







Correlación de variables morfométricas para deslizamientos en la cuenca del río Combeima, Colombia

 Gabriel Santa-Ramírez¹,  Juan Cuevas-González²,
 Julián Leal-Villamíl³ y  Jader Muñoz-Ramos⁴

Recepción: 22-10-2019 | Aceptación: 11-03-2020 | En línea: 18-06-2020

PACS: 92.40.Pb, 42.68.Wt

doi: 10.17230/ingciencia.16.31.7

Resumen

En la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia), se desarrolló un estudio con el fin de estimar las variables morfométricas de los deslizamientos encontrados y obtener posibles correlaciones estadísticas entre ellas. Para obtener las características morfométricas de los deslizamientos se empleó una base de datos con deslizamientos históricos, una imagen *RapidEye* del año 2010 y un ortofotomosaico del año 2009, en donde se identificaron visualmente los deslizamientos. Las características morfométricas fueron definidas a través de un sistema de información geográfico y se realizaron análisis bivariados entre las variables morfométricas para establecer sus correlaciones. Los resultados permitieron identificar 121 deslizamientos, con área promedio de $1,974.97 m^2$ y distribución tipo Birnbaum-Saunders. Se

¹ Universidad del Tolima, gasanta@ut.edu.co, Ibagué, Colombia.

² Universidad del Tolima, jpcuevas@ut.edu.co, Ibagué, Colombia.

³ Universidad del Tolima, jlealv@ut.edu.co, Ibagué, Colombia.

⁴ Universidad del Tolima, jmunozra@ut.edu.co, Ibagué, Colombia.

encontró que la variable morfométrica área de deslizamiento se correlaciona con la longitud total ($R^2=0.9414$), la longitud de línea central ($R^2=0.9368$) y el ancho de la superficie de ruptura ($R^2=0.8915$) de este, y podría usarse para inferir el volumen de la masa involucrada en el evento y sus efectos potenciales. Este resultado permitiría usar el área de los deslizamientos como apoyo en la toma de decisión en la planificación del territorio en la cuenca del río Combeima.

Palabras clave: Deslizamientos; morfometría; sensoramiento remoto; SIG; río Combeima.

Correlation of Morphometric Variables for Landslides in the Combeima River Basin, Colombia

Abstract

This study was carried out in order to estimate the morphometric variables of the landslides found in Combeima river basin (Tolima, Colombia) and obtain possible statistical correlations. To obtain the morphometric characteristics of the landslides, we used a database with historical landslides, a RapidEye image from 2010 and an orthophotomosaic from 2009, where the landslides were visually identified. The morphometric characteristics were defined through a geographic information system and bivariate analyzes were ran between the morphometric variables to establish their correlations. The results allowed to identify 121 landslides, with an average area of $1,974.97 m^2$ and Birnbaum-Saunders type distribution. It was found that the slip area morphometric variable correlates with the total length ($R^2=0.9414$), the length of the center line ($R^2=0.9368$) and the width of the surface of rupture of this ($R^2=0.8915$). These data could be used to infer the volume of the mass involved in the event and its potential effects. This result would allow the landslide area to be used as support in decision-making in the planning of the territory in the Combeima river basin.

Keywords: Landslides; morphometry; remote sensing; GIS; Combeima.

1 Introducción

Los deslizamientos se definen como el movimiento descendente de suelos, rocas y materiales orgánicos bajo el efecto de la gravedad [1], que puede ocasionar daños severos a los ecosistemas e infraestructura y afectar, directa

o indirectamente, la economía de los países [2],[3],[4], hecho que los coloca entre los riesgos naturales con mayor número esperado de pérdidas humanas [5].

Según [6], los deslizamientos corresponden a una de las tipologías de movimientos en masa y, debido a su forma, se dividen en dos subtipos: i) deslizamientos traslacionales, que son movimientos a través de una superficie de falla plana o semi ondulada en la ladera, y ii) deslizamientos rotacionales, que son movimientos a lo largo de una superficie de falla curva o cóncava. A su vez, los deslizamientos pueden ser catalogados como movimientos complejos cuando se combinan con una o más tipologías de movimientos en masa.

Debido a su ocurrencia en la superficie terrestre, los deslizamientos poseen dimensiones espaciales (Figura 1 y Tabla 1), denominadas características morfométricas, o morfometría [6], consideradas atributos dinámicos, dado que pueden variar en el tiempo y amerita esfuerzos para su descripción temporal [7]. La evaluación cuantitativa de la morfometría permite establecer la incidencia del deslizamiento en el área de interés, y es insumo clave para su conocimiento y posterior manejo del riesgo asociado [8].

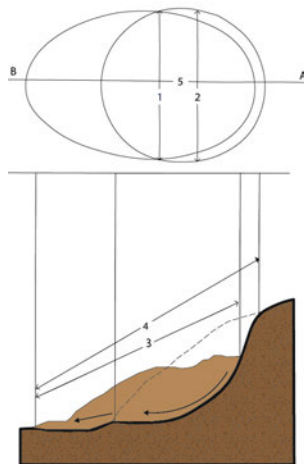


Figura 1: Características morfométricas de los deslizamientos Fuente: Modificado [6].

Tabla 1: Definición de las características morfométricas de los deslizamientos. Fuente: modificado de [6].

No	Nombre	Símbolo	Definición
1	Ancho de la masa desplazada	<i>Wd</i>	Ancho máximo de la masa desplazada perpendicular a la longitud de la masa desplazada.
2	Ancho de la superficie de ruptura	<i>Wr</i>	Ancho máximo entre costados del deslizamiento de tierra perpendicular a la longitud de la superficie de ruptura.
3	Longitud de la masa desplazada	<i>Ld</i>	Distancia mínima desde la punta al inicio.
4	Longitud total	<i>Lt</i>	Distancia mínima desde la punta del deslizamiento a la corona.
5	Longitud de la línea central		Distancia desde la coronilla hasta la punta del deslizamiento a través de puntos de la superficie original del terreno equidistante de los márgenes laterales de la superficie de rotura y material desplazado.

La caracterización y análisis de las variables morfométricas de los deslizamientos han sido el objeto principal de la investigación en algunos estudios al nivel mundial [9],[10],[11],[12],[13] o el objeto de análisis como subproducto de los inventarios de deslizamientos [14],[15],[16],[17], en otros. [18],[19],[20] realizaron inventarios de deslizamientos y análisis de variables morfométricas mediante el uso de imágenes de sensores remotos, y destacaron la importancia de las características de los productos de la percepción remota en la obtención de mayor o menor detalle en los rasgos morfométricos de los deslizamientos. No obstante, las características morfométricas se pueden estimar también a través de modelos regresivos [21].

