

# Evaluación cuantitativa del riesgo por deslizamientos detonados por lluvia en una carretera del noroeste de Colombia

Cesar Hidalgo

Facultad de ingenierías-Universidad de Medellín, Medellín, Antioquia, Colombia

André Assis

Departamento de Engenharia civil– Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil



## ABSTRACT

This paper aims to present a methodology to estimate quantitatively risk of landslides in roadways located in tropical and mountainous regions. The evaluation was carried out in a highway section located in the department of Antioquia, Colombia. The hazards were evaluated using statistical relationships between rainfall and the occurrence of landslides. Failure threshold values were established using daily rainfall data and landslide records for a period of 4 years. Statistical records of fatalities were used to estimate the annual probability of losses of life and consequently the risk of the road. The vulnerability was estimated using a methodology to obtaining an index named level of estimated risk (NRE). It was concluded that the estimative based on the index NRE produces consistent results that may help define the places where it is essential to execute more detailed studies and mitigation systems.

## RESUMEN

En este trabajo se aplicó una metodología que permite estimar cuantitativamente el riesgo por deslizamiento de taludes en carreteras de zonas tropicales montañosas. La evaluación se realizó en un tramo de una carretera localizada en el departamento de Antioquia, Colombia. La amenaza se evaluó usando relaciones estadísticas entre la precipitación y la ocurrencia de eventos de inestabilidad. Los umbrales de falla se establecieron usando datos de lluvia diaria y registros de deslizamientos para un periodo de 4 años. La vulnerabilidad se estimó mediante la utilización de una metodología en la cual se asignan pesos a una serie de atributos relacionados con la exposición de las personas y vehículos obteniendo un índice denominado Nivel de Riesgo Estimado-NRE. Se concluyó que las estimativas por el método expedito usando el índice NRE producen resultados consistentes que ayudan a definir los sitios donde es indispensable realizar estudios más detallados y sistemas de mitigación.

## 1 INTRODUCCIÓN

En principio, los movimientos de masa pueden ser detonados por sismos o por las lluvias. En Colombia y Brasil, al igual que en otros países, se ha comprobado que la mayor parte de los movimientos de masa son detonados por la lluvia. Existen varios trabajos que muestran que los deslizamientos ocurren cuando se presentan condiciones críticas de lluvia acumulada en el suelo (Okada et al, 1994, Echeverri y Valencia, 2004, Zêzere et al 2005, Moreno et al, 2006, Jaiswal y Van Westen, 2009). Estas relaciones han sido usadas en varias formas para la gestión de riesgos por ejemplo en la implementación de sistemas de alarma o de alerta temprana que se basan en la medición de la lluvia para la prevención de accidentes (Okada et al, 1994, Aristizábal et al, 2010). Sin embargo, el uso de estas relaciones para la evaluación cuantitativa del riesgo ha sido relativamente poco.

En este trabajo se realizó la evaluación del riesgo en carreteras considerado como la probabilidad de pérdidas anuales de vidas, usando relaciones de lluvia y movimientos de masa para determinar la amenaza y una metodología de estimación de riesgo presentada por Stewart et al. (2002).

La metodología usada para la evaluación de riesgo en este trabajo consiste de los siguientes pasos:

### 1.1 Estimación de la amenaza

La probabilidad anual de falla de cada uno de los taludes críticos de la carretera se estima a partir de datos estadísticos de precipitación y de ocurrencias de movimientos de masa. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Determinación de umbrales de falla para los movimientos de masa registrados considerando la relación de lluvia precedente de 15 días y lluvia antecedente de 5 días.
2. Cálculo la probabilidad anual de excedencia del umbral de falla comparando los datos medidos de precipitación con los resultados de evaluar las ecuaciones del umbral de falla para cada día de lluvia (usando la función de distribución de probabilidades de Poisson).
3. Calcular la probabilidad condicional de falla de un talud dado que el umbral de falla es excedido

$$P(D_S / R > R_T) = \frac{ND_S}{ND_T} \quad [1]$$

Donde:  $P(D_S/R > R_T)$  es la probabilidad condicional de que se presente un deslizamiento en el sitio ( $D_S$ ) dado que la precipitación diaria ( $R$ ) supera la precipitación correspondiente al umbral de falla ( $R_T$ ),  $ND_S$  es el número de veces que umbral fue excedido en el sitio evaluado y  $ND_T$  es el número total de veces que el umbral fue excedido en la vía completa.

4. Calcular la probabilidad temporal de falla (PT) como es recomendado por Jaiswal y Van Westen (2009)

$$PT = P(X > x) \cdot P(D_S / R > R_T) \quad [2]$$

## 1.2 Estimación de la vulnerabilidad

La Vulnerabilidad se estima siguiendo la metodología planteada por Stewart et al. (2002) que consiste básicamente en los siguientes pasos.

1. Calificar el indicador de probabilidad: en este paso se le atribuye un peso específico a la probabilidad de falla determinada en el paso anterior. Los valores se muestran en la Tabla 1.

2. Calificar la probabilidad temporal: este indicador califica la probabilidad de que un individuo o elemento se encuentre expuesto a la amenaza. En la Tabla 2 se presentan los índices a ser utilizados.

