

ANÁLISIS DE LA AMENAZA DE CAÍDA DE ROCAS A PARTIR DEL ESTUDIO DE HUELLAS DE IMPACTO SOBRE CARRETERAS

ANALYSIS OF ROCKFALL HAZARD FROM THE STUDY OF IMPACT MARKS ON THE ROADWAY

SERGIO ESTEBAN ROSALES GARZÓN

Est. Maestría , Universidad Nacional de Colombia-Medellín, serosale@unal.edu.co

ANDRÉS MAURICIO ÁLVAREZ ORTIZ

Est. Ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia-Medellín, amalvarezo@gmail.com

JULIO CESAR ORTIZ ZAPATA

Ing. civil , Universidad Nacional de Colombia-Medellín, jcozap@gmail.com

OSWALDO ORDÓÑEZ CARMONA

PhD, Msc., Professor, Universidad Nacional de Colombia-Medellín, oswaldo.geologo@gmail.com

Recibido para revisar Abril 4 de 2011, aceptado Septiembre 1 de 2011, versión final Septiembre 8 de 2011

RESUMEN: El presente artículo presenta una propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de caída de rocas en carreteras. El aporte principal de este trabajo es medir y analizar las huellas que han quedado impresas sobre el pavimento asfáltico de la vía producto de impactos antiguos de bloques de roca y con esta información evaluar la amenaza histórica sobre la vía, paralelamente se procede a determinar la amenaza actual a partir de técnicas convencionales de mecánica de rocas para finalmente integrando las dos fuentes de información conocer con mayor certeza la magnitud y localización de la amenaza a lo largo del tramo en estudio. Como ejemplo de aplicación se presenta el caso del sector “La Volcana” ubicado sobre el K 16+300 de la conexión vial Guillermo Gaviria Correa, que comunica a la Ciudad de Medellín con el municipio de Santa Fé de Antioquia en el departamento de Antioquia - Colombia.

PALABRAS CLAVE: Caída de rocas, pavimento asfáltico, y mecánica de rocas.

ABSTRACT: This paper presents a methodology for the rockfall hazard assessment along roads. The main contribution of this work is to measure and analyze the marks that have been printed on the asphalt pavement, product of previous impacts of rock blocks, and take this information to assess the historical threat, once consolidated the historic threat, from the marks study, we obtained the current threat, using conventional techniques of rock mechanics and finally by integrating the two sources of information, obtain a more accurately knowledge of the magnitude and location of the threat along the road section under study. As a case study is presented the area known as “La Volcana”, located on K 16+300 of the Guillermo Gaviria Correa road, which connects the city of Medellín with the municipality of Santa Fé de Antioquia in Antioquia Department - Colombia.

KEYWORDS: Rockfall, asphalt pavement and rock mechanics.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de mega proyectos viales en Colombia, y el uso desmedido de grandes cortes en cajón, carentes de manejo técnico adecuado, han venido alterando las condiciones naturales de las montañas, liberándose de forma descontrolada y acelerada las tensiones *in-situ* de los macizos rocosos, situación que desencadena en la aparición de zonas de alto riesgo de caída de rocas y deslizamientos que amenazan la vida y bienes de los usuarios de las vías.

El análisis de caída de bloques de roca se estudia por medio de técnicas que permiten obtener una probable trayectoria del bloque, desde su desprendimiento hasta su ubicación final. Adicionalmente, otras variables como la energía y velocidad del impacto, pueden ser observadas. Este proceso físico de caída de rocas obedece a las leyes de Newton y a la teoría de colisiones o choques [4]. Programas comerciales como *RocFall* permiten el desarrollo matemático de estas leyes y teorías, facilitando el cálculo de las trayectorias más probables de la caída de bloques de roca para ciertas condiciones iniciales conocidas [2].



Figura 1. Talud sobre la margen derecha de la carretera en dirección Medellín – Santa Fe de Antioquia.

El objetivo de este trabajo es cruzar la amenaza actual de caída de rocas en determinado tramo de vía, con la amenaza histórica, y a partir de este cruce de información establecer con mejor precisión la magnitud del riesgo en la zona de estudio. La amenaza actual se evaluó por estimación del volumen de los bloques de roca sobre el talud, que exhiben alta probabilidad de desprenderse. Esta técnica se apoya en el estudio estadístico del espaciamiento entre discontinuidades de todas las familias de discontinuidades del macizo rocoso [1]. Una vez evaluado el volumen del bloque de roca y conocida su posición respecto a la vía, se calculó la magnitud de la amenaza a través del programa *RocFall*. Por su parte, la amenaza histórica se midió por medio del levantamiento *in-situ* y posterior análisis de las huellas de impacto de caídas de rocas sobre el pavimento asfáltico de la vía, siguiendo la metodología propuesta en este trabajo.

2. UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la vía que une a Medellín con Santa fe de Antioquia, en el sector de “La Volcana” (figura 1 y 3). Se localiza sobre el granito Néisico de Palmitas; la roca presente tiene una composición de cuarzo y ortoclasa, con concentraciones de biotita; además de plagioclasa en menor cantidad, este cuerpo ígneo tiene una estructura néisica, muy marcada por la orientación de agregados de biotita.

En la margen izquierda, los buzamientos de las diaclasas son favorables a la estabilidad; no obstante, hay desprendimientos de bloques aproximadamente

cúbicos, de hasta 90 cm de lado. Este corte tiene una altura aproximada de 20 m, con una pendiente entre 60° y 70° (figura 2).



Figura 2. Talud sobre la margen izquierda de la carretera en dirección Medellín – Santa Fe de Antioquia.

En la margen derecha, se observa flujo constante de agua, proveniente de la cima del talud; los buzamientos de las diaclasas son desfavorables a la estabilidad (estando orientados en dirección a la banca de la vía), lo cual, genera cuñas de gravedad que desprenden rocas con volumen de hasta 2 m³. Ésta margen tiene una pendiente entre 70° y 80°, y una altura máxima de 50 m, incluyendo una terraza sobre la cual pasa la desviación hacia el corregimiento de Palmitas, a una altura de 20 m (figura 1).

3. TRABAJO DE CAMPO Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA ACTUAL CON *ROCFALL*

En una primera etapa, se levantó la topografía detallada del terreno y los nichos de desprendimiento (área del nicho y volumen de bloques con alta probabilidad de desprenderse [1]); un nicho de desprendimiento es un sector del talud donde se identifica un riesgo alto de desprendimiento de bloques, por ejemplo, la superficie vertical, expuesta, de un macizo rocoso muy fracturado y relajado, donde se encuentran bloques de roca sueltos y en precarias condiciones de estabilidad [1]. La segunda etapa de mediciones, se concentró en el levantamiento de las huellas de impacto de bloques de roca sobre el pavimento asfáltico, en especial, se levantó la penetración máxima del bloque y la geometría del contorno de la huella sobre el pavimento asfáltico, la figura 4 muestra la técnica usada.

Toda la información anterior fue levantada registrando datos cada 2 m dentro de los 176 m de longitud total del tramo en estudio, estas medidas quedaron referenciadas a un abscisado base adoptado convenientemente para este trabajo.

Una vez consolidada la información de campo, se analizaron con la ayuda del programa *RocFall* las

trayectorias (análisis bidimensional) de caída, para cada sección transversal a la vía, analizando secciones cada 2 m dentro del tramo en estudio, para esto, se realizó un análisis estadístico aleatorio [12], para finalmente obtener la energía cinética y la velocidad de impacto máxima sobre la rasante de la vía. En la tabla 1 se presenta la caracterización de la amenaza a lo largo de la zona de estudio.