En Colombia existen algunos estudios referentes a la morfometría de deslizamientos, entre los cuales se destacan el desarrollado por [22], quienes recopilaron datos morfométricos para el estudio de las propiedades estadísticas de un inventario de deslizamientos en la ciudad de Medellín, y la

base de datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano [23], en la cual se brindan algunas características morfométricas de deslizamientos presentados en el país.

A nivel local, en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) se han estudiado los deslizamientos desde el punto de vista de la evaluación de la susceptibilidad del territorio ante la ocurrencia de los eventos [24],[25], o el análisis de taludes inestables [26], pero la mayoría han estado orientados, principalmente, a establecer inventarios de movimientos en masa [23],[25],[26],[27],[28],[29],[30]. Esta situación ha dificultado abordar adecuadamente el comportamiento de los deslizamientos, hecho que impide, a su vez, una evaluación detallada de sus características morfométricas.

Por lo anterior, se planteó la presente investigación, con el objeto de estimar, mediante el uso de la geomática, las variables morfométricas de los deslizamientos reportados en la base de datos compilada por [30] para la cuenca del río Combeima, durante el período comprendido entre los años 1999-2015, y obtener posibles relaciones matemáticas entre las variables morfométricas estimadas.

2 Metodología

2.1 Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Combeima se encuentra en el municipio de Ibagué (departamento de Tolima, Colombia). Se ubica entre las coordenadas geográficas $04^{\circ}19'30''$ y $04^{\circ}39'57''$, de latitud Norte, y $75^{\circ}10'11''$ y $75^{\circ}23'23''$, de longitud Oeste, con una extensión de 27,186 ha y una longitud de su cauce principal de 57.7 km, desde su nacimiento en el Nevado del Tolima hasta su desembocadura en el río Coello (Figura 2). La cuenca presenta elevaciones que van desde los 700 hasta los 5,200 m de altitud, precipitación media anual de 1,800 mm y una temperatura promedia anual alrededor de 14°C [31],[32].

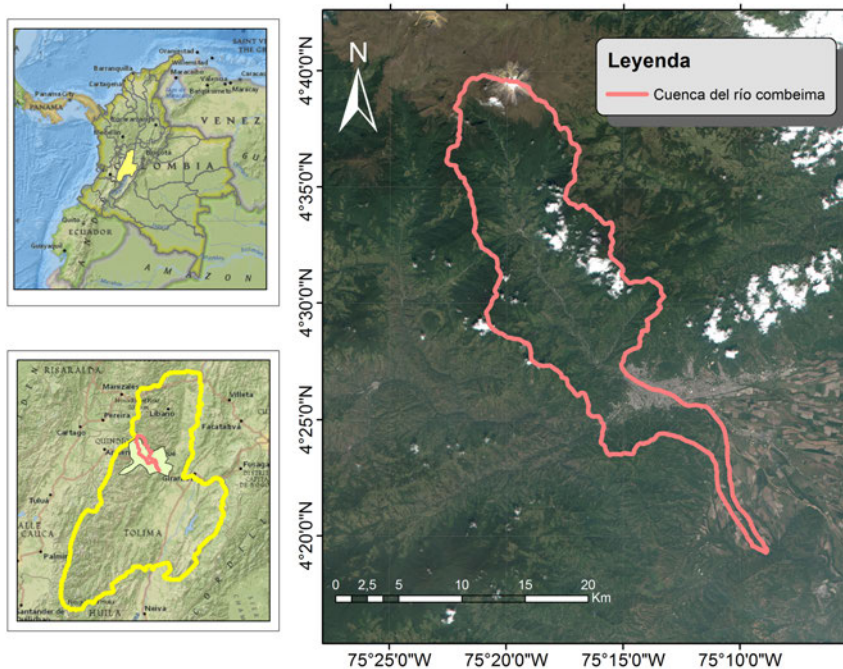


Figura 2: Localización del área de estudio.

2.2 Datos empleados

Se empleó una base de datos de deslizamientos históricos en la cuenca del Combeima [30], la cual contiene registros de deslizamientos entre los años 1999 – 2015. Así mismo, se utilizó la cartografía digital del límite de la cuenca a escala 1:25,000 [31]. Se emplearon dos imágenes satelitales, una imagen RapidEye del 2010, con resolución espacial de 7 m [33], y una ortofoto del año 2009, con resolución espacial de 0.15 m, obtenida a través de servicios WMS [34] (Tabla 2). La información altimétrica de la cuenca hidrográfica fue obtenida de un modelo de elevación digital (MED) ALOS-Palsar de 12.5 m de resolución espacial [35], El MDE fue ajustado al límite de la cuenca empleado en el presente estudio¹.

¹Disponible gratuitamente en: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

Tabla 2: Características generales de las imágenes empleadas en este estudio.

Elemento	Imagen RapidEye	Ortofotomosaico Ibagué
Código de escena	4,03012E+14	Ortofotomosaico: IBAGUÉ-1 _ 2000-UD- 2009
Fecha	4/01/2010	2009
Porcentaje de cobertura nubosa	17 %	0 %
Elevación	5.928.265	N/A
Azimut Solar	15.676.732	N/A
Datum	MAGNA SIRGAS Bogotá	WGS84
Elipsoide	Transverse Mercator	WGS84
Zona UTM	18	18
Resolución espacial	7 m x 7 m	0.15 m x 0.15 m
Número de Bandas	5	1
Coordenada SE producto	(927067.500, 893800.500)	(4.485868, -75.098906)
Coordenada NW producto	(816110.500, 1073854.500)	(4.373998, -75.289398)



(a) RapidEye



(b) Ortofotomosaico

Figura 3: Previsualización de las imágenes de sensores remotos.

2.3 Métodos

Se estableció el sistema de referencia MAGNA Sirgas Bogotá (EPSG 3116) para toda la información cartográfica del estudio. Los deslizamientos conte-

nidos en la base de datos elaborada por [30] fueron localizados espacialmente sobre las imágenes empleadas, con objeto de verificar la visualización de los mismos en dichos productos. Se tomaron como objeto de estudio aquellos que presentaran visualización de su contorno en las imágenes empleadas, a los cuales se les realizó una interpretación visual según los criterios propuestos por [36].