Tabla 1. Indicador de probabilidad de falla

L1	El evento puede, o es esperado que ocurra dentro de un corto periodo bajo circunstancias promedio, o el mecanismo está activo en el presente (dependiendo de las circunstancias un periodo corto pueden ser de días a no más de 2 o 3 años). La probabilidad anual indicativa es alrededor 0.9
L2	El evento puede, o es esperado que ocurra dentro de un periodo moderado (de unos pocos años a 30 años) o dentro del próximo periodo de inspección bajo condiciones ligeramente adversas. La probabilidad anual indicativa es alrededor 10-1
L3	El evento podría ser esperado que ocurra alguna vez dentro de un periodo de 100 años, en el normal curso de los eventos pero solo podría ocurrir dentro del próximo periodo de inspección bajo circunstancias adversas. La probabilidad anual indicativa es 10-2
L4	El evento podría no ser esperado para ocurrir dentro de un periodo de 100 años bajo condiciones normales y es improbable que ocurra dentro del próximo periodo de inspección excepto bajo condiciones muy adversas. La probabilidad anual indicativa es 10-3
L5	El evento podría no ser esperado para ocurrir dentro de un periodo de 100 años y es improbable que ocurra dentro del próximo periodo de inspección aún bajo condiciones muy adversas. La probabilidad anual indicativa es 10-4
L6	El evento es improbable que ocurra aún bajo condiciones extremas. La probabilidad anual indicativa es <10-5

3. Calificar la probabilidad de que se produzca una fatalidad: se le otorga peso relativo al nivel de preparación de un individuo o elemento que se encuentra expuesto. Los índices se presentan en la Tabla 3.

4. Calificar la escala de falla: La escala de la falla se determina por medio del volumen de material fallado o por el tamaño máximo de los bloques en el caso de caídas de roca y se califica de acuerdo con los parámetros de la Tabla 4.

5. Calificar la velocidad de falla: la velocidad del movimiento debe expresar la velocidad máxima esperada para el movimiento de masa. Ver la Tabla 5.

6. Calcular la magnitud del evento: se determina combinando las calificaciones de la escala del evento y de la velocidad de la falla, por medio de la matriz de la Tabla 6.

7. Clasificación de la amenaza: las calificaciones de la magnitud del evento y de la probabilidad de falla, producen la clasificación de la amenaza al combinarlas mediante la matriz de la Tabla 7.

## 1.3 Matriz de consecuencias

De la combinación de la vulnerabilidad y la probabilidad temporal mediante la matriz de la Tabla 8 se deriva una división en clases para las consecuencias, cuya descripción se presenta en la Tabla 9.

Tabla 2. Calificación de la probabilidad temporal.

T1	Usualmente se espera presencia de la persona como parte de la forma normal de uso (Ejemplo edificios residenciales, algunos edificios comerciales). Usuarios de la carretera en la condición más pesada de tránsito urbano ( $P > 0.5$ )
T2	Se espera que a menudo estén presente la persona como parte de la forma normal de uso (Ejemplo edificios residenciales, algunos edificios comerciales). Usuarios de las vías en las mayores arterias urbanas y en las vías rurales de tráfico más pesado ( $P = 0.1 - 0.5$ )
T3	Se espera que algunas veces esté presente la persona como parte de la forma normal de uso. Usuarios de las vías en muchas arterias urbanas y en las mayores arterias rurales ( $P = 0.01 - 0.1$ )
T4	Es improbable que esté presente la persona como parte de la forma normal de uso. Usuarios de las vías suburbanas y arterias rurales menores ( $P = 0.001 - 0.01$ )
T5	Es muy improbable que esté presente la persona. Usuarios de la mayoría de las vías de tráfico ligero, bermas de las vías etc. ( $P < 0.001$ )

## 1.4 Riesgo aceptable

En la mayoría de los casos, no existe consenso respecto al nivel de riesgo aceptable en carreteras debido a la gran cantidad de variables involucradas y la gran dependencia de la experiencia del profesional que realiza el análisis o de la práctica local.

Fell (1994) indica que de acuerdo con su experiencia, el público es capaz de aceptar riesgos relativamente altos en taludes naturales. En cifras, el autor concluye que el público puede aceptar valores de  $10^{-2}$  de riesgo anual específico de daños en sus propiedades y hasta  $10^{-3}$  de la pérdida de vida. Hace claridad el autor en que esto se propone a partir de sus trabajos en el área de Sydney-Newcastle en Australia. También indica que en el caso de taludes construidos por el hombre la aceptación pública del riesgo es menor y agrega que una probabilidad de

pérdidas de vidas no mayor que  $10^{-5}$  o  $10^{-6}$  puede ser lo esperado por el público.

Tabla 3. Calificación de la probabilidad de que haya una fatalidad.

