



Ciencia e Ingeniería Neogranadina

ISSN: 0124-8170

revistaing@unimilitar.edu.co

Universidad Militar Nueva Granada

Colombia

Hernández Atencia, Yelena; Ramírez Arcila, Hildebrando
EVALUACIÓN DEL RIESGO ASOCIADO A VULNERABILIDAD FÍSICA POR TALUDES
Y LADERAS INESTABLES EN LA MICROCUENCA CAY, IBAGUÉ, TOLIMA,
COLOMBIA

Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 26, núm. 2, 2016, pp. 111-128

Universidad Militar Nueva Granada

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91146925007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

EVALUACIÓN DEL RIESGO ASOCIADO A VULNERABILIDAD FÍSICA POR TALUDES Y LADERAS INESTABLES EN LA MICROCUENCA CAY, IBAGUÉ, TOLIMA, COLOMBIA

RISK ASSESSMENT OF PHYSICAL VULNERABILITY DUE TO HILLSIDE AND UNSTABLE SLOPES IN THE CAY CREEK WATERSHED, IBAGUÉ, TOLIMA, COLOMBIA

Yelena Hernández Atencia¹, Hildebrando Ramírez Arcila²

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2016

Fecha de revisión: 14 de abril de 2016

Fecha de aprobación: 26 de mayo de 2016

Referencia: Y. Hernández Atencia, H. Ramírez Arcila (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 26 (2), pp. 111-128, DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1800>

RESUMEN

Este artículo de investigación presenta una herramienta de evaluación para detectar la vulnerabilidad física asociada con taludes inestables, sobre la base de una investigación titulada "Caracterización y análisis de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en la microcuenca de la quebrada Cay (Ibagué, Tolima, Colombia)". Se presenta una ecuación que relaciona los factores clave que influyen en la amenaza y los elementos expuestos asociados con la vulnerabilidad física. Cada factor y elemento expuesto es categorizado. El producto de la amenaza, la vulnerabilidad física y la probabilidad de ocurrencia, da como resultado el parámetro RVF (riesgo asociado a vulnerabilidad física), el cual se clasifica de bajo a muy alto, según los efectos del evento amenazante sobre los elementos físicos expuestos. Se obtuvo una valoración del riesgo asociado a

1. Ing. Civil, M.Sc. Profesor auxiliar, Grupo de Investigación AQUA, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, yelena.hernandez@campusucc.edu.co

2. Lic. en Biología y Química, PhD, profesor asistente, Grupo de Investigación AQUA Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, hildebrando.ramirez@campusucc.edu.co

la vulnerabilidad física de las zonas de mayor inestabilidad en la microcuenca Cay. Esta puede ser utilizada para diseñar obras de ingeniería civil que permitan prevenir y controlar los daños causados por las inestabilidades sobre la infraestructura física de la microcuenca de la quebrada Cay. La ecuación propuesta es una herramienta valiosa para los tomadores de decisiones para priorizar la inversión de los recursos públicos.

Palabras clave: vulnerabilidad, amenaza, riesgo, ladera, inestable, microcuenca.

ABSTRACT

This research paper presents a risk assessment tool for physical vulnerability associated with unstable slopes, based on a research entitled "Characterization and Hazard Analysis of Landslides at the Cay creek watershed (Ibague, Tolima, Colombia). An equation that relates the key factors influencing the hazard and exposed elements associated with physical vulnerability is presented. Each factor and exposed elements are categorized. The product of hazard, physical vulnerability, and the likelihood of occurrence results in the parameter Risk associated to Physical Vulnerability (RVF), which is classified from low to very high according to the effect of the hazard event on the exposed physical elements. A risk assessment associated with the physical vulnerability of the areas of greatest instability in Cay Creek watershed was obtained. This can be used to design civil engineering works to prevent and control the damages caused by instabilities on the physical infrastructure of the Cay creek watershed. The proposed equation is a valuable tool for decision makers to prioritize investment of public resources.

Keywords: vulnerability, hazard, risk, hillside, unstable, creek watershed.

INTRODUCCIÓN

En el presente siglo se han presentado cambios fundamentales en la relación hombre-medio ambiente. La actividad antrópica ha generado una aceleración de los agentes naturales, al tiempo que el desarrollo económico ha incrementado la vulnerabilidad y, por ende, los riesgos de las actividades socioeconómicas derivadas de estos. Bajo estas nuevas condiciones a escala global, se ha registrado un incremento en la cantidad de eventos catastróficos asociados a fenómenos naturales (inundaciones, avenidas torrenciales, incendios forestales, movimientos de remoción en

masa, entre otros [1-3], algunos de los cuales están relacionados con una de las consecuencias del cambio climático global: el aumento en la frecuencia o intensidad de los fenómenos climáticos extremos [1]. Bajo este panorama, los movimientos en masa se constituyen en un peligro latente que es importante caracterizar y prevenir.

Estudios realizados por el Banco Mundial han mostrado que en Colombia no se identifican metodologías que estimen las pérdidas económicas y de vidas frente a los movimientos de remoción en masa a escala nacional o regional [2]. Ello obedece a la inexistencia de una me-

metodología unificada para clasificar y medir en forma cuantitativa la vulnerabilidad de los elementos expuestos [2], debido probablemente a la cantidad de variables que involucra su determinación, entre otras razones [3].

Asimismo, en los últimos decenios se han incrementado los desarrollos de metodologías de tipo cualitativo y subjetivo para determinar la vulnerabilidad frente a movimientos de remoción en masa [4-6] y, en menor cantidad, metodologías de estimación cuantitativa de las mismas [7-10].