Adicionalmente, se elaboraron composiciones en color real (bandas 321) y en falso color (bandas 531, 532, 135) sobre el producto multispectral (RapidEye), como apoyo para la diferenciación de la forma de los deslizamientos [37], y se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) propuesto por [38], que es de fácil aplicación y produce resultados objetivos como apoyo en la interpretación visual de los deslizamientos [30]. Para establecer la orientación correcta de los deslizamientos respecto a la pendiente del terreno, se usó el MED para generar un modelo de iluminación y sombreado (MIS) de la cuenca que facilitara esta labor, tal como recomienda [36].

A cada deslizamiento objeto de estudio se le identificaron sus características morfométricas, según las directrices propuestas por [6], y luego se vectorizó, según los criterios expuestos por [39], mediante el uso del software gvSIG 2.3.0 [40], con escalas de trabajo máximas de acuerdo con la resolución espacial de cada imagen (hasta 1:200 para la ortofoto y 1:1000 para la RapidEye).

Las resoluciones espaciales de las imágenes empleadas, y sus correspondientes escalas máxima de vectorización, determinaron que se digitalizaran las variables morfométricas área, perímetro, longitud total, longitud de línea central y ancho de la superficie de ruptura en los deslizamientos visualizados en la imagen RapidEye, y las variables longitud de superficie de ruptura, longitud de la masa desplazada y ancho de la masa desplazada en el ortofotomosaico.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico univariado y bivariado para describir las posibles relaciones matemáticas entre las mismas.

3 Resultados

La verificación visual de los deslizamientos reportados por la base de datos [30] en la imagen RapidEye y el ortofotomosaico, permitió definir 121 deslizamientos como objeto de estudio, 100 de ellos visualizados en el ortofotomosaico y 21 en la imagen RapidEye, los cuales fueron vectorizados con ayuda de las cuatro composiciones de bandas predefinidas (Figura 4).

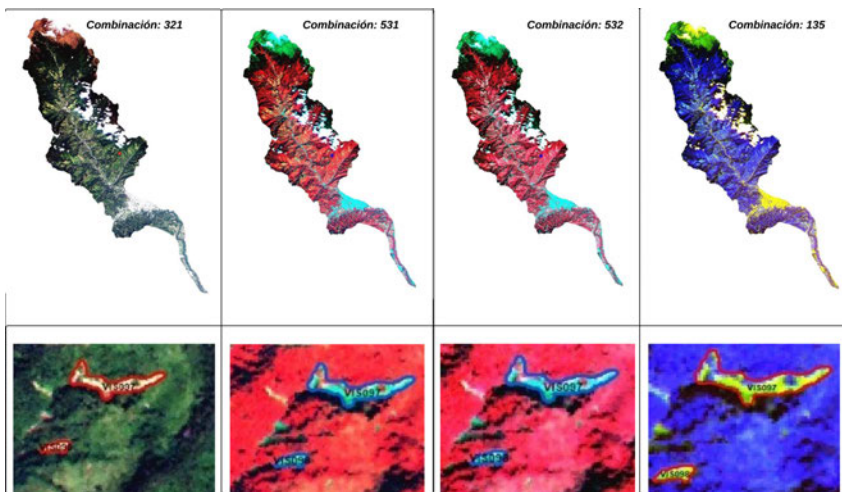


Figura 4: Composiciones de color real (combinación 321) y falso color (combinaciones 531, 532 y 135) empleadas sobre la imagen RapidEye como apoyo a la visualización de los deslizamientos en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) que fueron objeto de estudio.

Durante el control de campo, se encontró que la mayoría de estos deslizamientos eran de tipo rotacional [6].

El cálculo del NDVI para la imagen RapidEye arrojó un valor promedio de 0.17 al interior del área de los deslizamientos objeto de estudio, con mínimo de 0.0052, máximo de 0.38 y desviación estándar de ± 0.085 (Figura 5 y 6).

El MIS de la cuenca, elaborado a partir del MED, permitió orientar los deslizamientos respecto a las laderas, y la ubicación de la corona y punta de cada uno de ellos (Figura 7).

Con los resultados de las composiciones de bandas, el NDVI y el MIS, se vectorizaron las variables morfométricas de cada uno de los deslizamientos seleccionados en los productos de percepción remota (Figura 8), y se procedió al análisis estadístico univariado. La variable A presentó mayor coeficiente de variación (CV), lo que indica una mayor heterogeneidad respecto al resto de variables morfométricas estudiadas, mientras que Ld fue la característica morfométrica con menor CV (Tabla 3).

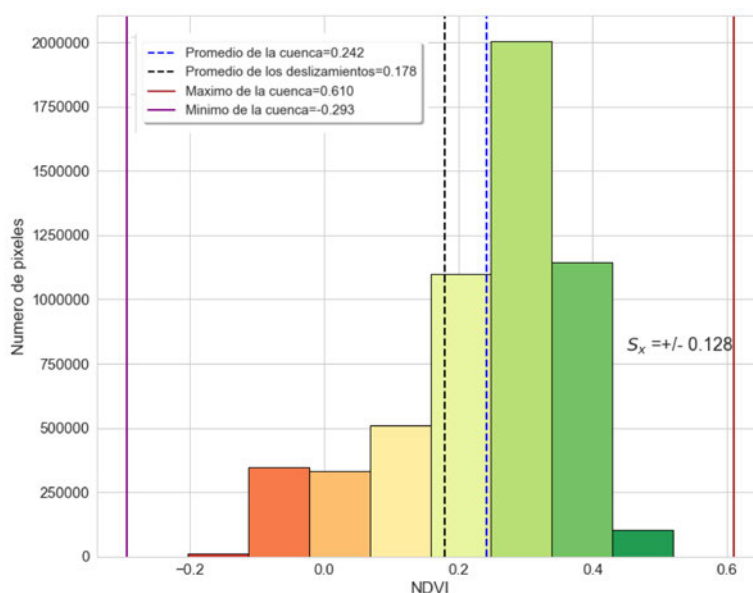


Figura 5: Histograma de frecuencias de los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) calculados sobre la imagen RapidEye para este estudio.