V1	Persona al descubierto incapaz de evadir las caídas de rocas y otros detritos (movimientos extremadamente rápidos). Vehículo chocado contra un bloque mayor de 1 m de altura o perdido dentro de un hueco profundo y angosto a velocidad de autopista ( $P>0.5$ )
V2	Persona al descubierto puede ser capaz de evadir los detritos. Vehículo chocado contra un bloque de 0.5-1 m de altura a velocidad de autopista o mayor a 1 m de altura a velocidad urbana, o perdido dentro de un hueco angosto ( $P 0.1-0.5$ )
V3	La mayoría de la gente al descubierto puede evadir los detritos. Vehículo chocado contra un bloque de 0.5-1 m de altura a velocidad urbana, o un bloque $>1$ m de altura a baja velocidad. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seco o húmedo a velocidades de autopista ( $P=0.01-0.1$ )
V4	Vehículo choca contra bloques de alrededor de 0.2 m de altura a velocidad de autopista o un bloque de altura 0.5-1 m a baja velocidad. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seca o húmeda a velocidades urbana. ( $P 0.001-0.01$ )
V5	Vehículo choca contra bloques de alrededor de 0.2 m de altura a velocidad urbana o un bloque de tamaño menor a velocidad de autopista. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seco o húmedo a baja velocidad. a velocidades de autopista ( $P<0.001$ )

Nota: Velocidad de autopista=100-110 km/h, urbana=60-80 km/h, baja=20-30 km/h.

Tabla 4. Escala de la falla

	Volumen (m3)	Tamaño de bloque (m)
S1	$>20000$	1.0 (Dimensión mínima)
S2	$>2000$	1.0 (Dimensión máxima)
S3	$>200$	$<1.0$ (Dimensión máxima)
S4	$>20$	$<0.5$ (Dimensión máxima)
S5	$<20$	$<0.2$ (Dimensión máxima)

Tabla 5. Ponderación de la velocidad de falla

	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
R1	Extremamente rápido	$5 \times 10^3$	5 m/s
R1	Muy rápido	$5 \times 10^3$	5 m/s
R2	Rápido	$5 \times 10^1$	3 m/s
R3	Moderado	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/h
R4	Lento	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mes
R5	Muy lento	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/año
R5	Extremamente lento	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/año

En investigaciones realizadas en Australia (Wilson et al., 2005 y Stewart et al., 2002), se considera que la vulnerabilidad de las personas en las vías se da en dos niveles y se adoptó como criterio para determinar el nivel de riesgo, el denominado criterio de riesgo de vida para el talud proyectado. Este consiste de cinco niveles de riesgo evaluado, que se muestran en la Tabla 10 y que se

calculan sumando las probabilidades de muerte en el tramo de carretera analizado. En los estudios de Wilson et al. (2005) se usó como criterio el nivel NRE3, es decir que la suma de las probabilidades de muertes en el tramo de carretera debía ser inferior a  $10^{-5}$ .

Tabla 6. Calificación de la magnitud del evento

		Escala de la falla				
		S5	S4	S3	S2	S1
Rápido	R1	M3	M2	M2	M1	M1
	R2	M4	M3	M2	M2	M1
	R3	M4	M4	M3	M2	M2
	R4	M5	M4	M4	M3	M2
Lento	R5	M5	M5	M4	M4	M3

Tabla 7. Calificación de la amenaza

		Magnitud del evento				
Probabilidad		M5	M4	M3	M2	M1
L1		H3	H2	H2	H1	H1
L2		H4	H3	H2	H2	H1
L3		H4	H4	H3	H2	H2
L4		H5	H4	H4	H3	H2
L5		H5	H5	H4	H4	H3
L6		H5	H5	H5	H4	H4

Tabla 8. Matriz de consecuencias

		Probabilidad temporal de que un individuo esté presente en el momento de la falla				
Vulnerabilidad		T5	T4	T3	T2	T1
V1		C4	C3	C2	C1	C1
V2		C4	C3	C2	C1	C1
V3		C5	C4	C3	C2	C2
V4		C5	C5	C4	C3	C3
V5		C5	C5	C5	C4	C4

Usando el mismo sistema de análisis, Stewart & Buys (2005) indican que taludes con niveles de riesgo NRE1 y NRE2 generalmente deben ser remediados, aunque si en los sitios se presenta predominantemente riesgo de pérdidas económicas más que de vidas, se pueden implementar programas de manejo a largo plazo. Los sitios con niveles NRE3, que en principio no requieren remediación, pero en los cuales es posible que el nivel de riesgo se incremente con el tiempo, se debe implementar un sistema de manejo o de gerenciamiento. Para este último caso, el sistema de gerenciamiento puede ser de tipo genérico, pero en el caso de taludes de alto riesgo (niveles NRE1 y NRE2) se deben diseñar sistemas de manejo específicos para cada sitio. Estos autores también proponen que el objetivo de diseño de los sistemas de gerenciamiento y de remediación para vías existentes deben ser tales que permitan mantener el nivel de riesgo menor o igual que NRE3.