Por tanto, considerando que en Colombia se produce anualmente la pérdida de miles de vidas e invaluables pérdidas de tipo económico a causa de fenómenos de remoción en masa que afectan la infraestructura nacional, se tornan invaluables los trabajos de investigación que apunten a la estimación cuantitativa del riesgo desde el contexto de la vulnerabilidad física.

En los últimos años el departamento del Tolima (Colombia) ha convivido con una serie de eventos de este tipo, que han transformado el relieve y, a la par, dejado un cúmulo de experiencias que merecen ser estudiadas [8], como las ocurridas en la cuenca del río Combeima y sus microcuencas constituyentes, en donde se han presentado avalanchas, deslizamientos e inundaciones que han dejado, durante los últimos 50 años, cerca de 500 muertos, más de 3.600 damnificados y pérdidas millonarias en cultivos y obras civiles [1, 11-13].

La cuenca del río Combeima se considera una zona de Colombia con gran susceptibilidad a fenómenos naturales catastróficos, en particular en lo referente a fenómenos de remoción en masa [13-16], debido principalmente a las características geológico-geomorfológicas complicadas de la región.

Si se tiene en cuenta que la cuenca del Combeima abastece alrededor del 80% del agua para el acueducto de la ciudad de Ibagué [16], y la belleza escénica para el disfrute de la población ibaguereña, la posibilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa potencialmente catastróficos hace necesario realizar una evaluación cuantitativa del riesgo frente a los mismos, basada en la identificación y caracterización de zonas inestables desde la perspectiva de la amenaza y la vulnerabilidad física.

Es importante mencionar que la amenaza se define, en términos generales, como la probabilidad de que se presente un fenómeno de origen natural o humano potencialmente perjudicial, en un determinado lapso de tiempo y lugar dado [17-27]. Igualmente, la vulnerabilidad es entendida generalmente como la predisposición física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada por la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud específica y que involucra la capacidad de la comunidad para reducir el peligro o las consecuencias adversas del fenómeno [17-27]. La convolución de la amenaza y la vulnerabilidad determinan el riesgo, considerado como las pérdidas probables que podrían afectar a un componente o sistema expuesto [18, 26].

Un aspecto importante es la vulnerabilidad física, entendida como la afectación que sufrirá un activo determinado ante una amenaza dada [5, 15-16, 26-27]. De la misma forma, la amenaza y la vulnerabilidad física determinan el riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF), cuyo análisis parte de la determinación de los factores detonantes de la amenaza y los elementos de infraestructura expuestos.

En este sentido, la investigación fuente de este artículo tuvo como objetivo evaluar el RVF asociado a fenómenos de remoción en masa

causados por taludes y laderas inestables en una de las microcuencas que conforman la cuenca del río Combeima, la de la quebrada Cay (Ibagué-Tolima, Colombia). El desarrollo de la investigación se fundamentó en los trabajos realizados por diversos autores en todo el mundo [7, 9, 28-35]. Los resultados de esta evaluación apoyarán la labor de monitoreo y comunicación de información sobre el riesgo a comunidades vulnerables, y ayudarán a los entes gubernamentales en la función de proteger las vidas humanas y los bienes económicos.

METODOLOGÍA

1.1. Localización

La microcuenca de la quebrada Cay tiene un área de 1.906 ha y hace parte de la cuenca del río Combeima, ubicada en la región centro-occidental de Colombia (Figura 1). La quebrada Cay nace a los 1.800 msnm, su cauce principal tiene una longitud de 8,34 km, posee un caudal medio anual de 500 l/s y pendiente máxima de 78,8°.

1.2. Inventario de taludes inestables

En el desarrollo de la investigación fueron identificados 26 sitios (taludes y laderas inestables) activos en la microcuenca Cay. Cada uno fue caracterizado mediante la aplicación del formulario de inspección geotécnica presentado en [36], que permite identificar el fenómeno, relacionarlo en una base de datos, verificar la infraestructura física afectada y la que se encontraba amenazada, describir el fenómeno en cuanto a morfología y geometría, clasificar el material del sitio, verificar la presencia de agua, establecer el posible mecanismo de falla, identificar posibles causas del fenómeno (factores internos, detonantes naturales, detonantes antrópicos), estado de avance y desarrollo, y grado de actividad.

Adicionalmente, se contó con los registros de las estaciones que conforman la red de observación que opera en la cuenca del río Combeima (estaciones "El Darién", "El Secreto", "La Esmeralda", "Pastales", "El Placer", "El Palmar" y "El Rancho") para identificar las condiciones de