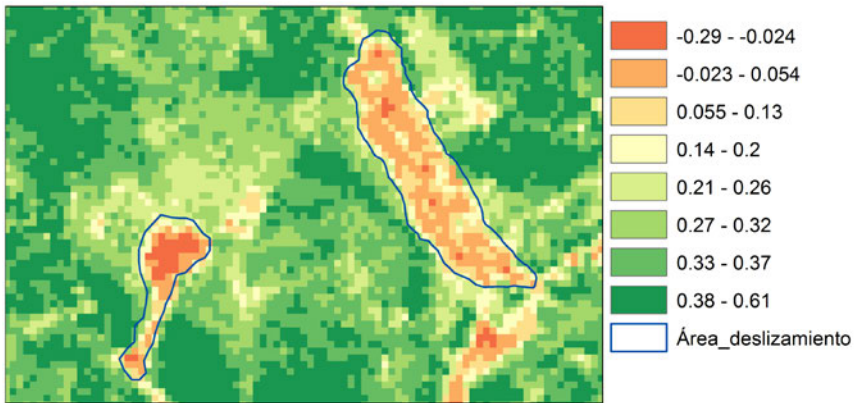


Figura 6: Representación visual del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) calculados sobre la imagen RapidEye para la identificación de los deslizamientos.

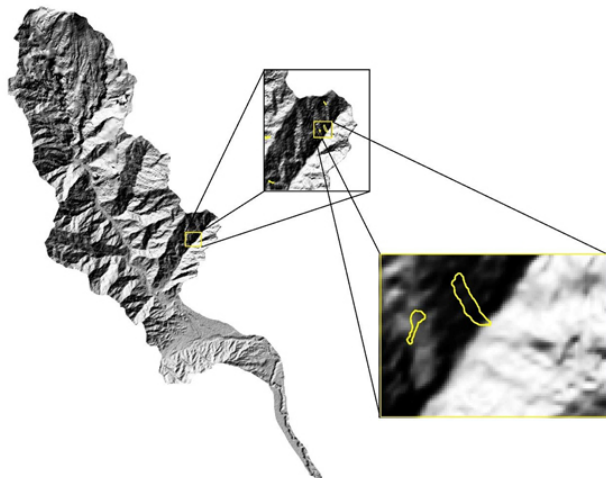


Figura 7: Uso del modelo de iluminación y sombreado (MIS) para definir la orientación correcta de los deslizamientos VIS094 (izquierda) y VIS095 (derecha) respecto a la ladera en la microcuenca cay de la cuenca del río Combeima (departamento de Tolima, Colombia).

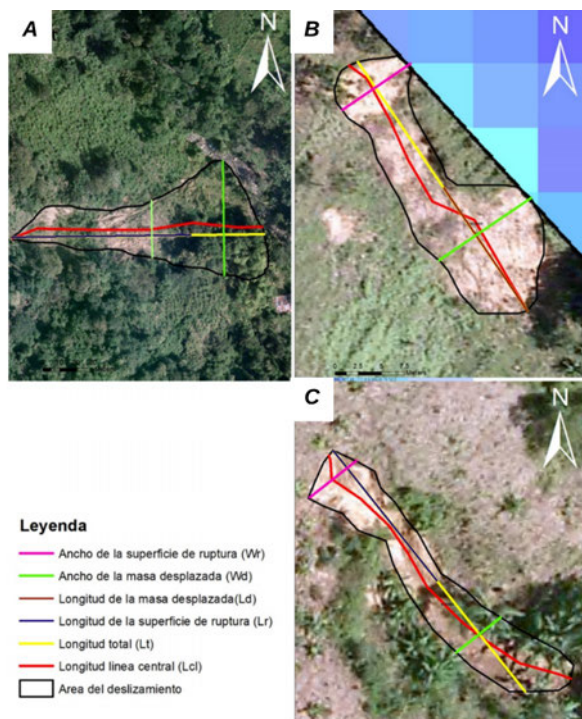


Figura 8: Vectorización de las variables morfométricas de los deslizamientos VIS 057 (a), VIS017 (b) y VIS084 (c), de acuerdo con lo recomendado por [6].

Tabla 3: Análisis estadístico descriptivo de las variables morfométricas caracterizadas para los deslizamientos objeto de estudio en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

Variable morfométrica	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
A (m ²)	1,974.97	6.90	22,248.66	+/- 4,444.37	225.03
P (m)	150.44	10.39	1,006.38	+/- 204.38	135.85
Ld (m)	27.59	13.24	59.95	+/- 21.81	79.05
Lr (m)	45.31	13.6	106.74	+/- 53.21	117.44
Lcl (m)	58.43	2.87	392.00	+/- 83.64	143.15
Lt (m)	56.78	2.41	352.38	+/- 80.56	141.88
Wd (m)	20.52	5.25	68.52	+/- 21.87	106.58
Wr (m)	22.92	3.19	154.11	+/- 25.91	113.05

A: área; P: perímetro; Ld: longitud de la masa desplazada; Lr: longitud de la superficie de ruptura; Lcl: longitud de línea central; Lt: longitud total; Wd: ancho de la masa desplazada; Wr: ancho de la superficie de ruptura.

De acuerdo con los supuestos de normalidad requeridos para la relación matemática tradicional entre variables continuas, las características morfométricas de los deslizamientos correspondieron a una distribución Birnbaum Saunders, la cual es diferente a la distribución normal requerida. En tal sentido, se realizó una transformación de las variables empleando la función logaritmo natural (\ln), con el fin de normalizarlas (Figura 9).