En el caso de obras nuevas, Stewart & Buys (2005) indican que gracias a los estudios realizados y en particular por los inventarios, actualmente en Australia se han introducido en los contratos exigencias para que el

nivel de riesgo de diseño sea NRE4 durante todo el periodo de diseño, 100 años, incluyendo obras de refuerzo y estabilización de taludes

Tabla 9. Calificación del nivel de consecuencias (Modificada de Stewart et al., 2002)

C1	Cierre total de una carretera troncal o doble calzada por un periodo extendido. Interrupción muy costosa. Costos de reparación muy altos. (costo directo e indirecto >\$1500M
C2	Cierre total de un carril de una carretera troncal o doble calzada o cierre total de una carretera secundaria por un periodo extendido. Grandes costos de la interrupción. Costos de reparación muy altos. (costo directo e indirecto >\$200M<1500M
C3	Cierre total de una carretera secundaria por un periodo corto, un periodo largo se puede aceptar si hay alternativas razonables disponibles. Costos de la interrupción y de reparación moderados. (costo directo e indirecto >\$50M<200 M
C4	Cierre total o parcial de una carretera secundaria por un periodo corto. Daños menores de infraestructuras o propiedades (Diferentes a carreteras). Costos menores de la interrupción y de reparación bajos. (costo directo e indirecto >\$10M<50 M
C5	Cierre total o parcial de una carretera terciaria por un periodo corto. Costos bajos o despreciables de la interrupción. Costos de reparación bajos o sin costos. (costo directo e indirecto <\$10M

### 1.5 Estimación del riesgo

El riesgo se calcula utilizando la matriz de estimación de riesgo. Ver la Tabla 10, presentada por Stewart et al. (2002).

Tabla 10. Niveles de riesgo evaluado (Wilson et al., 2005)

Nivel de riesgo evaluado	Probabilidad anual de muerte
NRE1	>3x10-3
NRE2	3x10-4 a 3x10-5
NRE3	3x10-5 a 3x10-6
NRE4	3x10-6 a 3x10-7
NRE5	<3x10-7

La matriz de nivel de riesgo estimado combina las ponderaciones de probabilidad y de consecuencias para determinar el nivel de riesgo estimado NRE (Nivel de Riesgo Estimado). En los casos en que las calificaciones de consecuencias para pérdidas de vidas y daños en propiedades difieren, la más alta de las dos es tomada para derivar NRE.

### 1.6 Toma de decisiones

Las decisiones respecto a la intervención se toman comparando el riesgo calculado en el paso 4.3 con los valores admisibles de la Tabla 9.

## 2 CASO DE ESTUDIO

La metodología fue utilizada para evaluar el riesgo en varios taludes de la Conexión Vial Aburrá-Cauca. Esta vía que une el valle de Aburrá con los municipios de san Jerónimo y de Santa Fé de Antioquia y que se une con la carretera que conduce a Urabá tiene una longitud de 39.4 km y consta de cuatro tramos. El primer tramo es una vía de una sola calzada que se inicia en la Carrera 80 de la ciudad de Medellín y llega hasta 200 m después del puente sobre la quebrada la Iguana en la abscisa km4+200, en el sector de San Cristóbal. El segundo tramo que es una vía de doble calzada, se inicia en la abscisa km4+200 y llega hasta el portal oriental del túnel Fernando Gómez Martínez, abscisa km9+100. El tercer tramo, corresponde al túnel de 4.6 km de longitud. El cuarto tramo es una carretera de una calzada y va desde el portal occidental del túnel, abscisa km13+700, hasta el puente de la antigua carretera al mar sobre el río Aurrá en la abscisa km39+400.

Tabla 11. Matriz de niveles de riesgo estimado

Probabilidad	Clases de consecuencias				
	C2	C4	C3	C2	C1
L1	NRE3	NRE2	NRE1	NRE1	NRE1
L2	NRE4	NRE3	NRE2	NRE1	NRE1
L3	NRE5	NRE4	NRE3	NRE2	NRE1
L4	NRE5	NRE5	NRE4	NRE3	NRE2
L5	NRE5	NRE5	NRE5	NRE4	NRE3
L6	NRE5	NRE5	NRE5	NRE5	NRE4

La vía comenzó a operar completamente en enero de 2006 y ha presentado problemas de estabilidad de taludes de forma casi permanente y en el periodo hasta el 31 de diciembre de 2009 se habían reportado 1485 eventos de movimientos de masa.

### 2.1 Estimación de la probabilidad de falla

Se determinó la probabilidad de falla en los tramos 2 y 4 que en adelante serán denominados sector oriental y sector occidental respectivamente. Para esto se elaboró una base de datos con los movimientos de masa registrados. En las Figuras 1 y 2 se muestra la variación temporal de los movimientos de masa en ambos sectores.

Igualmente se obtuvo datos de lluvia diaria total de dos (2) estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de Empresas Públicas de Medellín (EPM), con registros entre el primero de enero de 2006 y 31 de diciembre de 2009, como se observa en las Figuras 3 y 4. La localización de las estaciones se presenta en la Tabla 12.

Con los datos de movimientos de masa y de lluvia diaria se procedió a determinar los umbrales de falla para cada sector. Se evaluaron varias alternativas, seleccionando como umbral del sector, aquella que presentó la menor dispersión. En las Figuras 5 y 6 se presentan los umbrales obtenidos.

