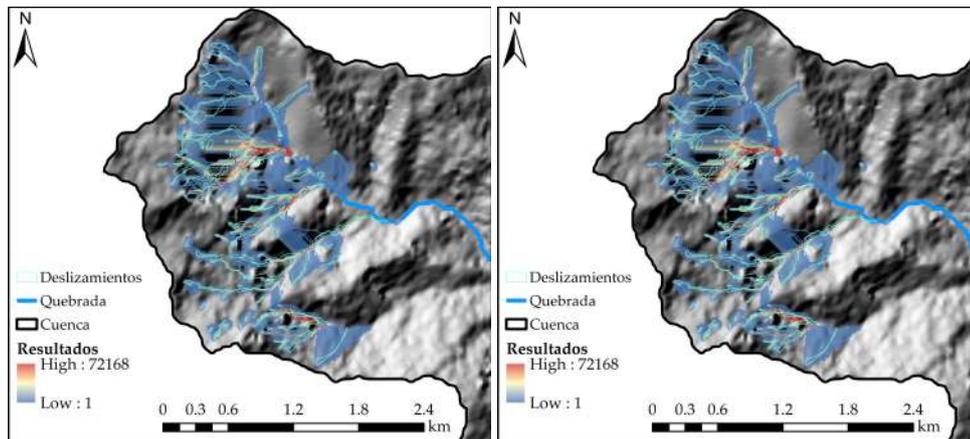
FIGURA C.5: Modelo 9 y Modelo 10 GPP-SAGA GIS



(A) 11

(B) 12

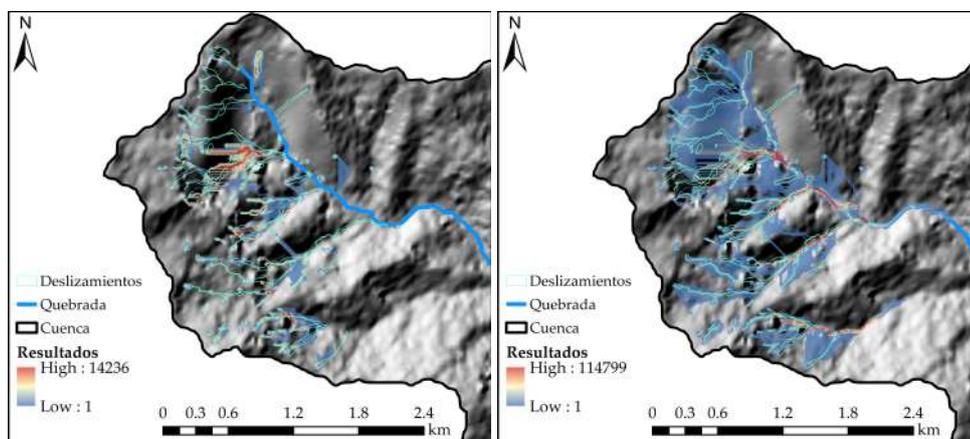
FIGURA C.6: Modelo 11 y Modelo 12 GPP-SAGA GIS