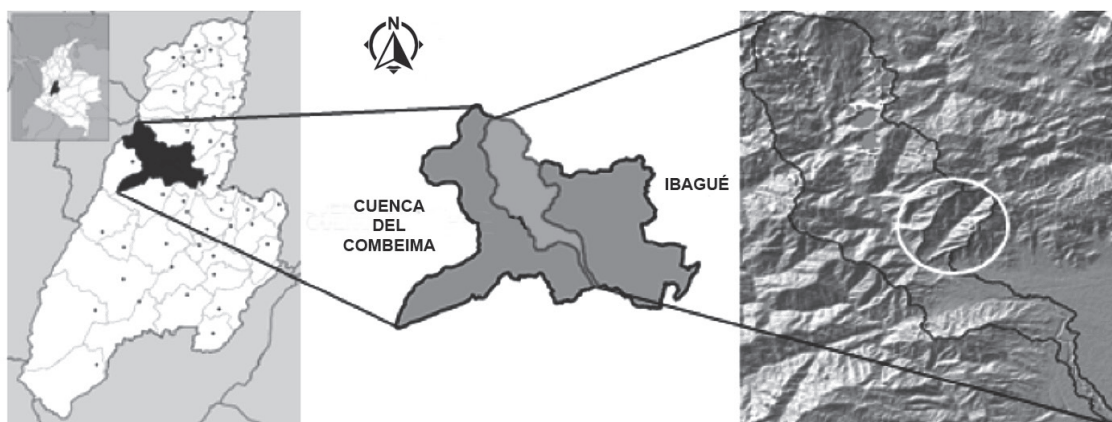


Figura 1. Ubicación de la microcuenca de la quebrada Cay (en el círculo), en la cuenca del río Combeima en el municipio de Ibagué (Tolima, Colombia).

Fuente: Modificado de [16].

precipitación de la zona. Se usaron las series de datos de precipitación correspondientes al periodo 1983-2010.

Se consideró que la inestabilidad de las laderas está asociada al fuerte fracturamiento de los macizos rocosos por causa de la actividad geológica de la falla Chapetón-Pericos, cuyo trazo se cartografía sobre el eje y la margen sur de la quebrada Cay [36]. Esta falla presenta en la zona rasgos geomorfológicos acentuados, como facetas trapezoidales y silletas, que evidencian actividad reciente.

1.3 Factores detonantes y elementos expuestos

A partir de la caracterización de los sitios inestables realizada en campo, se identificaron los factores detonantes, entendidos estos como aquellos que condicionan la ocurrencia o desencadenamiento de los movimientos de remoción en masa (geología, pendientes,

precipitación, sismos, uso del suelo, acción antrópica).

De la misma forma, durante el trabajo de campo se identificaron los elementos expuestos de la infraestructura física a la amenaza de los taludes y laderas inestables, como estructuras residenciales e institucionales, vías vehiculares, puentes, bocatoma de acueducto, redes eléctricas, redes de agua potable y cultivos.

1.4 Análisis de la amenaza y la vulnerabilidad física

Ante la inexistencia de un estándar nacional e internacional para la calificación de la amenaza, se definió una escala que permitiera desarrollar los objetivos planteados.

Los factores detonantes se dividieron en categorías, y estas, a su vez, en subcategorías (Tabla 1), y se les asignó un valor entre 1 y 5, de acuerdo con el grado de inestabilidad que

Tabla 1. Categorización de los factores detonantes de la amenaza.

Factor	Categoría	Subcategoría	Valor
Pendiente	0°-3°	Muy plano	1
	3°-7°	Plano	1
	7°-12°	Semiondulado	1
	12°-25°	Ondulado	2
	25°-50°	Muy ondulado	3
	70°-75°	Escarpado	4

Factor	Categoría	Subcategoría	Valor
Precipitación	Promedio anual <1.000 mm	Muy bajo	1
	Promedio anual 1.000-1.300 mm	Bajo	2
	Promedio anual 1.300-1.600 mm	Medio	3
	Promedio anual 1.600-2.000 mm	Alto	4
	Promedio anual >2.000 mm	Muy alto	5



Factor	Categoría	Subcategoría	Valor	
Geología	Unidades geológicas	Batolito de Ibagué roca	1	
		Metasedimentos	1	
		Depósito aluvial	2	
		Neises y anfibolitas	3	
		Flujo de tierra	4	
		Depósito coluvial	4	
		Complejo Cajamarca	4	
		Depósito fluvio volcánico	4	
		Depósito Piroclástico	5	
		Batolito de Ibagué suelo	5	

Factor	Categoría	Valor
Usos del suelo	Bosque natural	1
	Bosque secundario	1
	Rastrojos	1
	Bosque secundario/café /frutales	2
	Pastos naturales hortalizas	3
	Pastos mejorados	3
	Pastos con rastrojo	4
	Pastos mejorados/frutales	4
	Cultivo fríjol/cultivo plátano-café	4
	Pastos naturales/pastos en rastrojo	5

Factor	Categoría	valor
Acción antrópica	Frutales	2
	Sistemas silvopastoriles bien manejados	2
	Café/plátano	3
	Ganadería extensiva	3
	Fríjol	4
	Ganadería intensiva	4
	Hortalizas	5
	Sobre pastoreo	5

Factor	Categoría	Subcategoría	valor
Falla geológica Chapetón-Pericos	Proximidad a la falla	Muy cerca < 1 km	5
		Cercana entre 1-3,5 km	4
		Cercanía moderada entre 3,5- 5,5 km	3
		Distante entre 5,5- 7 km	2
		Muy distante > 7 kM	1

Fuente: Elaboración propia.

pueda llegar a generar, donde 1 corresponde a las subcategorías de menor importancia como

generadores de inestabilidad y 5 las de mayor importancia.

Igualmente, se consideró que la microcuenca Cay presenta sitios con baja probabilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa y sitios con probabilidad de ocurrencia alta. Por tanto, se definió también una escala de influencia (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Caracterización del valor de influencia (VI) para la amenaza.

VI (Valor de influencia)	Características
5 (Muy influyente)	Factor preponderante en la generación de amenaza.
4 (Influencia media)	Factores con influencia no tan relevante, pero unida con otros pueden generar una amenaza importante.
3 (Influencia baja)	Su aporte en la generación de amenaza es bajo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Valor y coeficiente de influencia para la amenaza.