El umbral para el sector occidental propuesto en la Figura 5 se determinó considerando que los movimientos de masa se presentan para lluvias precedentes con

media 103.7 mm (coeficiente de variación 0.53) y lluvias antecedentes con media 47.4 mm (coeficiente de variación 0.79). Este umbral fue excedido por el 84.0% de los datos analizados y presenta la ecuación:

$$R_5 = 52 - 0,426R_{15} \quad (3)$$

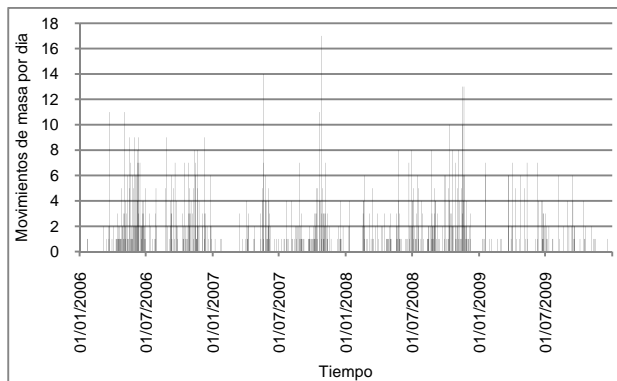


Figura 1. Distribución temporal de todos los movimientos de masa en el sector occidental.

Tabla 12. Localización de las estaciones climatológicas

Estación	Latitud	Longitud	Cota (m.s.n.m)
San Cristobal	6° 18' 49" N	75° 42' 09" W	1890
La Aldea	6° 20' 50" N	75° 42' 02" W	1638

Los resultados obtenidos para el sector occidental muestran que la relación que presenta menor dispersión es la establecida entre la lluvia antecedente de 5 días y la lluvia precedente de los 15 días previos a la lluvia antecedente. En el proceso se evidenció que la relación establecida entre la lluvia antecedente de 3 días y la precedente de 15 días difiere considerablemente de la presentada por Moreno et al. (2006) para el departamento de Antioquia, lo cual se puede explicar por el hecho de que los taludes analizados por ellos fueron laderas naturales y en este caso se trata de taludes de corte.

Para el sector oriental se consideró la totalidad de movimientos de masa registrados, con un número de 168 registros. El umbral propuesto (Figura 6) se terminó considerando que los movimientos de masa se presentan para lluvias precedentes con media 109.2 mm (coeficiente de variación 0.49) y lluvias antecedentes con media 46.5 mm (coeficiente de variación 0.69). Este umbral fue excedido por el 86.8% de los datos analizados y tiene la ecuación:

$$R_5 = 46 - 0,397R_{15} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos para el sector oriental mostraron que la relación que presenta menor dispersión es la establecida entre la lluvia antecedente de 5 días y la lluvia precedente de los 15 días previos a la lluvia

antecedente. En la evaluación se pudo constatar que la relación establecida entre la lluvia antecedente de 3 días y la precedente de 15 días difería considerablemente de la presentada por Moreno et al. (2006) para el departamento de Antioquia, lo cual se puede explicar por el hecho de que los taludes analizados por ellos fueron naturales y en este caso se trata de taludes de corte para carretera. Algo similar se observó cuando se compararon los resultados con la propuesta de umbral de Echeverri y Valencia, que fue elaborada para la misma cuenca (Quebrada La Iguaná) pero sobre taludes naturales (Hidalgo y Assis, 2010).

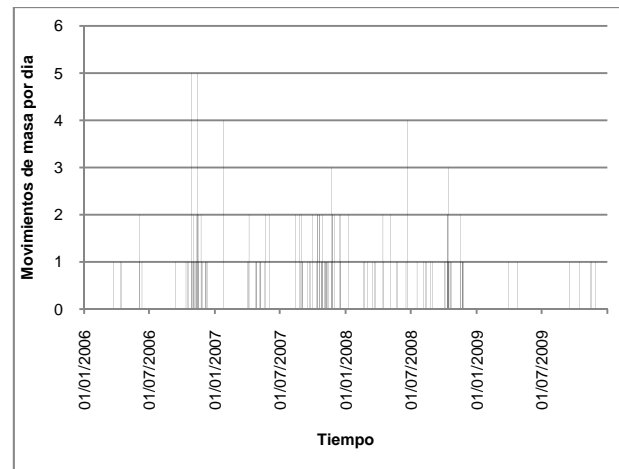


Figura 2. Distribución temporal de movimientos de masa en el sector oriental.

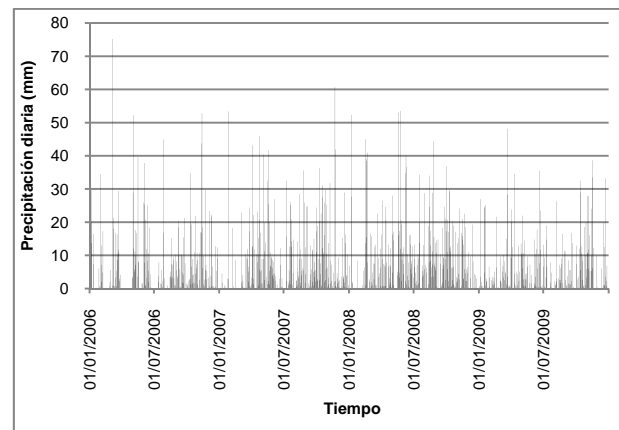


Figura 3. Registros de precipitación diaria en la estación San Cristóbal. Sector oriental.