(A) 13

(B) 14

FIGURA C.7: Modelo 13 y Modelo 14 GPP-SAGA GIS



(A) 15

(B) 16

FIGURA C.8: Modelo 15 y Modelo 16 GPP-SAGA GIS

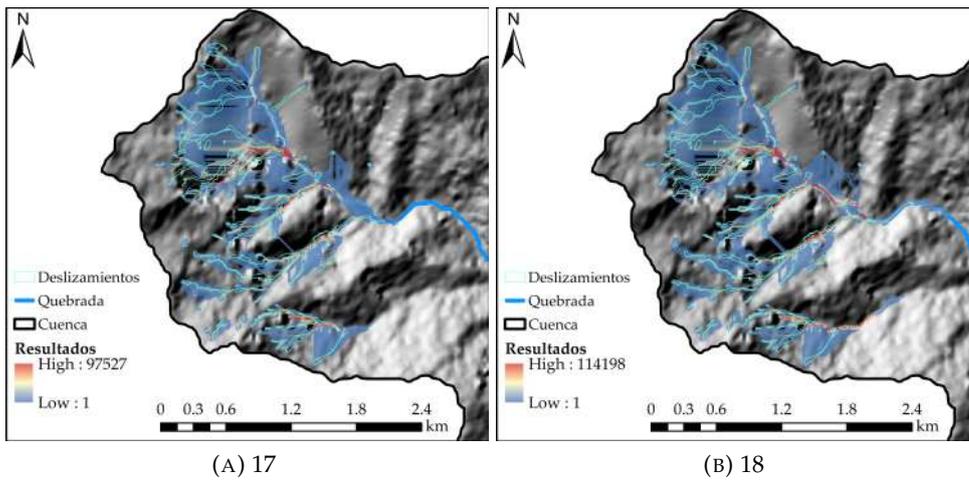


FIGURA C.9: Modelo 17 y Modelo 18 GPP-SAGA GIS

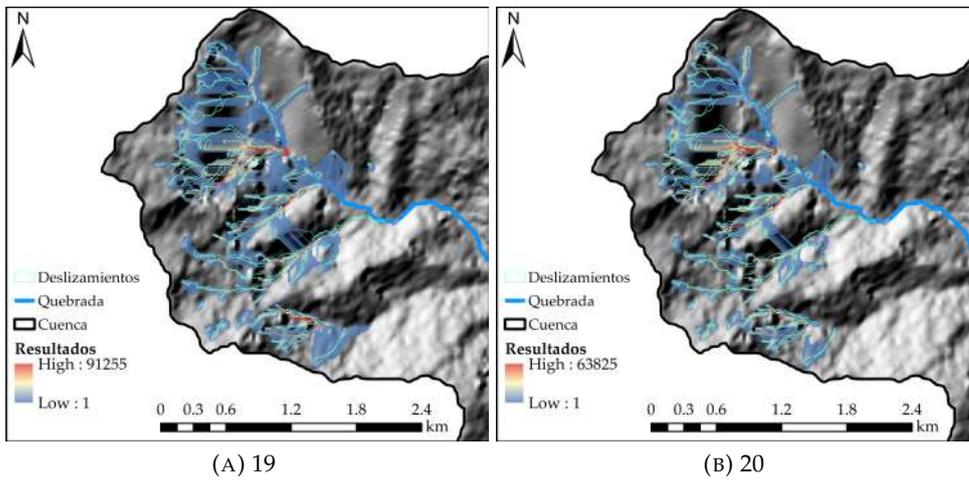


FIGURA C.10: Modelo 19 y Modelo 20 GPP-SAGA GIS

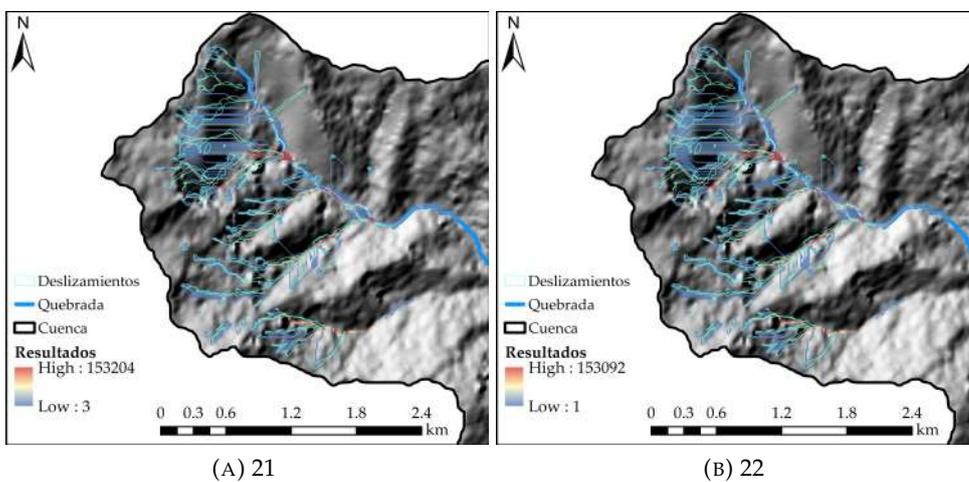
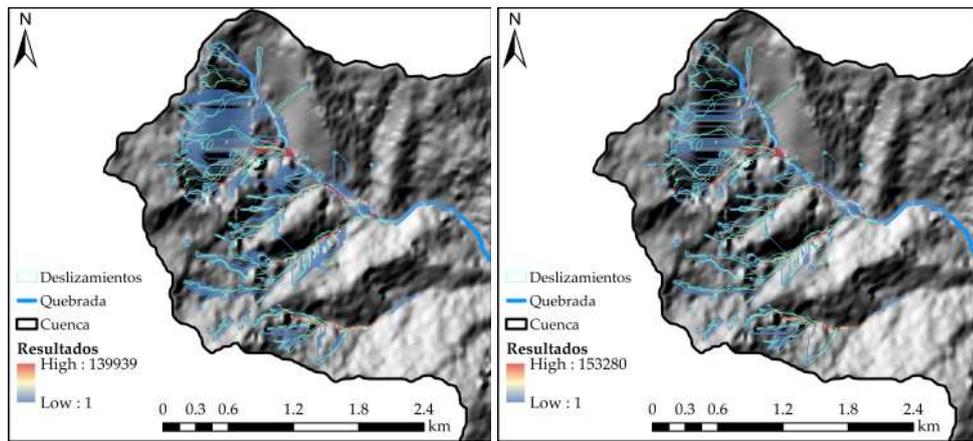