Factor	Valor de influencia	Coeficiente de influencia Cla
Geología	4	0,63
Pendiente	4	0,63
Precipitación	5	0,78
Uso del suelo	4	0,63
Acción antrópica	5	0,78
Sísmica	5	0,78
Quebrada Cay	5	0,78
	$\sum Vi = 32$	$\sum Cla = 5$

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de influencia para la amenaza se determina con la Ecuación (1)

$$Cla = \frac{Vi \cdot 5}{\sum Vi} \quad (1)$$

El valor de la amenaza se determinó mediante la Ecuación (2):

$$A = Vf \cdot Cla \quad (2)$$

Donde,

A: Amenaza

Vf: Valor del factor (para cada factor detonante en el sitio inestable, de Tabla 1)

Cla: Coeficiente de influencia de la amenaza. Ecuación (1)

La estimación cuantitativa de la vulnerabilidad física se obtuvo a través de la Ecuación:

$$VF = (Valor \ de \ la \ protección / VP) \cdot VP \cdot C Iv \quad (3)$$

Donde:

VF: Vulnerabilidad física

VP: Valor de la proximidad

C Iv: Coeficiente de influencia de la vulnerabilidad (Tabla 5)

$$C Iv = \frac{Viv \cdot 5}{\sum Viv} \quad (4)$$

La Ecuación (3) hace explícito que la vulnerabilidad física generada por un talud o ladera inestable disminuye cuando se incrementa la protección del elemento expuesto, a través, por ejemplo, de la construcción o implementación de un muro de contención o drenajes en el caso de una vía.

Asimismo, la Tabla 4 muestra la clasificación de los elementos expuestos a la amenaza de acuerdo con la afectación y la protección.

Tabla 4. Elementos expuestos a la amenaza de los taludes y laderas inestables de acuerdo con el grado de afectación.

Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Estructural, residencial e institucional	Muy alta	5	Con diseño	5
			Sin diseño	2
	Alta	4	Concreto	5
			Ladrillo	4
	Media	3	Madera	3
			Bahareque	2
			Plástico-esterilla	1
	Baja	2	Daños ligeros no estructurales	4
			Daños importantes	2
	Muy baja	1	Daños graves	1
Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Vía vehicular	Muy alta	5	Pavimentada	5
	Alta	4	Sin pavimentar	1,5
	Media	3	Con tratamiento superficial	3
	Baja	2	Sin tratamiento superficial	2,5
	Muy baja	1	Con diseño	3,0
			Sin diseño	2,5
			Obstrucción de la vía	2
			Destrucción total de la vía	1
Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Bocatoma de acueducto	Muy alta	5	Con diseño	5
			Sin diseño	1
	Alta	4	Con obras de protección	3
			Sin obras de protección	1
	Media	3	Daños ligeros no estructurales	4
			Daños importantes	2
	Baja	2	Daños graves	1
	Muy baja	1		
Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Redes eléctricas	Muy alta	5	Postes en concreto	2
			Postes en madera	1
	Alta	4	Postes en acero	3
			Redes subterráneas	4
	Media	3	Redes aéreas	2
			Plantas de energía	4
	Baja	2	Subestación eléctrica	4
			Sistema móvil de comunicación	2
	Muy baja	1		

Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Redes de agua potable	Muy alta	5	Tubería en concreto	1
			Tubería en PVC	2
	Alta	4	Tubería en Gres	1
			Tubería en asbesto-cemento	3
	Media	3	Tubería metálica	3
			Tubería en polietileno	3
	Baja	2	Tubería en bronce	3
			Tubería galvanizada	1
			Sin válvula de cierre cercana	1
			Con válvula de cierre cercana	5
			Con diseño	5
	Muy baja	1	Sin diseño	1

Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Puente	Muy alta	5	En concreto	5
			En madera	3
	Alta	4	Metálico	2
			Con diseño	5
	Media	3	Sin diseño	1
			Daños ligeros no estructurales	4
	Baja	2	Daños importantes	2
	Muy baja	1	Daños graves	1
Factor	Afectación	Valor	Protección	Valor
Cultivos Alta Media Baja Muy baja	Muy alta	5	Con diseño de drenaje	
	Alta	4	Sin drenaje	
	Media	3	Con obras de protección	
	Baja	2	Sin obras de protección	
	Muy baja	1		

Fuente: Elaboración propia.

Para la estimación del riesgo asociado a vulnerabilidad física se modificó la ecuación formulada por [14] y que tiene en cuenta la convolución de la amenaza (frente a movimientos de remoción en masa) y la vulnerabilidad (solo en su dimensión física para esta investigación). En este sentido, a partir de los valores de amenaza y vulnerabilidad física calculados con las Ecuaciones (2) y (3), se obtiene el valor del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables para la microcuenca de la quebrada Cay, según la expresión:

$$RVF = A * VF * P \quad (4)$$

Donde:

RVF: Riesgo asociado a vulnerabilidad física

A: Amenaza

VF: Vulnerabilidad física

P : Probabilidad de ocurrencia del evento

Para la probabilidad de ocurrencia se usaron los valores determinados por [21] y se establecieron los valores de ocurrencia del evento para cada valor de amenaza (Tabla 6).

Tabla 5. Valor y coeficiente de influencia para los elementos expuestos considerados para vulnerabilidad física.