Después de determinar el umbral, se calculó la probabilidad anual de excedencia, usando la aplicación de Excel para la función Poisson. En las Tablas 13 y 14 se presentan los resultados para los taludes que se consideraron críticos por presentar el mayor número de movimientos de masa en el sector occidental y oriental respectivamente.

Posteriormente, se calculó la probabilidad condicional de falla de un talud dado que el umbral de falla es excedido. En las Tablas 13 y 14 se presentan los

resultados para los taludes que se consideraron críticos en el sector occidental y oriental respectivamente.

Con los resultados anteriores se calcularon las probabilidades temporales de falla (PT) de acuerdo con la ecuación 2. En las Tablas 13 y 14 se presentan los resultados para los taludes que se consideraron críticos en el sector occidental y oriental respectivamente.

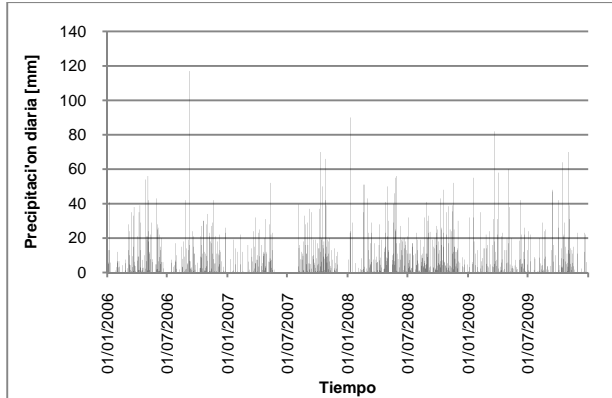


Figura 4. Registros de precipitación diaria en la estación La Aldea. Sector occidental.

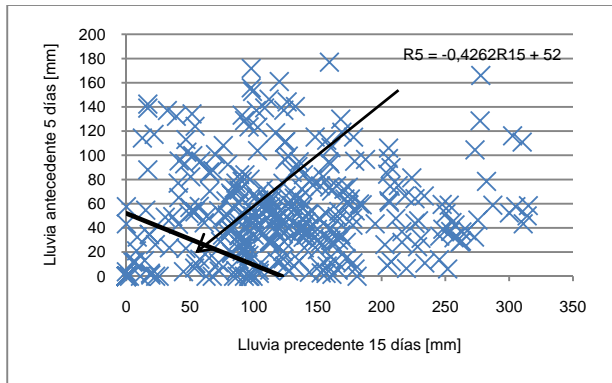


Figura 5. Umbral para el sector occidental en la condición de lluvia precedente de 15 días y antecedente de 5 días, sin caídas de roca.

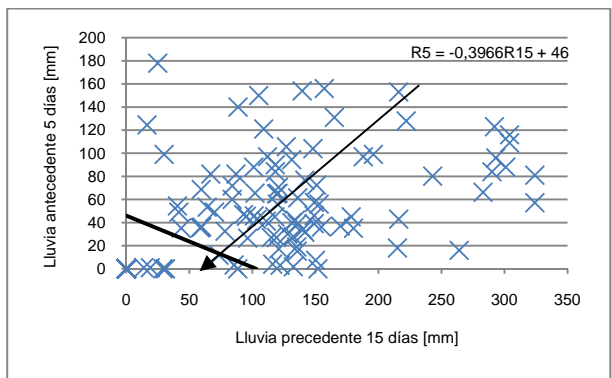


Figura 6. Umbral para el sector oriental en la condición de lluvia precedente de 15 días y antecedente de 5 días.

## 2.2 Estimación de la vulnerabilidad

Utilizando los índices de las Tablas 1 a 9 se realizó la estimación de la probabilidad de falla, la magnitud del evento, se clasificó la amenaza, se determinaron las consecuencias potenciales y se estimó el nivel de riesgo. Los resultados se presentan en las Tablas 15 a 18 para cada uno de los sitios de las Tablas 13 y 14.

## 2.3 Toma de decisiones

Considerando los resultados del análisis de riesgo y según los criterios definidos en la Tabla 10, los taludes con niveles de riesgo estimado NRE2, que corresponden a probabilidades anuales de que se presenten muertes de  $3 \times 10^{-4}$ , deben ser sometidos a procesos de manejo y de remediación que bajen la probabilidad por lo menos en un orden de magnitud. Los lugares que deben ser remediados específicamente son km26+400, km19+000, km20+000 y km26+700 en el sector occidental y km5+600 y km4+600 en el oriental.