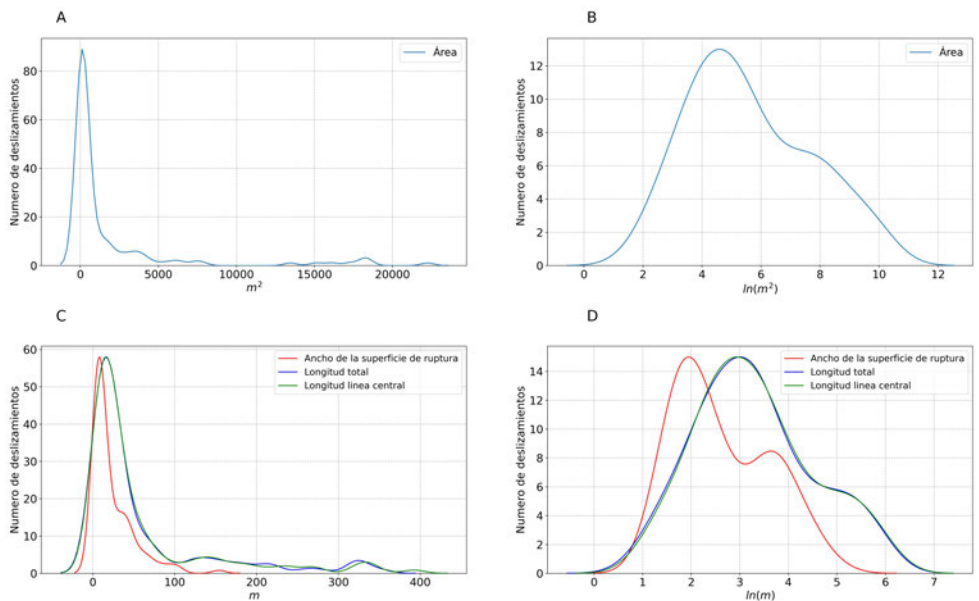


Figura 9: Distribuciones estadísticas Birnbaum Saunders (A-C) y normalizadas (B-D) para las características morfométricas de los deslizamientos objeto de estudio.

El análisis bivariado mostró coeficientes de correlación superiores a 0.90 (95 % de confiabilidad) entre la variable A (m^2) y las variables Lcl (m), Lt (m) y Wr (m), y los coeficientes de correlación más bajos (inferiores a 0.30, con el 95 % de confianza) para la variable P (m) de los deslizamientos (Tabla 4).

Tabla 4: Matriz de correlación para las variables morfométricas normalizadas de los deslizamientos objeto de estudio en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

Variables	ln A (m ²)	ln P (m)	ln Lcl (m)	ln Lt (m)	ln Wr (m)
ln A (m ²)	1	0.252	0.971	0.968	0.944
ln P (m)	0.252	1	0.282	0.284	0.192
ln Lcl (m)	0.971	0.282	1	0.998	0.853
ln Lt (m)	0.968	0.284	0.998	1	0.851
ln Wr (m)	0.944	0.192	0.853	0.851	1

A: área; P: perímetro; Lcl: longitud de línea central; Lt: longitud total;

Wr: ancho de la superficie de ruptura.

En el análisis de bondad de ajuste para múltiples modelos regresivos, se encontró que el modelo de correlación lineal es el que presenta mejor ajuste para la relación entre las variables morfométricas estudiadas. En tal sentido, las ecuaciones (1), (2) y (3) relacionan las características morfométricas de los deslizamientos Wr (m), Lt (m) y Lcl (m) con A (m²), con coeficientes de correlación de 0.94 ($R^2=0.8915$), 0.97 ($R^2=0.9414$) y 0.96 ($R^2=0.9368$), respectivamente (Figura 10).

$$\ln(Wr) = 0,115984 + 0,449975 \cdot \ln(A) \quad (1)$$

$$\ln(Lt) = 0,097652 + 0,569244 \cdot \ln(A) \quad (2)$$

$$\ln(Lcl) = 0,153199 + 0,564547 \cdot \ln(A) \quad (3)$$

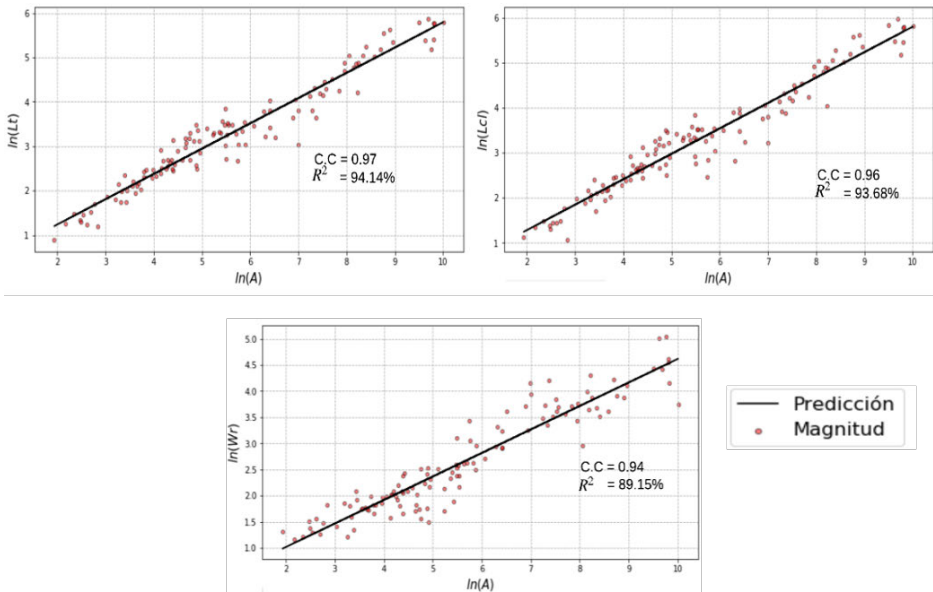


Figura 10: Modelos de regresión obtenidos para las variables morfométricas superficie de ruptura (Wr), longitud total (Lt) y longitud de línea central (Lcl) en función del área (A) de los deslizamientos objeto de estudio en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

4 Discusión

En la identificación visual de los deslizamientos según [36], el apoyo prestado por las composiciones de color verdadero, falso color y NDVI en la imagen RapidEye jugó un papel importante, lo cual es consecuente con las conclusiones brindadas por otros autores [41],[42],[43],[44], al igual que la resolución espacial de las imágenes, hecho coherente con las afirmaciones realizadas por [45],[46],[47]. Cabe señalar que, si bien la resolución espacial de las imágenes es un factor altamente influyente para la delimitación de los deslizamientos, una menor resolución espacial puede ser compensada con una mayor resolución espectral, que brinda la posibilidad de emplear otras técnicas como el NDVI y las composiciones de bandas para complementar su análisis.

Otro aspecto que facilitó el reconocimiento de las características morfométricas de los deslizamientos fue la visualización tridimensional del terreno, lo cual concuerda con [48]. Si bien, [49],[50],[51],[10],[52] destacan que el método de análisis estereoscópico de fotografías aéreas ha sido altamente efectivo para visualizar la orientación de las laderas y las formas del terreno en estudios relacionados con deslizamientos, el proceso adelantado en el estudio permitió exponer que la generación de los MIS a partir de los MED puede reemplazar este método, con mayores facilidades en la interpretación de las formas del terreno.