Elementos expuestos	Valor de influencia Viv	Coeficiente de influencia Clv
Estructural, residencial e institucional	5	0,714
Vía vehicular	4	0,571
Puentes	3	0,428
Bocatoma de acueductos	5	0,714
Redes eléctricas	4	0,571
Redes de agua potable	4	0,571
Cultivos	5	0,714
Quebrada Cay	5	0,714
	$\sum \text{Civ} = 35$	$\sum \text{Clv} = 5$

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 6.** Probabilidad anual de ocurrencia dado el valor de la amenaza.

Amenaza	Probabilidad de ocurrencia	Significado
Muy baja	1/2500	Este límite es comparable con la probabilidad asociada al sismo creíble, máximo que se usa para el diseño de presas en Canadá.
Baja	1/500	Una probabilidad anual de 1/500 es de significado incierto.
Media	1/100	La ocurrencia de un deslizamiento en el término de vida no es probable.
Alta	1/20	Debe esperarse que ocurra un deslizamiento dentro del tiempo de vida de una persona o de una estructura típica, son identificables las perturbaciones pero no parecen recientes.
Muy alta	1/10	El deslizamiento puede ser inminente. Los deslizamientos ocurrirán con un periodo de retorno de 10 años, o menos, y dejarían signos claros de perturbación relativamente frescos.

Fuente: Modificado de [21].

RESULTADOS

Del trabajo realizado en campo, con apoyo de los formularios de inspección geotécnica desarrollados para esta investigación [36], se estableció que los factores detonantes de movimientos de remoción en masa más relevantes en la microcuenca Cay son: precipitación, geología, sísmica, acción antrópica, uso del suelo, pendiente y corriente Cay [36].

A los 23 sitios inestables inventariados se les aplicó la Ecuación (2), obteniéndose el valor de la amenaza, los cuales fueron agrupados en cinco intervalos (Tabla 7).

Con los valores de amenaza, vulnerabilidad física obtenidos a partir de las Ecuaciones (2) y

Tabla 7. Grado de amenaza, después de agrupar en cinco intervalos los valores de amenaza obtenidos con la ecuación (2).

Grado	Valor
Muy baja	< 9,28
Baja	9,28-15,03
Media	15,03-20,04
Media alta	20,04-21,33
Alta	> 21,33

Fuente: Modificado de [27].

(3) y la probabilidad de ocurrencia (Tabla 6) se obtuvo el valor de RVF (Tabla 8), se construyó una tabla de frecuencias que permitió establecer los intervalos de calificación del nivel de

riesgo (Tabla 9), los cuales fueron validados en tres sitios inestables en la microcuenca Cay, talud (24) Mirasol,(25) Cay baja 1 y (26) Cay baja 2 [36].

Tabla 8. Valores de riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) para taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, en el municipio de Ibagué (Tolima, Colombia).

Talud o ladera N°	Amenaza	Vulnerabilidad física	RVF
1	24,37	86,52	210,9
2	20,47	76,81	78,61
3	15,16	75,93	11,51
4	28,13	80,36	226,00
5	26,56	77,93	207,00
6	26,56	72,14	191,63
7	26,56	72,14	191,63
8	28,91	63,00	182,11
9	26,56	81,79	217,04
10	25,31	56,17	142,17
11	19,22	54,67	52,53
12	23,44	58,67	133,83
13	22,19	58,67	130,17
14	23,44	60,57	141,96
15	31,25	73,43	229,46
16	21,88	60,57	132,50
17	28,91	80,10	231,53
18	21,41	94,64	202,59
19	25,00	80,36	200,89
20	17,81	61,07	108,78
21	22,03	80,36	177,04
22	17,81	77,93	13,88
23	23,12	80,36	185,82

Los valores de riesgo asociado a vulnerabilidad física para los taludes y laderas estudiadas fueron agrupados en cinco intervalos (Tabla 9).

Tabla 9. Calificación del nivel riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) por taludes y laderas inestables para la microcuenca de la quebrada Cay.

Nivel de riesgo	Rango de RVF
Bajo	< 66
Medio	66-121
Alto	121-176
Muy alto	> 176

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de cada talud y ladera estudiado de acuerdo con su nivel de riesgo (Tabla 9) puede ser visualizado espacialmente en la Figura 2.

De la Tabla 8 se puede deducir que los riesgos más altos corresponden a los sitios (taludes o laderas) número 1 (sector La Cascada, predio La Cubana), 4 (sector La Cascada, predio La Cascada), 5 (sector La Cascada, finca La Argentina), 9 (sector Cay parte baja) y 15 (sector La Cascada, finca El Pedrero) (Figura 3).

2.1 Categorización de los niveles de riesgo

2.1.1 Riesgo bajo

Se considera que el RVF es bajo cuando se prevé que el evento amenazante producirá pocos daños, sin comprometer de manera significativa las estructuras residenciales e institucionales, y se esperan solo daños leves en algunos enseres y muebles.

Bajo estas condiciones, las comunidades del sector no se verán afectadas en lo económico, social o cultural por causa del fenómeno.