Tabla 13. Probabilidad anual de excedencia y probabilidad temporal para el sector occidental

Abscisa	P(R>RT)	Número de eventos	P(L/R>RT)	PT
km26+400	1.0	130	0.160	0.160
km19+000	1.0	96	0.118	0.118
km20+000	1.0	65	0.080	0.080
km26+700	1.0	65	0.080	0.080
km28+050	1.0	10	0.012	0.012
km19+600	1.0	13	0.016	0.016
km17+500	1.0	11	0.014	0.014

Tabla 14. Probabilidad anual de excedencia y probabilidad temporal para el sector oriental

Abscisa	P(R>RT)	Número de eventos	P(L/R>RT)	PT
km5+600	1.0	18	0.11	0.11
km9+030	1.0	33	0.20	0.20
km4+200	1.0	5	0.03	0.03
km6+400	1.0	16	0.10	0.10
km4+400	1.0	8	0.05	0.05
km4+600	1.0	28	0.17	0.17

Los demás sitios deben ser sometidos a sistemas de monitoreo y gerenciamiento genéricos que permitan mantenerlos en los niveles actuales de riesgo.

Cabe anotar que en este análisis no se han incluido las caídas de roca, por lo cual algunos de los sitios que quedaron clasificados como NRE3 pueden pasar al nivel NRE2 si se incluyen dichos movimientos de masa que representan 375 de los movimientos que se presentaron en el sector occidental.

Dado que se poseían datos estadísticos, para esta vía fue posible determinar la probabilidad anual de que se presenten muertes a partir de la información estadística. Durante los 4 años de operación se han presentado 10

muerdes debidas a los movimientos de masa. Con estos datos, y usando la distribución de Poisson se establece que la probabilidad anual de que se produzca por lo menos una muerte dado que se presentan movimientos de masa es  $PM=0.71$ .

Tabla 15. Evaluación de vulnerabilidad para el sector occidental

Abscisa	Indicador de Probabilidad	Probabilidad temporal	Probabilidad de fatalidad	Escala de la falla	Velocidad de falla
km26+400	L2	T3	V3	S3	R2
km19+000	L2	T3	V3	S3	R2
km20+000	L2	T3	V3	S3	R2
km26+700	L2	T3	V3	S3	R2
km28+050	L3	T3	V3	S3	R2
km19+600	L3	T3	V3	S3	R2
km17+500	L3	T3	V3	S3	R2

Tabla 16. Evaluación de vulnerabilidad para el sector oriental

Abscisa	Indicador de Probabilidad	Probabilidad temporal	Probabilidad de fatalidad	Escala de la falla	Velocidad de falla
km5+600	L2	T3	V3	S3	R3
km9+030	L2	T3	V3	S3	R3
km4+200	L3	T3	V3	S3	R3
km6+400	L2	T3	V3	S3	R3
km4+400	L3	T3	V3	S3	R3
km4+600	L2	T3	V3	S3	R3

Con el anterior valor de probabilidad anual de que se presente una muerte por movimientos de masa y considerando las probabilidades condicionales de las Tablas 13 y 14 se obtienen los siguientes resultados (Tablas 19 y 20).

Los resultados del riesgo de muerte con base en los datos históricos muestran que en general todos los sitios presentan probabilidades anuales superiores a  $3 \times 10^{-3}$ , que corresponde al nivel de riesgo estimado NRE1. Esto implica que la metodología planteada pueda ser usada para este tipo de vías, pero se deben redefinir los parámetros referentes a la vulnerabilidad como la calificación de la probabilidad temporal y la probabilidad de fatalidad las cuales determinan la calificación de las consecuencias de las fallas. En las tablas 21 y 22 se presentan los resultados ajustados para el sector occidental, algo similar se obtuvo para el sector oriental pero por cuestión de espacio se omiten los resultados.

Este nuevo análisis implica que todos los sitios evaluados deben ser sometidos a procesos de remediación específicos ya que las probabilidades

anuales de pérdidas de vidas son en todos los casos superiores a  $3 \times 10^{-3}$ .

Tabla 17. Estimación del nivel de riesgo NRE para el sector occidental

Abscisa	Magnitud del evento	Clasificación de amenaza	Consecuencias	Nivel de riesgo estimado
km26+400	M2	H2	C3	NRE2
km19+000	M2	H2	C3	NRE2
km20+000	M2	H2	C3	NRE2
km26+700	M2	H2	C3	NRE2
km28+050	M2	H2	C3	NRE3
km19+600	M2	H2	C3	NRE3
km17+500	M2	H2	C3	NRE3

Tabla 18. Estimación del nivel de riesgo NRE para el sector oriental

Abscisa	Magnitud del evento	Clasificación de amenaza	Consecuencias	Nivel de riesgo estimado
km5+600	M3	H2	C3	NRE2
km9+030	M3	H2	C3	NRE2
km4+200	M3	H3	C3	NRE3
km6+400	M3	H2	C3	NRE2
km4+400	M3	H3	C3	NRE3
km4+600	M3	H2	C3	NRE2

Tabla 19. Riesgo de pérdida de vida en la carretera a partir de datos estadísticos

Abscisa	Número de eventos	$P(L/R > RT)$	PT	PM	Riesgo
km26+400	130	0.160	0.160	0.71	0.114
km19+000	96	0.118	0.118	0.71	0.084
km20+000	65	0.080	0.080	0.71	0.057
km26+700	65	0.080	0.080	0.71	0.057
km28+050	10	0.012	0.012	0.71	0.009
km19+600	13	0.016	0.016	0.71	0.011
km17+500	11	0.014	0.014	0.71	0.010

### 3 CONCLUSIONES

La metodología presentada, muestra una forma de estimar el riesgo de que se presenten fatalidades en una carretera, combinando el uso de umbrales de falla para determinar la amenaza y de calificaciones a diferentes variables de la vulnerabilidad de los usuarios de la carretera para establecerla.