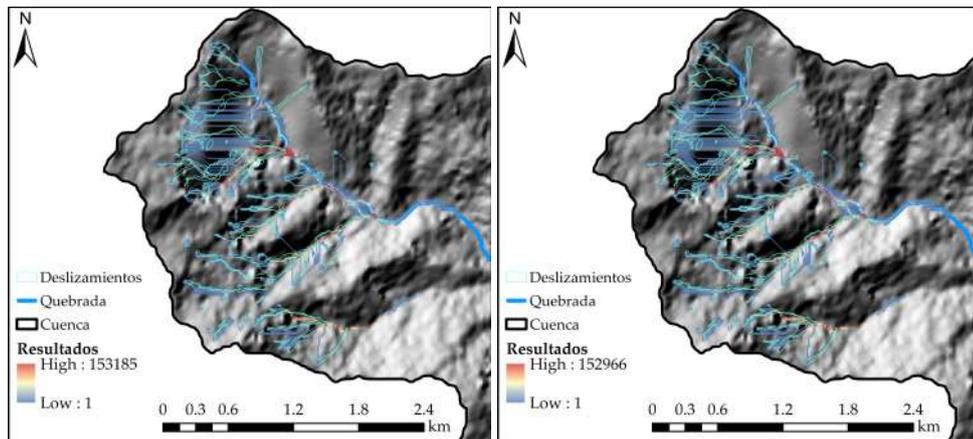
FIGURA C.11: Modelo 21 y Modelo 22 GPP-SAGA GIS



(A) 23

(B) 24

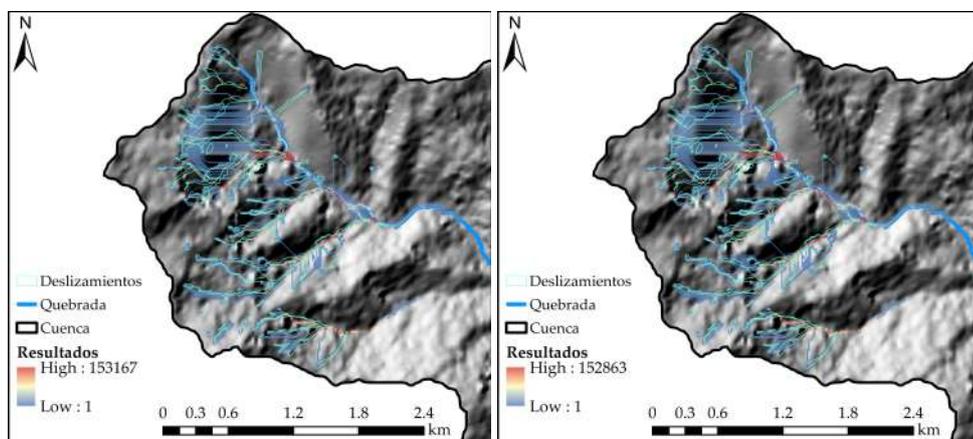
FIGURA C.12: Modelo 23 y Modelo 24 GPP-SAGA GIS