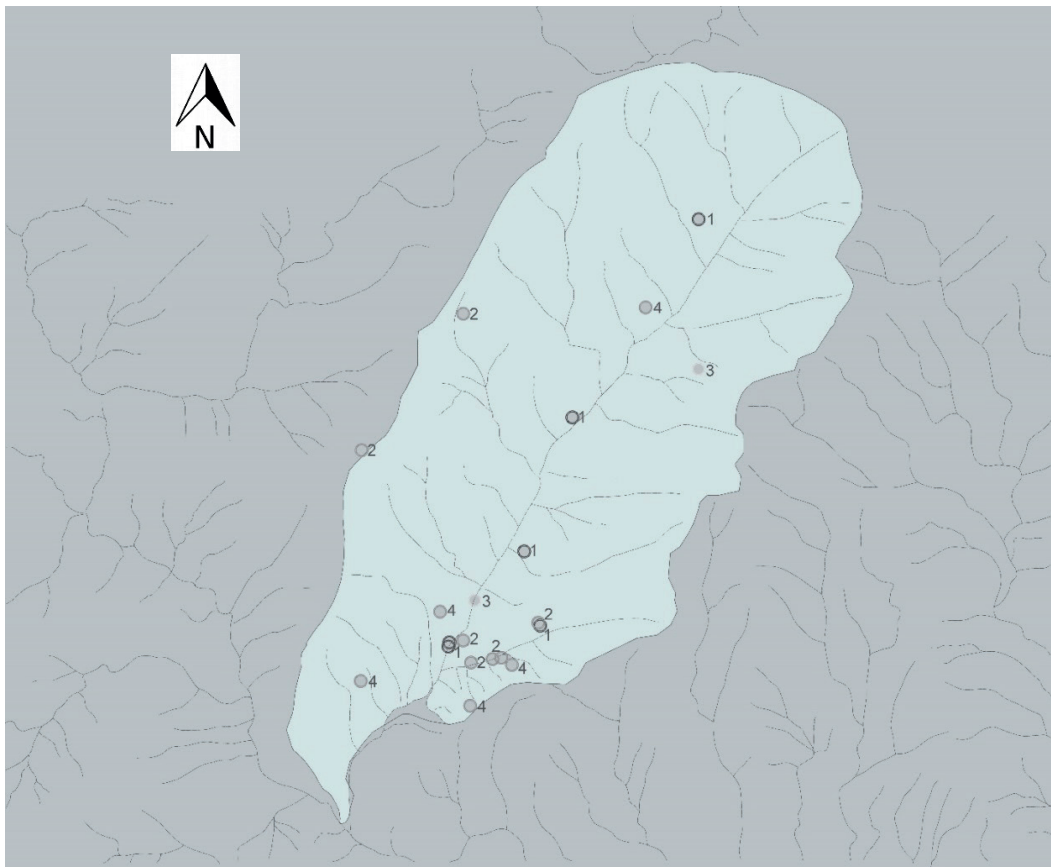


Figura 2. Distribución espacial de los taludes y laderas inestables evaluadas en la microcuenca de la quebrada Cay. RVF: muy alto (1), alto (2), medio (3), bajo (4).

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Riesgo medio

Cuando se considera el nivel de riesgo medio, se prevé que las viviendas sean afectadas por falla en los elementos no estructurales del domicilio, como puertas y ventanas. Incluso, se esperan pequeñas fisuras en paredes, sin compromiso de su estructura o cimentaciones. Algunas viviendas sin diseños, o de materiales no convencionales (en madera, esterilla y plástico), podrán ser afectadas seriamente por causa de la inestabilidad, lo que obligará a sus ocupantes a la evacuación parcial o total.

Respecto a la infraestructura del lugar, se verá afectada al punto de requerir la intervención de maquinaria para la limpieza de vías, ya que, por la obstrucción, no será posible el paso de vehículos. Igualmente, se verán afectadas las conducciones de aguas, tanto de acueductos como de alcantarillados.

Se presentarán interrupciones temporales en la actividad económica y social de las comunidades. Se verán afectados los cultivos del sector por las inestabilidades de taludes y laderas, con probables pérdidas de cultivos y pastizales, y se presentarán



Sector La Cascada, Finca La Cubana..



Sector La Cascada, predio La Cascada.



Cay parte baja.



Sector La Cascada, finca El Pedrero.

Figura 3. Imágenes de los sitios considerados con mayor riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) en la microcuenca de la quebrada Cay, en el municipio de Ibagué (Tolima, Colombia).

Fuente: Elaboración propia.

interrupciones momentáneas en las actividades laborales, escolares y culturales de la zona.

2.1.3 Riesgo alto

El riesgo es alto cuando se considera que las viviendas y construcciones cercanas a la zona inestable sufrirán deterioros estructurales visibles, con fisuras o roturas de elementos, como muros y vigas, lo que comprometerá seriamente su integridad estructural y causará una necesaria evacuación. Las viviendas sin

diseños, o hechas de materiales no convencionales (plástico, esterilla y madera), serán totalmente destruidas o deberán ser abandonadas por parte de sus moradores.

En cuanto a la infraestructura de la zona, se observarán deterioros en las vías de comunicación del sector, con serios rompimientos de conducciones, hecho que causará interrupción prolongada de transporte y servicios públicos. Pueden presentarse fallas en los sistemas de irrigación por días a meses.

Respecto a las actividades laborales, académicas, económicas y sociales, estas se verán seriamente afectadas por prolongados ceses de actividades y pérdidas de cosechas que afectarán la producción agrícola, hechos que compromete la economía del sector.

2.1.4 *Riesgo muy alto*

Cuando el riesgo es muy alto, se tendrá un fuerte impacto en las viviendas del sector, con rupturas muy notorias, derrumbes parciales a totales en edificaciones con diseños y elementos estructurales deteriorados por los fenómenos ocurridos. Todo esto exigirá evacuación inmediata de la zona, y supondrá también pérdidas económicas importantes por pérdida total de enseres y propiedades en viviendas sin diseños o hechas en materiales no convencionales.