El carácter dinámico de los deslizamientos puede alterar su componente espacial a través del tiempo. De allí la necesidad de tener en cuenta también la temporalidad de las imágenes satelitales. En tal sentido, [53] resaltan la importancia de la temporalidad y el monitoreo constante que se debe realizar a los deslizamientos, en procura de que los datos representan la realidad de manera más fiel.

Existe una tendencia a correlacionar la distribución espacial de los deslizamientos con variables del entorno (pendiente, coberturas vegetales, unidades geológicas, unidades edáficas, entre otras), de modo tal que se expresen relaciones de causalidad que permitan generar funciones o zonificaciones de susceptibilidad en el territorio [25],[29],[30]. Sin embargo, son escasas las investigaciones que abordan las posibles correlaciones entre las variables morfométricas de los deslizamientos como base para toma de decisión.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que, de acuerdo con la extensión del territorio, a medida que esta se incrementa, decrece la frecuencia de deslizamientos con A pequeñas, en proporción a dicho aumento. Observaciones similares fueron reportadas por [17],[18],[21],[54],[55],[56].

Si se asocian las correlaciones obtenidas con el tipo de movimientos encontrados, principalmente de tipo rotacional, se puede decir que, a mayor A (m^2), se tendrán mayores W_r (m), L_t (m) y L_{cl} (m) y, con ello, mayor profundidad de la afección y mayor volumen de material en movimiento. Este aspecto es particularmente importante a la hora de planificar el uso del territorio. En efecto, algunos autores consideran el volumen de la masa en movimiento uno de los factores más importantes que controlan la distancia que alcanzará y los posibles daños sobre objetos en riesgo (obras de infraestructura, edificaciones, vías, entre otros) que tendrá un desliza-

miento [57],[58],[59], de allí la importancia de caracterizar el volumen del deslizamiento, entre otros, para poder entender su comportamiento y efectos potenciales [60].

Ello torna el estudio de las características morfométricas complementario a los estudios previos en la cuenca del río Combeima, que fueron enfocados a evaluar la susceptibilidad del territorio a la ocurrencia de deslizamientos [25],[29], el análisis de taludes inestables [26] y el inventario de deslizamientos [31],[41].

Adicionalmente, las relaciones establecidas entre las variables morfométricas fueron planteadas desde la perspectiva clásica de la correlación estadística, sin descartar la posibilidad de usar otras metodologías para este fin. Como lo exponen [61], se pueden implementar modelos de redes neuronales, métodos semi automáticos y procesos de jerarquía analítica, entre otros. Esta situación plantea la oportunidad de realizar nuevas investigaciones que permitan implementar estas metodologías novedosas para tener información más detallada y precisa respecto a las relaciones morfométricas de los deslizamientos, lo cual permitirá, a su vez, complementar los datos relacionados por los inventarios de los deslizamientos [39],[52],[62],[63].

5 Conclusiones

La interpretación visual de los deslizamientos en productos de percepción remota, como las imágenes RapidEye y los ortofotomosaicos, brinda la posibilidad de establecer sus características morfométricas de manera eficaz y eficiente, hecho que facilita su estudio en zonas de difícil acceso. Es recomendable que la visualización y posterior vectorización de los deslizamientos se apoye en la resolución espacial y las características espectrales de los productos de percepción remota, las cuales determinan la posibilidad de usar otras herramientas, como las composiciones a falso y verdadero color y los índices espectrales, como el NDVI.

Los deslizamientos evaluados en la cuenca del río Combeima presentaron una amplia variedad de formas y tamaños, con mayor frecuencia de deslizamientos con áreas pequeñas. Sin embargo, las correlaciones encontradas entre el área de los deslizamientos y la longitud total, la longitud de línea central y el ancho de la superficie de ruptura de estos, podría usarse para inferir el volumen de la masa involucrada en el evento y sus efectos

potenciales sobre objetos en riesgo. Este hecho permitiría usar el área de los deslizamientos para apoyar la toma de decisión a la hora de planificar el uso del territorio en la cuenca del río Combeima.

Los resultados obtenidos por esta investigación se pueden usar para fundamentar estudios que profundicen sobre el uso de la caracterización morfométrica de los deslizamientos en el entendimiento de la dinámica espacial y temporal de estos.

Referencias

- [1] L. Highland and P. Bobrowsky, *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. Reston, Virginia: Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 2008. 146
- [2] M. Acar, M. T. Ozludemir, S. Erol, R. N. Celik, and T. Ayan, “Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering,” *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 8, no. 2, pp. 213–221, 2008. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-213-2008> 147
- [3] J. Barredo, A. Benavides, J. Hervás, and C. J. Van Westen, “Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 2, no. 1, pp. 9–23, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9) 147
- [4] R. Behling, S. Roessner, H. Kaufmann, and B. Kleinschmit, “Automated spatiotemporal landslide mapping over large areas using rapideye time series data,” *Remote Sensing*, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6098026> 147
- [5] R. copons llorens and A. Masquef, “Movimientos de ladera,” *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 17, no. 3, pp. 284–294, 01 2009. 147
- [6] D. Cruden and D. Varnes, “Landslide types and processes,” in *Landslides: investigation and mitigation*, 247th ed., K. Turner and R. Schuster, Eds. Transport Research Board Special Report, 1996, ch. 3, pp. 36–75. 147, 148, 152, 153, 156
- [7] T. Hattanji and H. Moriwaki, “Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: Implications for forecasting travel distance of future landslides,” *Geomorphology*, vol. 103, no. 3, pp. 447–454, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.009> 147