(A) 25

(B) 26

FIGURA C.13: Modelo 25 y Modelo 26 GPP-SAGA GIS



(A) 27

(B) 28

FIGURA C.14: Modelo 27 y Modelo 28 GPP-SAGA GIS

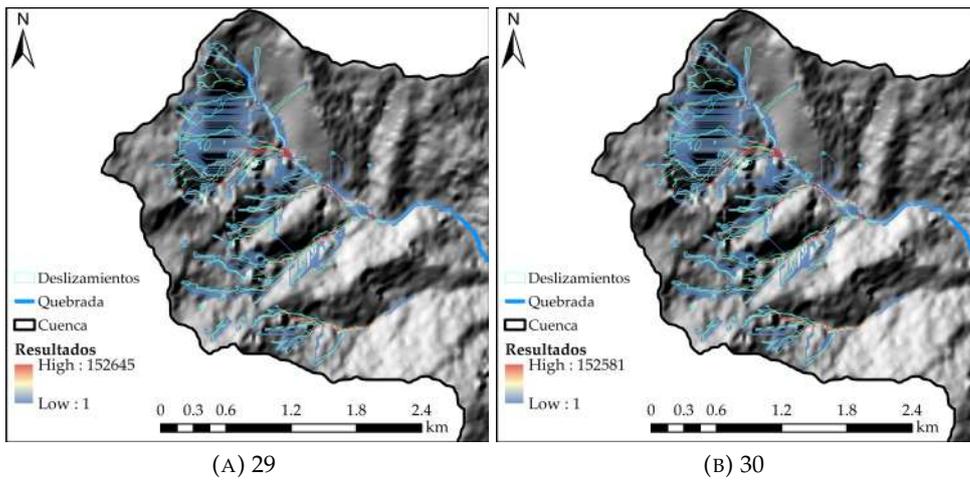


FIGURA C.15: Modelo 29 y Modelo 30 GPP-SAGA GIS

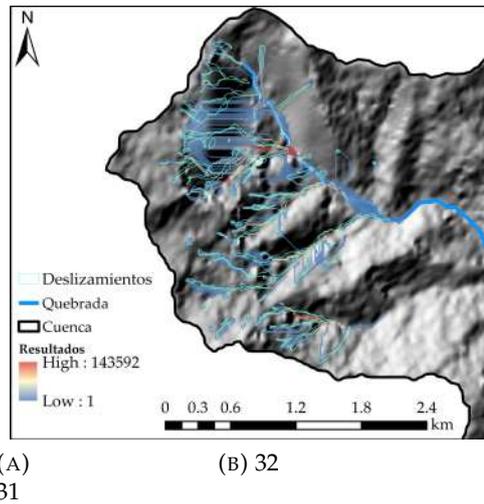


FIGURA C.16: Modelo 31 y Modelo 32 GPP-SAGA GIS

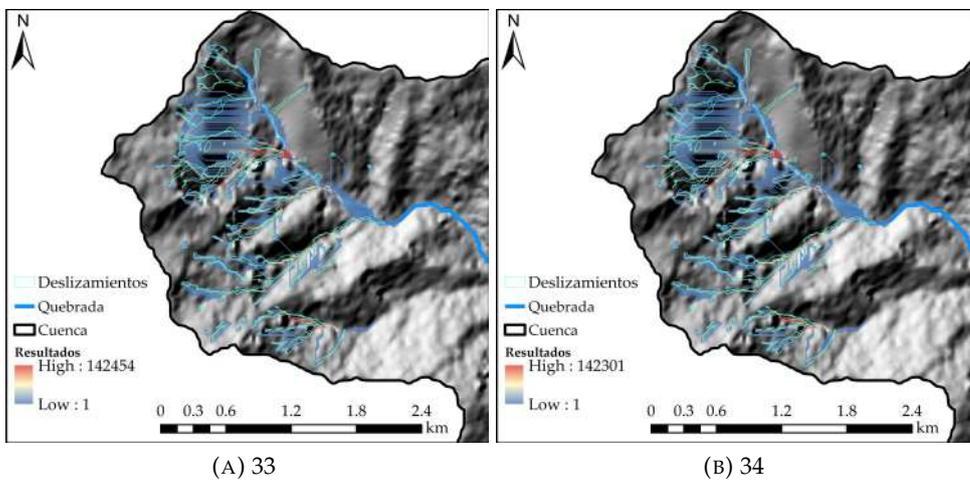


FIGURA C.17: Modelo 33 y Modelo 34 GPP-SAGA GIS

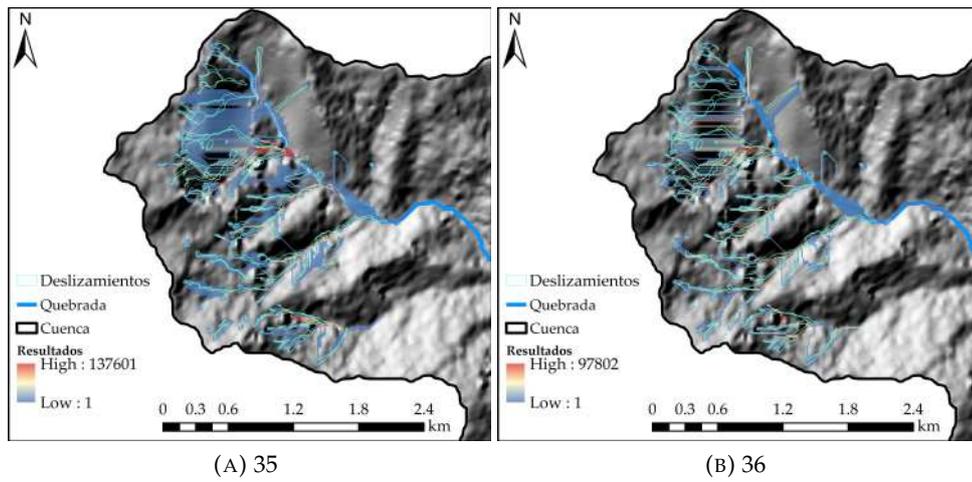


FIGURA C.18: Modelo 35 y Modelo 37 GPP-SAGA GIS

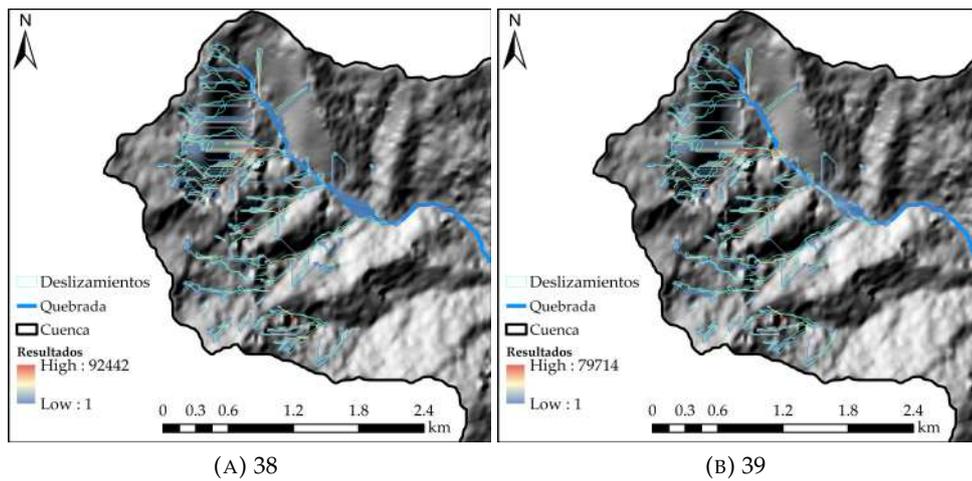


FIGURA C.19: Modelo 38 y Modelo 39 GPP-SAGA GIS

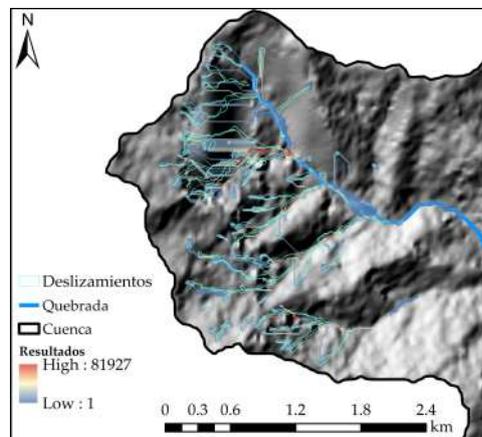


FIGURA C.20: Modelo 40 GPP-SAGA GIS

Bibliografía

- Aristizábal, Edier et al. (2019). «Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal, y magnitud». En: *Boletín de Geología* 41.3, págs. 85-105. ISSN: 0120-0283. DOI: [10.18273/REVBOL.V41N3-2019004](https://doi.org/10.18273/REVBOL.V41N3-2019004). URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832019000300085&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Bessette-Kirton, Erin K. et al. (2020). «Mobility characteristics of debris slides and flows triggered by Hurricane Maria in Puerto Rico». En: *Landslides* 17.12, págs. 2795-2809. ISSN: 16125118. DOI: [10.1007/s10346-020-01445-z](https://doi.org/10.1007/s10346-020-01445-z). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-020-01445-z>.
- Botero, Eduardo Montoya (Universidade de Brasília) (2018). «Tese de doutorado em geotecnia publicação: g. td-141/18 brasília / df: junho/2018». En: pág. 98.
- Cabral, V., V. Reis y V. et al. Veloso (2022). «The consequences of debris flows in Brazil: a historical analysis based on recorded events in the last 100 years». En: *Landslides* 20.3, págs. 511-529. DOI: [10.1029/97RG00426](https://doi.org/10.1029/97RG00426);