La infraestructura de la zona sufrirá daños severos, como ruptura total de vías de acceso, puentes vehiculares afectados por efecto de los fenómenos de inestabilidad, conducciones de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, gas) con fracturas importantes que requerirán de rápida atención. Es decir, se tendrán también emergencias sanitarias, que se complicarán por la caída de postes de luz y de líneas telefónicas, y la interrupción en los servicios públicos y de transporte, que podrá prolongarse hasta varias semanas para su restitución.

CONCLUSIONES

La evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) es un aporte, desde un estudio de caso, a la evaluación del riesgo, mirado desde la perspectiva de la vulnerabilidad física.

La Ecuación 3 (RVF) permite cuantificar el riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes

y laderas inestables. Aunque fue desarrollada para un lugar específico (microcuenca Cay), podrá ser adaptada a lugares diferentes para evaluar los factores detonantes y elementos expuestos del lugar.

Los resultados que se obtienen a partir de la evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) son una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones encargados de invertir los recursos públicos, de manera que se prioricen estas inversiones en obras de infraestructura, lo cual permitiría mayor eficiencia y racionalidad de los dineros para prevenir y mitigar los impactos de este tipo de eventos frecuentes en el país.

La geología, pendientes, acción antrópica, uso del suelo, sísmica y precipitación son factores preponderantes en la generación de inestabilidad en laderas y taludes en la microcuenca Cay y, por tanto, potenciales causas de amenaza, vulnerabilidad física y riesgos asociados.

En la microcuenca de la quebrada Cay los taludes nombrados como 1, 4, 5, 9, 15 y 17 son los más críticos desde la perspectiva del RVF, hacia los cuales se deben priorizar los recursos y realizar medidas preventivas y correctivas de manera inmediata.

La ladera 1 (La Cascada, sector La Cubana) presenta un estado activo de inestabilidad, con un valor de riesgo alto, condición que está relacionada con el uso del suelo (sobrepastoreo), acción antrópica (la falta de alcantarillado de la vivienda ubicada en el lugar, cuyas aguas servidas son dispuestas sobre la ladera). A pocos metros de su base fluye la quebrada Cay, un nuevo movimiento puede ocasionar el taponamiento de la misma y poner en riesgo a la comunidad rural, conformada por aproximadamente 724 personas [36]. Adicionalmente, estaría en riesgo una

de las bocatomas del acueducto de la ciudad de Ibagué, ubicado aguas abajo de este sitio, y se colocaría en condición de fragilidad la provisión del recurso hídrico de la capital tolimense.

La ladera 4 (sector La Cascada, predio La Cascada) presenta un valor alto de RVF. Se encuentra ubicada en la cabecera del centro poblado La Cascada, habitado por 551 personas, aproximadamente [36]. Un movimiento importante de la ladera pone en riesgo a las familias del centro poblado y el curso de agua de la quebrada Cay, que pasa por un costado del centro poblado. Adicionalmente, se encuentra en riesgo la vía vehicular y la bocatoma del acueducto y, por tanto, la provisión de agua para la ciudad de Ibagué.

Las laderas 5 (Cascada, finca La Argentina), 9 (Cay parte baja), 15 (La Cascada, finca El Pedrero) son sitios inestables activos que impactan directamente sobre el curso de agua de la quebrada Cay y ponen en riesgo la bocatoma del acueducto y los centros poblados de la microcuenca.

La Figura 2 pone de manifiesto que en la microcuenca de la quebrada Cay predomina el RVF alto, con valores entre 121 y 176, de acuerdo con la Tabla 9.

El análisis realizado en este trabajo pone de manifiesto la necesidad de realizar estudios más detallados de la vulnerabilidad de los centros poblados presentes en el sector Cay parte baja y La Cascada, que apunten a capacitar a las comunidades de estos centros poblados frente a esta amenaza latente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue financiado por la Universidad Cooperativa de Colombia.

Un agradecimiento especial a: PhD Jader Muñoz Ramos, MsC Héctor Cárdenas Martínez, ingeniero Alberto Núñez Tello y al ingeniero Miguel Thomas por sus valiosos aportes en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] IPCC (2012). Resumen para responsables de políticas. *Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*. Cambridge University Press. En: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf. (Diciembre de 2015).
- [2] Banco Mundial (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Washington D.C, USA: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y el Caribe.
- [3] Glade T. and Crozier M.J. (2005). The nature of landslide hazard and impact. En: Glade T, Anderson MG, Crozier MJ (eds) *Landslide hazard and risk*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9780470012659.ch2
- [4] González, J. E. (2006). Propuesta metodológica basada en un análisis multicriterio para la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos e inundaciones. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(8), pp. 59-70.
- [5] Chacón M.P., Hernández M.J. et al. (2009). *Plataforma integral del riesgo*