- [8] Q. Lin, Z. Zou, L. Lin, and Y. Wang, “Combining Spectral and Morphometric Properties of Landslides for Separating Individual Landslides Based on Object-Oriented Method,” *Advancing Culture of Living with Landslides*, vol. 5, pp. 1–557, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_147
- [9] F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, P. Reichenbach, and M. Rossi, “Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy,” *Geomorphology*, vol. 96, no. 1-2, pp. 105–122, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.015>
- [10] M. Moine, a. Puissant, and J. Malet, “Detection of landslides from aerial and satellite images with a semi-automatic method. Application to the Barcelonnette basin (Alpes-de-Hautes-Provence, France),” *Proceedings of the landslide processes conference—A tribute to Dr. Theo van Asch*, pp. 63–68, 2009. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00467545/> 148, 160
- [11] F. Rapisarda, “Morphometric and landsliding analyses in Chain domain: The Roccella basin, NE Sicily, Italy,” *Environmental Geology*, vol. 58, no. 7, pp. 1407–1417, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1643-z> 148
- [12] D. Petrea, . Bilasco, S. Rosca, I. Vescan, and I. Fodorean, “The determination of the Landslide occurrence probability by spatial analysis of the Land Morphometric ...” *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, vol. 9, no. May, pp. 91–102, 2014. 148
- [13] R. Fontes, W. Portela, O. De Carvalho, D. Montgomery, R. Troncoso, H. Greenberg, M. Cataldi, and P. Coutinho, “Determination of Areas Susceptible to Landsliding Using Spatial Patterns of Rainfall from Tropical Rainfall Measuring Mission Data , Rio de Janeiro , Brazil,” *International journal of Geo-Information*, vol. 6, no. 289, p. 16, 2017. <https://doi.org/10.3390/ijgi6100289> 148
- [14] M. Calista, E. Miccadei, A. Pasculli, T. Piacentini, M. Sciarra, and N. Sciarra, “First results of morphometric analysis, multitemporal geomorphological investigation and numerical modeling of the Montebello sul Sangro landslide (Abruzzo, Central Italy),” *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, vol. 35, no. January 2016, pp. 307–310, 2015. <https://doi.org/10.3301/ROL.2015.127> 148
- [15] J. P. Carvalho, F. Dourado, and F. Ferreira, “Morphometric analysis of landslide in the Mountain Region of the State of Rio de Janeiro in Brazil : the case study of D ’ anta s watershed,” *Geophysical Research Abstracts*, vol. 15, 2013. 148
- [16] M. Santangelo, D. Gioia, M. Cardinali, F. Guzzetti, and M. Schiattarella, “Landslide inventory map of the upper Sinni River valley, Southern

- Italy,” *Journal of Maps*, vol. 11, no. 3, pp. 444–453, 2015. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.949313> 148
- [17] R. H. Guthrie and S. G. Evans, “Magnitude and frequency of landslides triggered by a storm event, Loughborough Inlet, British Columbia.” pp. 36–50, 2004. <https://doi.org/10.1561/2200000016> 148, 160
- [18] F. Brardinoni and M. Church, “Representing the landslide magnitude-frequency relation: Capilano River basin, British Columbia,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, no. 1, pp. 115–124, 2004. <https://doi.org/10.1002/esp.1029> 148, 160
- [19] X. G. Wang, W. Wang, D. Huang, B. Yong, and X. Chen, “Modifying SEBAL model based on the trapezoidal relationship between land surface temperature and vegetation index for actual evapotranspiration estimation,” *Remote Sensing*, vol. 6, no. 7, pp. 5909–5937, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs60x000x> 148
- [20] R. Guimarães, W. Machado, O. de Carvalho, D. Montgomery, R. Gomes, H. Greenberg, M. Cataldi, and P. Mendonça, “Determination of Areas Susceptible to Landsliding Using Spatial Patterns of Rainfall from Tropical Rainfall Measuring Mission Data, Rio de Janeiro, Brazil,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 6, no. 10, p. 289, 2017. <https://doi.org/10.3390/ijgi6100289> 148
- [21] F. Guzzetti, B. D. Malamud, D. L. Turcotte, and P. Reichenbach, “Power-law correlations of landslide areas in central Italy,” vol. 195, pp. 169–183, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00589-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00589-1) 148, 160
- [22] E. Muñoz and H. Martínez, “Propiedades Estadísticas de un Inventario de Deslizamientos en la Ciudad de Medellín, Colombia.” *10 Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*, no. February, p. 9, 2013. 148
- [23] Servicio Geológico Colombiano, “Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA),” p. 1, 2018. <http://simma.sgc.gov.co/> 149
- [24] C. Corporación Autónoma Regional del Tolima, C. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, and S. Servicio Nacional de Aprendizaje, “Plan de ordenación y manejo de la cuenca mayor del río coello,” in *Fase Ii. Diagnostico Río Coello*, 1st ed., Ibagué, 2006, pp. 55–69. 149
- [25] J. Leal and L. A. Lozano, “Niveles de fragilidad potencial para erosión y deslizamiento en los suelos del municipio de Niveles de fragilidad potencial para la erosión y el deslizamiento en los suelos del municipio de Ibagué.” *Revista de Investigación Agraria y Ambiental RIAA*, vol. 3, no. 1, pp. 67–76,

2012. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4227172> 149, 160, 161
- [26] A. Y. Hernández, “Caracterización y análisis de la amenaza y la vulnerabilidad física por taludes inestables en la microcuenca de la Quebrada Cay, Ibagué, departamento del Tolima,” p. 260, 2013. 149, 161
- [27] J. Leal, “Incidencia del cambio de las coberturas vegetales en la distribución espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Combeima (Ibagué-Tolima, Colombia),” Tesis de Maestría, Universidad del Tolima, 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29189.86247> 149
- [28] H. Vergara and M. Moreno, “Estudio geológico geotécnico de la cuenca del río Combeima,” 1992. 149
- [29] Alcaldía de Ibagué y Corporación Autónoma Regional del Tolima., “Estudio de amenazas naturales , vulnerabilidad y escenarios de riesgo en los centros poblados de Villa Restrepo, Llanitos, Juntas , Pastales , Pico de Oro, Bocatoma Combeima y Cay por flujos torrenciales en las microcuencas del río Combeima.” Ibagué, 2012. <https://www.cortolima.gov.co/contenido/estudio-riesgo-ca-n-gu-ajuste-pot-sector> 149, 160, 161
- [30] J. Leal, U. Pérez, and N. Ortiz, “Distribución espacial y temporal de deslizamientos (1999-2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia,” *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 59, no. 2, pp. 346–365, 2018. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/45286> 149, 150, 152, 153, 160
- [31] U. Pérez and J. Bosque, “Transiciones de la cobertura y uso de la tierra en el período 1991 - 2005 en la cuenca del Río Combeima, Colombia.” *Serie Geográfica*, vol. 14, no. 1, pp. 163–178, 2008. 149, 150, 161
- [32] J. Muñoz Ramos, A. Guío Duque, H. Andrade Castañeda, M. Segura Madrigal, M. Barrios Peña, S. Losada Prado, and M. Gómez Martínez, *Esquema de pago por servicios ambientales para la cuenca alta del río Combeima en el Municipio de Ibagué (Tolima , Colombia)*., 1st ed., Ibagé-Tolima, 2013. 149
- [33] Instituto Geográfico Agustín Codazzi., “Imagen Rapideye 0403012000000230.” Bogota D.C, 2010. <http://www.bni.gov.co/portal/public/classic/Busqueda?faces-redirect=true> 150
- [34] —, “Banco Nacional de Imágenes. 2018,” Bogota D.C, 2018. <http://www.bni.gov.co/portal/public/classic/home> 150
- [35] A. P. JAXA / METI, “ASF Data Search,” 2010. <https://search.asf.alaska.edu> 150