- Carvajal, Hernán Eduardo Martínez et al. (2018). «A mathematical approach for assessing landslide vulnerability». En: *Earth Sciences Research Journal* 22.4, págs. 251-273. ISSN: 17946190. DOI: [10.15446/esrj.v22n4.68553](https://doi.org/10.15446/esrj.v22n4.68553).
- Cesca, M. y V. D'Agostino (2008). «Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: A case study in the Dolomites». En: *WIT Transactions on Engineering Sciences* 60, págs. 197-206. ISSN: 17433533. DOI: [10.2495/DEB080201](https://doi.org/10.2495/DEB080201).
- Christen, Marc et al. (2012). «Integral Hazard Management Using a Unified Software Environment Numerical Simulation Tool RAMMS»». En: *Congress Interpraevent* March 2015, págs. 77-86.
- Cruden, David M y Davidj Varnes (ene. de 1991). «Chapter 3 Landslide types and processes». En: *Review of Scientific Instruments* 62.1.
- Díaz-Salas, Abelardo M., Edilberto Guevara-Pérez y James D. Vidal-Moren (2021). «Modelamiento numérico de un flujo de escombros asociado a una rotura de presa en la subcuenca Quillcay, Áncash, Perú». En: *Revista Ingeniería UC* 28.1, págs. 35-46. ISSN: 1316-6832. DOI: [10.54139/revinguc.v28i1.4](https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.4).
- Fairfield, John y Pierre Leymarie (1991). «Drainage networks from grid digital elevation models». En: *Water Resources Research* 27.5, págs. 709-717. ISSN: 19447973. DOI: [10.1029/90WR02658](https://doi.org/10.1029/90WR02658).
- Fallis, A.G (2013). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Vol. 53. 9, págs. 1689-1699. ISBN: 9788578110796. DOI: [10.1017/CB09781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004). arXiv: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- Franco-Ramos, Osvaldo et al. (2020). «Modelling the 2012 Lahar in a Sector of Jampapa Gorge (Pico de Orizaba Volcano, Mexico) Using RAMMS and Tree-Ring Evidence». En: *Journal of Water*, pág. 333. DOI: [10.3390/w12020333](https://doi.org/10.3390/w12020333). URL: www.mdpi.com/journal/water.