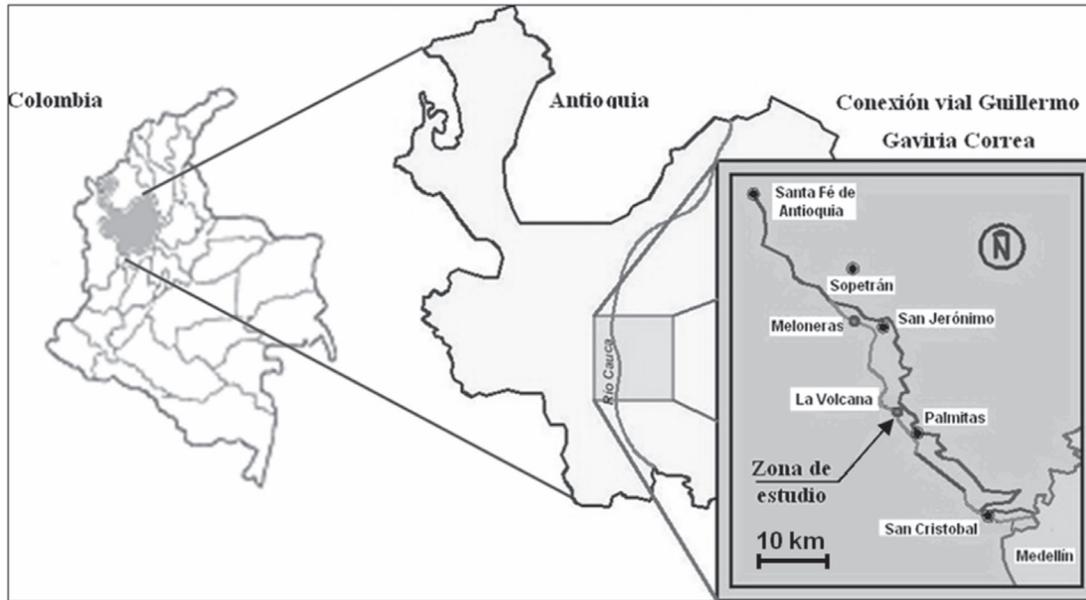


Figura 3. Localización de la zona de estudio.



Figura 4. Medición de la profundidad de la huella (K 0+136).

Tabla 1. Caracterización de la amenaza actual. Ec_{max} : Energía cinética máxima, Vf_{max} : velocidad final máxima.

Abscisa	Ec_{max} (kJ)	Vf_{max} (m/s)	Abscisa	Ec_{max} (kJ)	Vf_{max} (m/s)
K 0+000	0	0	K 0+102	222	22,2
K 0+002	0	0	K 0+104	464	21,5

Abscisa	Ec_{max} (kJ)	Vf_{max} (m/s)	Abscisa	Ec_{max} (kJ)	Vf_{max} (m/s)
K 0+004	0	0	K 0+106	393	21,3
K 0+006	0	0	K 0+108	1016	18,5
K 0+008	0	0	K 0+110	837	13
K 0+010	0	0	K 0+112	425	20,9
K 0+012	14	3,7	K 0+114	0	0
K 0+014	0	0	K 0+116	537	22,4
K 0+016	160	7	K 0+118	452	21,2
K 0+018	75	7,5	K 0+120	641	16
K 0+020	140	11,8	K 0+122	227	15,7
K 0+022	14	6,7	K 0+124	258	16,5
K 0+024	10	4,8	K 0+126	1057	16,7
K 0+026	200	22,2	K 0+128	14	2
K 0+028	85	23,15	K 0+130	103	21,2
K 0+030	92	22,5	K 0+132	2	3,9
K 0+032	20	22,3	K 0+134	2172	20,9
K 0+034	70	18,4	K 0+136	37	3,6
K 0+036	47	7,4	K 0+138	0	0
K 0+038	0	0	K 0+140	0,3	1,3
K 0+040	0	0	K 0+142	164	18,3

Abscisa	$E_{c_{max}}$ (kJ)	Vf_{max} (m/s)	Abscisa	$E_{c_{max}}$ (kJ)	Vf_{max} (m/s)
K 0+042	4	6,5	K 0+144	125	18,4
K 0+044	10	4,7	K 0+146	53	17,4
K 0+046	14	3,8	K 0+148	7	7,3
K 0+048	153	14,5	K 0+150	0	0
K 0+050	0	0	K 0+152	0	0
K 0+052	25	9,3	K 0+154	1	3
K 0+054	420	21,4	K 0+156	1	3,7
K 0+056	0	0	K 0+158	0	0
K 0+058	43	6,5	K 0+160	1	2,9
K 0+060	318	17,8	K 0+162	0	0
K 0+062	51	10,2	K 0+164	0	0
K 0+064	35	8	K 0+166	0	0
K 0+066	50	7,6	K 0+168	0	0
K 0+068	172	10,5	K 0+170	0,8	1,4
K 0+070	97	7,6	K 0+172	0,01	0,08
K 0+072	752	13,7	K 0+174	3	2,2
K 0+074	192	9,2	K 0+176	0,7	1,2
K 0+076	189	9,4			
K 0+078	165	7,5			
K 0+080	73	8,5			
K 0+082	53	4,4			
K 0+084	36	4			
K 0+086	42	4,6			
K 0+088	62	20,3			
K 0+090	36	15,5			
K 0+092	45	17,2			
K 0+094	0	0			
K 0+096	0	0			
K 0+098	0	0			
K 0+100	590	20,7			

4. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA PASADA

Este artículo busca presentar una metodología para evaluar aproximadamente la energía máxima que tuvo lugar durante eventos pasados de caída de bloques de roca, lo anterior a partir del análisis de las huellas dejadas por estos eventos sobre el pavimento asfáltico de la vía. Esta evaluación de la amenaza permite un registro histórico indirecto de los eventos ocurridos durante los años de servicio del pavimento en la zona de estudio. Para “La Volcana”, caso estudiado en este trabajo, se tiene un pavimento de 5 años de antigüedad,

y en consecuencia, un registro histórico que cubre los eventos máximos ocurridos en un periodo aproximado de 5 años.