- [36] F. Mantovani, R. Soeters, and C. Van Westen, “Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe,” *Geomorphology*, vol. 15, no. 3-4, pp. 213–225, 1996. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00071-C](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00071-C) 152, 159
- [37] T. Fernández, J. Jiménez, J. L. Pérez, J. Delgado, F. J. Cardenal, C. Chacón, and J. Irigaray, “Identificación de escarpes de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección,” *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos.*, pp. 818–829, 2010. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/66631/FERNANDEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y> 152
- [38] J. Rouse, R. Hass, J. Schell, and D. Deering, “Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS,” in *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, vol. 1. NASA SP-351, 1973, pp. 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf> 152
- [39] T. Zieher, F. Perzl, M. Rutzinger, and G. Markart, “A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility – Two test cases in Vorarlberg , Austria,” no. April, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.008> 152, 161
- [40] Generalitat Valenciana, “gvSIG,” Valencia, España, 2018. <http://www.gvsig.com/> 152
- [41] B. Duruturk, N. Demir, I. Koseoglu, U. B. Onal, and M. Ercanoglu, “Gis-Based Determination of Landslide Properties in Regional Scale: Karabuk Province (NW Turkey),” *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series*, vol. 17, no. 1, pp. 37–46, 2017. <https://doi.org/10.1515/avutgs-2017-0004> 159, 161
- [42] H. Gichenje and S. Godinho, “Establishing a land degradation neutrality national baseline through trend analysis of gimms ndvi time-series,” *Land Degradation & Development*, vol. 29, no. 9, pp. 2985–2997, 2018. <https://doi.org/10.1002/ldr.3067> 159
- [43] T. Le and S. Kawagoe, “Landslide detection analysis in north vietnam base on satellite images and digital geographical information - landsat 8 satellite and historical data approaches,” vol. 73, no. 5, pp. I_239–I_249, 2017. https://doi.org/10.2208/jscej.73.I_239 159
- [44] L. Metz and A. Bear, “Landslide susceptibility mapping : a remote sensing based approach using QGIS 2.2 (Valmiera) : technical manual. Canberra Geoscience Australia,” *Geoscience Australia*, 2014. 159

- [45] J. Kim and K. Kim, "Analysis of 2016 Minamiaso landslides using remote sensing and geographic information system," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 12, 2018. 159
- [46] A. Stumpf, D. Michéa, and J. P. Malet, "Improved co-registration of Sentinel-2 and Landsat-8 imagery for Earth surface motion measurements," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 1–20, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10020160> 159
- [47] B. Yu, F. Chen, and S. Muhammad, "Analysis of satellite-derived landslide at Central Nepal from 2011 to 2016," *Environ Earth Sci*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7516-1> 159
- [48] R. Soeters and C. Van Westen, "Slope instability recognition, analysis, and zonation," *Landslides: Investigation and Mitigation*, pp. 129–177, 1996. 160
- [49] Y. Huang, M. Yu, Q. Xu, K. Sawada, S. Moriguchi, A. Yashima, C. Liu, and L. Xue, "InSAR-derived digital elevation models for terrain change analysis of earthquake-triggered flow-like landslides based on ALOS/PALSAR imagery," *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, no. 11, pp. 7661–7668, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3939-5> 160
- [50] J. E. Nichol, A. Shaker, and M. S. Wong, "Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment," *Geomorphology*, vol. 76, no. 1-2, pp. 68–75, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.10.001> 160
- [51] J. Nichol and M. S. Wong, "Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 10, pp. 1913–1926, 2005. 160
- [52] I. Marchesini, F. Ardizzone, M. Alvioli, M. Rossi, and F. Guzzetti, "Non-susceptible landslide areas in Italy and in the Mediterranean region," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, pp. 2215–2231, 2014. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2215-2014> 160, 161
- [53] A. Mayr, M. Rutzinger, and C. Geitner, "Multitemporal analysis of objects in 3D point clouds for landslide monitoring," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42, no. 2, pp. 691–697, 2018. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-691-2018> 160
- [54] B. D. Malamud, D. L. Turcotte, F. Guzzetti, and P. Reichenbach, "Landslide inventories and their statistical properties," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, no. 6, pp. 687–711, 2004. <https://doi.org/10.1002/esp.1064> 160

- [55] J. D. Pelletier, “Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides,” vol. 48, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00041-0) 160
- [56] N. Hovius and C. Stark, “The characterization of landslide size distributions,” *Geophysical research letters*, vol. 28, no. 6, pp. 1091–1094, 2001. 160
- [57] J. Corominas, “The angle of reach as a mobility index for small and large landslides,” *Canadian Geotechnical Journal*, 1996. <https://doi.org/10.1139/t96-005> 161
- [58] M. Jakob, D. Stein, and M. Ulmi, “Vulnerability of buildings to debris flow impact,” *Natural Hazards*, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2> 161
- [59] J. von Ruetten, P. Lehmann, and D. Or, “Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances,” *Landslides*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0621-2> 161
- [60] J. Michel, C. Dario, D. Marc-Henri, O. Thierry, P. Ivanna Marina, and R. Benjamin, “A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes,” *Engineering Geology*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105478> 161
- [61] M. H. Vahidnia, A. A. Alesheikh, A. Alimohammadi, and F. Hosseinali, “Landslide Hazard Zonation Using Quantitative Methods in GIS,” vol. 7, no. 3, pp. 176–189, 2009. 161
- [62] F. Ardizzone, M. Cardinali, A. Carrara, F. Guzzetti, and P. Reichenbach, “Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 12, 2002. <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/2/3/2002/nhess-2-3-2002.pdf> 161
- [63] P. Reichenbach, M. Galli, M. Cardinali, F. Guzzetti, and F. Ardizzone, *Geomorphological Mapping to Assess Landslide Risk: Concepts, Methods and Applications in the Umbria Region of Central Italy*, 2012. 161