Deben ser refinadas las descripciones de la exposición y las consecuencias para lograr una mejor aproximación de lo realizado y definir indicadores que puedan ser medibles y se disminuya la ambigüedad.

Los resultados obtenidos son coherentes con lo observado en los datos estadísticos, pero dado que las calificaciones son atribuidas a criterio del evaluador puede existir la tendencia a subvalorar la exposición y el impacto del movimiento de masa

Tabla 20. Probabilidad anual de excedencia y probabilidad temporal para el sector oriental

Abscisa	Número de eventos	P(L/R>R T)	PT	PM	Riesgo
km5+600	18	0.11	0.11	0.71	0.078
km9+030	33	0.20	0.20	0.71	0.142
km4+200	5	0.03	0.03	0.71	0.021
km6+400	16	0.10	0.10	0.71	0.071
km4+400	8	0.05	0.05	0.71	0.036
km4+600	28	0.17	0.17	0.71	0.121

Tabla 21. Ajustes a la evaluación de vulnerabilidad para el sector occidental

Abscisa	Indicador de Probabilidad	Probabilidad temporal	Probabilidad de fatalidad	Escala de la falla	Velocidad de falla
km26+400	L2	T2	V2	S3	R2
km19+000	L2	T2	V2	S3	R2
km20+000	L2	T2	V2	S3	R2
km26+700	L2	T2	V2	S3	R2
km28+050	L3	T2	V2	S3	R2
km19+600	L3	T2	V2	S3	R2
km17+500	L3	T2	V2	S3	R2

Tabla 22. Ajustes a la estimación del nivel de riesgo NRE para el sector occidental

Abscisa	Magnitud del evento	Clasificación de amenaza	Consecuencias	Nivel de riesgo estimado
km26+400	M2	H2	C1	NRE1
km19+000	M2	H2	C1	NRE1
km20+000	M2	H2	C1	NRE1
km26+700	M2	H2	C1	NRE1
km28+050	M2	H2	C1	NRE1
km19+600	M2	H2	C1	NRE1
km17+500	M2	H2	C1	NRE1

#### 4 REFERENCIAS

Aristizábal, E, Gamboa, M y Leoz, F. 2010. Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, Número 13, p. 155-169. Julio 2010.

Echeverri, O. y Valencia, Y. 2004. Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada la iguaná de la ciudad de Medellín a partir de la interacción lluvia-pendiente-formación geológica. *Dyna*, 71 (142): 33 - 45.

Fell, R. 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2): 261-272.

Hidalgo, C y Assis, A. 2010. Metodología para evaluación preliminar de riesgo en carreteras por deslizamientos detonados por lluvia. En *Memorias del XIII Congreso Colombiano de Geotecnia*, Manizales, Colombia, septiembre de 2010. Artículo 5.5.

Jaiswal, P. y Van Westen, C.J. .2009. Rainfall - based temporal probability for landslide initiation along transportation routes in Southern India. En: *Landslide processes : from geomorphologic mapping to dynamic modelling: proceedings of the landslide processes conference*, Strasbourg, France, 6-7 february 2009. / ed. by J.P. Malet, A. Remaitre and T. Bogaard - Strasbourg : European Centre on Geomorphological Hazards (CERG), pp 139-143.

Moreno, H.A., Vélez, M.A., Montoya, J.D. & Rhenals, R.L. 2006. La lluvia y los deslizamientos de tierra en antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, Número 5 p. 59-69. Medellín, Junio 2006.

Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H., Noguchi, T. & Samizo, M. 1994. Statistical risk estimating method for rainfall on surface collapse of a cut slope. *Soils and Foundations*, vol 34, No 3: 49-58.

Stewart, I. , Baynes, F. y Lee, I. 2002. The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1. *Aust Geomechanics*, 37(2): 115-148.

Stewart, I. & Buys, H. 2005. Managing slope risk for a large highway network. *Landslide Risk Management*. Edited by O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Eberhart. Taylor & Francis, p 599-607.

Wilson, R.A., Moon, A.T. y Hendrickx, M. 2005. Aplicación de quantitative risk assessment to the Laurence Hargrave Drive Project, New South Wales, Australia. *Landslide Risk Management*. Edited by O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Eberhart. Taylor & Francis. London. p 589-598

Zêrere, J.L., Trigo, R.M. y trig, I.F. 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural hazards and Earth Systems Sciences* 5:331-344.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico Del Brasil (CNPq) y a la Universidad de Medellín por el apoyo financiero de los estudios doctorales del primer autor, así mismo a la UnB y su Programa de Posgrado en Geotecnia.