- Frank, F. et al. (2015). «The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss Alps». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15.11, págs. 2569-2583. ISSN: 16849981. DOI: [10.5194/nhess-15-2569-2015](https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015).
- Goetz, Jason et al. (2021). «Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21.8, págs. 2543-2562. ISSN: 16849981. DOI: [10.5194/nhess-21-2543-2021](https://doi.org/10.5194/nhess-21-2543-2021).
- Heim, Albert (s.f.). *Bergsturz und Menschenleben*. URL: https://books.google.com.co/books/about/Bergsturz_und_Menschenleben.html?id=7GkhAQAMAAMJ&redir_esc=y (visitado 16-04-2023).
- Hidalgo, Cesar Augusto y Johnny Alexander Vega (2021). «Probabilistic landslide risk assessment in water supply basins: La Liboriana River Basin (Salgar-Colombia)». En: *Natural Hazards* 109.1, págs. 273-301. ISSN: 15730840. DOI: [10.1007/s11069-021-04836-0](https://doi.org/10.1007/s11069-021-04836-0). URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04836-0>.
- Highland, Lynn M (dic. de 2008). «Introduction The Landslide Handbook-A Guide to Understanding Landslides». En: 1.12, págs. 4477-4479. URL: <http://landslides.usgs.gov/>.
- Holmgren, Peter (1994). «Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation». En: *Hydrological Processes* 8.4, págs. 327-334. ISSN: 10991085. DOI: [10.1002/hyp.3360080405](https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405).
- Horton, P. et al. (2013). «Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13.4, págs. 869-885. ISSN: 16849981. DOI: [10.5194/nhess-13-869-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013).
- Hoyos, Carlos D. et al. (2019). «Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: Lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19.11, págs. 2635-2665. ISSN: 16849981. DOI: [10.5194/nhess-19-2635-2019](https://doi.org/10.5194/nhess-19-2635-2019).
- Hungr, O., J. Corominas y E. Eberhardt (2005). «State of the Art Paper 4, Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity». En: *Landslide Risk Management*, págs. 99-128.
- Hurtado, Maria Isabel (2020). «Comparison of geometric and experimental models (laboratory) for the assessment of the runout and deposition height of a debris flow in cohesive soils». En.
- Hussin, H. Y. et al. (2012). «Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: A case study of the Faucon catchment, Southern French Alps». En: *Natural Hazards and Earth System Science* 12.10, págs. 3075-3090. ISSN: 15618633. DOI: [10.5194/nhess-12-3075-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-3075-2012).
- Iverson, R.M. (1997). «The Physics of Debris Flows». En: *Reviews of Geophysics* 35.3, págs. 245-296. DOI: [10.1029/97RG00426](https://doi.org/10.1029/97RG00426);
- KRUŠIĆ, J. et al. (2018). «Preliminary results of numerical modelling of debris flow - case study Leva reka, Serbia». En: *Ce/Papers* 2.2-3, págs. 707-712. DOI: [10.1002/cepa.753](https://doi.org/10.1002/cepa.753).
- Mancarella, Davide y Oldrich Hungr (2010). «Analysis of run-up of granular avalanches against steep, adverse slopes and protective barriers». En: <https://doi.org/10.1139/T09-143> 47.8, págs. 827-841. ISSN: 00083674. DOI: [10.1139/T09-143](https://doi.org/10.1139/T09-143). URL: <https://cdnscepub.com/doi/10.1139/T09-143>.
- Marin, Roberto J., María Fernanda Velásquez y Oscar Sánchez (2021). «Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide

- modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes». En: *Journal of South American Earth Sciences* 108. ISSN: 08959811. DOI: [10.1016/J.JSAMES.2021.103175](https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103175).
- McDougall, Scott (2017). «2014 canadian geotechnical colloquium: Landslide runout analysis — current practice and challenges». En: *Canadian Geotechnical Journal* 54.5, págs. 605-620. ISSN: 12086010. DOI: [10.1139/cgj-2016-0104](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0104).
- Mckinnon, Mika, Oldrich Hungr y Scott Mcdougall (2008). «Dynamic analyses of canadian landslides». En: .
- Muñoz, Antonio Andres (2018). «Metodología Para Evaluar La Amenaza De Flujos De Detritos Utilizando Un Análisis Jerárquico De Procesos Y El Software Ramms, Con Aplicación En La Cuenca Del Estero San Alfonso, Región Metropolitana». En: pág. 175. URL: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152982>.
- O'Callaghan, J. F. y D. M. Mark (1984). «The extraction of drainage networks from digital elevation data.» En: *Computer Vision, Graphics, Image Processing* 28.3, págs. 323-344. ISSN: 0734189X. DOI: [10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0).
- Ortiz, Laura y Johnny Alexander Vega (2021). «hídrica para abastecimiento de comunidades y generación hidroeléctrica . Caso aplicado a la obstrucción de fuentes hídricas por ocurrencia de movimientos en masa Agradecimientos». En: .
- Pastor, M. et al. (2009). «Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by them in fjords, lakes and reservoirs». En: *Engineering Geology* 109.1-2, págs. 124-134. ISSN: 0013-7952. DOI: [10.1016/J.ENGGEOL.2008.10.006](https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2008.10.006).
- Pastorello, Roberta, Tamara Micheline y Vincenzo D'Agostino (2017). «On the criteria to create a susceptibility map to debris flow at a regional scale using Flow-R». En: *Journal of Mountain Science* 14.4, págs. 621-635. ISSN: 16726316. DOI: [10.1007/s11629-016-4077-1](https://doi.org/10.1007/s11629-016-4077-1).
- Picarelli, L. et al. (2008). «Mechanical aspects of flow-like movements in granular and fine grained soils». En: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 41.1, págs. 179-197. ISSN: 07232632. DOI: [10.1007/s00603-007-0135-x](https://doi.org/10.1007/s00603-007-0135-x).
- Pradhan, A. M.S. e Y. T. Kim (2016). «Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping». En: *Catena* 140, págs. 125-139. ISSN: 03418162. DOI: [10.1016/J.CATENA.2016.01.022](https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.01.022).
- Pudasaini, Shiva P. y Michel Jaboyedoff (2020). «A general analytical model for super-elevation in landslide». En: *Landslides* 17.6, págs. 1377-1392. ISSN: 16125118. DOI: [10.1007/s10346-019-01333-1](https://doi.org/10.1007/s10346-019-01333-1).
- Putra, Moch Hilmi Zaenal et al. (2022). «Modeling of individual debris flows based on DEMNAS using Flow-R: A case study in Sigi, Central Sulawesi». En: *RISSET Geologi dan Pertambangan* 32.1, págs. 37-58. DOI: [10.14203/risetgeotam2022.v32.1215](https://doi.org/10.14203/risetgeotam2022.v32.1215).
- Quinn, P. et al. (1991). «The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models». En: *Hydrological Processes* 5.1, págs. 59-79. ISSN: 1099-1085. DOI: [10.1002/HYP.3360050106](https://doi.org/10.1002/HYP.3360050106). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.3360050106><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.3360050106><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.3360050106>.
- Ritter, Axel y Rafael Muñoz Carpena (2013). «Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments». En: *Journal of Hydrology* 480, págs. 33-45. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004).
- Rocío Del Valle Benavides, Ana, Juan Manuel y Muñoz Pichardo (s.f.). «Curvas ROC (Receiver-Operating-Characteristic) y sus aplicaciones». En: ()).