- por fenómenos antrópicos y naturales. (Tesis de grado sin publicar), Universidad Cooperativa de Colombia. Ibagué.
- [6] Dai, F.C., Lee, C.F. & Ngai, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1), pp. 65-87. doi: 10.1016/S0013-7952(01)00093-X
- [7] Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S. and Kaynia, A.M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3-4), pp. 251-256. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.011
- [8] Das, I., Kumar, G., Stein, A., Bagchi, A. and Dadhwal, V.K. (2010). Stochastic landslide vulnerability modeling in space and time in a part of the northern Himalayas, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), pp. 25-37. doi: 10.1007/s10661-010-1668-0
- [9] Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M. and Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), pp. 125-134. doi: 10.1007/s10346-009-0190-3
- [10] Lombo, R. (2006). Estabilizar cuencas hidrográficas, una tarea indispensable. *Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas*, Bogotá, Colombia, pp. 1-13.
- [11] Barrios, M. & Olaya, J. (2007). *Evaluación integral del riesgo por avenidas torrenciales, caso villa Restrepo, Ibagué-Tolima*. (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué.
- [12] DNP, Departamento Nacional de Planeación. (2009). *Conpes 3570 Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*. Bogotá, D. C., Colombia.
- [13] Vera, J.M. & Albarracín, A.P. (2015). *Propuesta metodológica para el análisis y espacialización de la vulnerabilidad ante amenazas hidrológicas, para la gestión integral del riesgo en la planificación ambiental de cuencas hidrográficas*. (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.
- [14] Wilches, G. (1998). Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o Yo Voy Correr el Riesgo: Guía de La Red para la Gestión Local del Riesgo. *La Red. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina*. IT Perú. Quito, Ecuador. En: http://www.desenredando.org/public/libros/1998/ggIr/GGLR_todo_ene-7-2003.pdf. (Noviembre de 2014).
- [15] Ingeominas (1992). *Estudio geológico geotécnico de la cuenca del río Combeima*. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué, pp. 87.
- [16] Departamento Nacional de Planeación (2009). *Documento Conpes 3570: Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*. Consejo Nacional de Política Económica y Social (Copnes), Bogotá, Colombia.
- [17] Cifuentes, D. (2011). *Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos*.

- (Tesis de maestría). Departamento de Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [18] Cardona, O.D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: Maskrey A. *Los desastres no son naturales*. En: <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm> (Abril de 2015)
- [19] Lavell, A., Mansilla, E., Smith, D., Brenes, A., Romano, L., Somarriba, H., Gamarra, L. & Armien, F. (2003). *La gestión local del riesgo: nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica*. Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central Cepredenac - PNUD. En: <http://www.eird.org/encuentro/pdf/spa/doc15783/doc15783-contenido.pdf> (Agosto de 2015).
- [20] Sánchez, R., Márquez, R., Urrego, L. & Vargas, G. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. En *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*. En: http://www.docentes.unal.edu.co/gvargasc/docs/PUBLICACIONES_RIESGOS/Modelo-pronosticoFRM.pdf (Agosto de 2015).
- [21] Hungr, O. (1997). Some methods of landslide intensity mapping. En: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), *Landslide risk assessment - Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, pp. 19-21.
- [22] Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. (Tesis doctoral). Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la materia condensada. Universidad de Cantabria. En: <http://www.tdx.cat>. (Agosto de 2015).
- [23] Weichselgartner J. & Bertens, J. (2000). Natural disasters: acts of God, Nature or Society? On the social relation to natural hazards. En: Brebbia, C. *Risk Analysis II*. Wessex Institute of Technology, Southampton: WIT. Press.
- [24] Cardona, O.D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo "Una crítica y una visión necesaria para la gestión". En: *International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice*, Wageningen, Holanda.
- [25] ONU/EIRD (2004). *Vivir con el riesgo: informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Naciones Unidas. Ginebra, Suiza. En: <http://bvp.adm.indec.gov.pe/doc/cds/vivirconelriesgo/pdf/ch1%20Section%201.pdf>. (Diciembre de 2015).
- [26] Clarke, C. & Pineda, C. (2007). Riesgos y desastres: su gestión municipal en Centroamérica. *Publicaciones especiales sobre el desarrollo*. Banco Interamericano de Desarrollo. En: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=1320023>
- [27] Servicio Geológico Colombiano (2015). *Guía metodológica para estudios de*

amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C., Colombia.

- [28] Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. & Davis, I. (2003). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. Routledge, New York. En: http://www.preventionweb.net/files/670_72351.pdf. (Diciembre de 2015)
- [29] Bohórquez, L. (2013). *Criterios para la evaluación de amenazas por deslizamientos e inundaciones*. Unidad del medio ambiente y gestión del riesgo PNUD, Honduras, pp. 1-34.
- [30] Coburn, A.W., Spence, R.J.S. & Pomonis, A. (1991). *Vulnerabilidad y evaluación del riesgo*. Cambridge, U.K.: Cambridge Architectural Research Limited, pp. 1-69.
- [31] González, J. E. (2006). Propuesta metodológica basada en un análisis multicriterio para la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos e inundaciones. *Revista de Ingeniería Universidad de Medellín*, 5(8), pp. 59-70.
- [32] Unesco. (2000). *Desarrollo de una metodología para la determinación de amenazas y riesgos y deslizamientos en la cuenca del río San Juan, República Dominicana*. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, pp. 1-41.
- [33] Prieto, C.C. (2011). *Metodología para la evaluación de riesgos por deslizamientos en líneas de conducción de hidrocarburos*. (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia.
- [34] Sánchez, R., Mayorga, R., Urrego, F. & Vargas, G. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. En: *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*, pp. 1-8.
- [35] Shamaoma, H., Kerle, N. & Alkema, D. (2005). *Extraction of flood risk-related base-data from multi-source remote sensing imagery*. Enschede: International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), pp. 1-7.
- [36] Hernández, Y. (2013). *Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca de la quebrada Cay, Ibagué*. (Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar el título de Magíster en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas). Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.