- Ruiz-Vásquez, Diana y Edier Aristizábal (2018). «Landslide susceptibility assessment in mountainous and tropical scarce-data regions using remote sensing data: a case study in the Colombian Andes». En: *Geophysical Research Abstracts*. EGU2018-3408, EGU General Assembly 2018 20.June.
- Schneider, D. et al. (2014). «Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru». En: *Advances in Geosciences* 35, págs. 145-155. ISSN: 16807340. DOI: [10.5194/ADGEO-35-145-2014](https://doi.org/10.5194/ADGEO-35-145-2014).
- Sepúlveda, S. A. y D. N. Petley (2015). «Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15.8, págs. 1821-1833. ISSN: 16849981. DOI: [10.5194/nhess-15-1821-2015](https://doi.org/10.5194/nhess-15-1821-2015).
- Simoni, Alessandro, Maria Mammoliti y Cristoph Graf (2012). «Performance of 2D debris flow simulation model RAMMS. Back-analysis of field events in Italian Alps.» En: March 2016. DOI: [10.5176/2251-3361_geos12.59](https://doi.org/10.5176/2251-3361_geos12.59).
- Stamatopoulos, Constantine A., Constantine Mavromihalis y Sarada Sarma (2011). «Correction for Geometry Changes during Motion of Sliding-Block Seismic Displacement». En: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137.10, págs. 926-938. ISSN: 1090-0241. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000514).
- Takebayashi, Hiroshi y Masaharu Fujita (2020). «Numerical simulation of a debris flow on the basis of a two-dimensional continuum body model». En: *Geosciences (Switzerland)* 10.2. ISSN: 20763263. DOI: [10.3390/geosciences10020045](https://doi.org/10.3390/geosciences10020045).
- Tarboron, G (1997). «T». En: 33.2, págs. 309-319.
- Varnes, D (1978). «Slope Movement Types and Processes». En: *Special report* 176, págs. 11-33.
- Vega, Johnny Alexander y César Augusto Hidalgo (2019). «Methodology for landslides assessment causing river channel obstructions and the consequent water shortage in rural communities». En.
- Vega, Johnny Alexander, Nini Johanna Marin y Maria Isabel Hurtado (2021). «Métodos para la evaluación de pérdidas económicas relacionadas deslizamientos y avalanchas, y su incorporación en la gestión del riesgo». En: *Seminario Vulnerabilidad, resiliencia y riesgo de desastres*.
- Velásquez, Nicolás et al. (2020). «Reconstructing the 2015 Salgar flash flood using radar retrievals and a conceptual modeling framework in an ungauged basin». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 24.3, págs. 1367-1392. ISSN: 16077938. DOI: [10.5194/hess-24-1367-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-1367-2020).
- Wang, Jiajia, Steven N. Ward y Lili Xiao (2015). «Numerical simulation of the December 4, 2007 landslide-generated tsunami in Chehalis Lake, Canada». En: *Geophysical Journal International* 201.1, págs. 372-376. ISSN: 0956-540X. DOI: [10.1093/GJI/GGV026](https://doi.org/10.1093/GJI/GGV026). URL: <https://academic.oup.com/gji/article/201/1/372/734500>.
- Whittall, John, Erik Eberhardt y Scott McDougall (2017). «Runout analysis and mobility observations for large open pit slope failures». En: *Canadian Geotechnical Journal* 54.3, págs. 373-391. ISSN: 12086010. DOI: [10.1139/cgj-2016-0255](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0255).
- Wichmann, Volker (2017). «The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0)-a GIS-based simulation framework for gravitational processes». En: *Geosci. Model Dev* 10, págs. 3309-3327. DOI: [10.5194/gmd-10-3309-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-3309-2017). URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3309-2017>.
- Willenberg, Heike et al. (2009). «Hazard assessment and runout analysis for an unstable rock slope above an industrial site in the Riviera valley, Switzerland». En: *Landslides* 6.2, págs. 111-119. ISSN: 16125118. DOI: [10.1007/s10346-009-0146-7](https://doi.org/10.1007/s10346-009-0146-7).
- Xu, Huang et al. (2022). «Susceptibility areas identification and risk assessment of debris flow using the Flow-R model: a case study of Basu County of Tibet». En:

- Geoenvironmental Disasters* 9.1. ISSN: 21978670. DOI: [10.1186/s40677-022-00216-3](https://doi.org/10.1186/s40677-022-00216-3). URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00216-3>.
- Yavari-Ramshe, S. y B. Ataie-Ashtiani (2017). «A rigorous finite volume model to simulate subaerial and submarine landslide-generated waves». En: *Landslides* 14.1, págs. 203-221. ISSN: 16125118. DOI: [10.1007/S10346-015-0662-6](https://doi.org/10.1007/S10346-015-0662-6)/FIGURES/13. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-015-0662-6>.
- Ye, Tianhao et al. (2023). «applied sciences Analysis on the Spatial-Temporal Distribution Patterns of Major Mine Debris Flows in China». En.