Para lograr lo anterior, se midió la mayor huella dentro de pequeñas zonas de 2,0 metros de largo, por el ancho de banca, a todo lo largo del abscisado base, registrándose información de la geometría del contorno (T: triangular o C: semicircular) y la profundidad máxima. La profundidad de la huella es importante ya que como se puede inferir de forma intuitiva, esta es directamente proporcional a la energía transmitida durante el impacto, sin embargo, se sabe por trabajos como los de Li y Chen [7] que la forma del bloque en el punto del contacto también tiene influencia, así que se establecieron dos categorías para considerar la geometría del contorno de la huella. La primera corresponde a una geometría triangular, la cual da cuenta del impacto de un bloque aproximadamente cúbico cayendo sobre uno de sus vértices o filo. Y la segunda categoría denominada semicircular, para incluir el resto de geometrías de contorno encontradas. Las huellas de contorno triangular corresponden a un evento que requirió menos energía para lograr la misma penetración que un bloque en similares circunstancias pero que cayó sobre uno de sus lados plano o curvo (figuras 5 y 6). A continuación, se presenta la información recolectada en campo y que permite evaluar la amenaza ya ocurrida sobre la zona de estudio durante los pasados 5 años (Tabla 2).

Tabla 2. Levantamiento de huellas sobre el pavimento asfáltico.

Abscisa	Forma	Penetración máxima (cm)	Abscisa	Forma	Penetración máxima (cm)
K 0+000	-	0	K 0+092	T	5
K 0+002	-	0	K 0+094	C	4
K 0+004	C	1	K 0+096	C	2
K 0+006	C	1	K 0+098	C	1
K 0+008	C	2	K 0+100	C	1
K 0+010	T	3	K 0+102	C	0,5
K 0+012		0	K 0+104	C	1
K 0+014	C	1	K 0+106	C	1
K 0+016	C	1	K 0+108	T	2
K 0+018	C	2	K 0+110	C	1
K 0+020	C	1	K 0+112	C	0,5

Abscisa	Forma	Penetración máxima (cm)	Abscisa	Forma	Penetración máxima (cm)
K 0+022	C	1	K 0+114	C	1
K 0+024	C	1	K 0+116	C	1
K 0+026	C	1	K 0+118	C	1
K 0+028	C	1	K 0+120	C	0,5
K 0+030	C	1	K 0+122	C	1
K 0+032		0	K 0+124	C	1
K 0+034	C	3	K 0+126	C	0,5
K 0+036	C	2	K 0+128	C	0,5
K 0+038	C	2	K 0+130	C	4
K 0+040	C	2	K 0+132	C	4
K 0+042	T	3	K 0+134	C	4
K 0+044	C	1	K 0+136	T	7
K 0+046	C	2	K 0+138	C	4
K 0+048	C	3	K 0+140	C	4
K 0+050	C	2	K 0+142	C	0,5
K 0+052	C	3	K 0+144	C	0,5
K 0+054	T	2	K 0+146	C	0,5
K 0+056	T	3	K 0+148	C	0,5
K 0+058	T	2	K 0+150	C	0,5
K 0+060	C	2	K 0+152	T	0,5
K 0+062	C	2	K 0+154	T	0,5
K 0+064	C	5	K 0+156	T	1
K 0+066	C	4	K 0+158	C	0,5
K 0+068	C	2	K 0+160	C	0,5
K 0+070	C	1	K 0+162	-	0
K 0+072	C	1	K 0+164	-	0
K 0+074	C	0,5	K 0+166	-	0
K 0+076	C	5	K 0+168	-	0
K 0+078	C	1	K 0+170	-	0
K 0+080	T	4	K 0+172	-	0
K 0+082	T	5	K 0+174	-	0
K 0+084	T	5	K 0+176	-	0
K 0+086	T	5			
K 0+088	T	5			
K 0+090	T	4			

5. ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA DE IMPACTO A PARTIR DE LAS HUELLAS

La penetración máxima de un bloque impactando sobre determinado material, es un tema que ha sido estudiado

experimentalmente por varios autores como Tolch y Bushkovitch [13], Maurer [8], Montani [9], Hakala [5], Forrestal *et al.* [3], y Li y Chen [7] entre otros. Para los cálculos en este trabajo se adapta la expresión (2) de Pichler *et al.* [11] para impactos sobre un vértice y se adopta la de Tolch y Bushkovitch [13] para el caso de impactos sobre lado curvo o superficies de contacto diferentes a vértice.

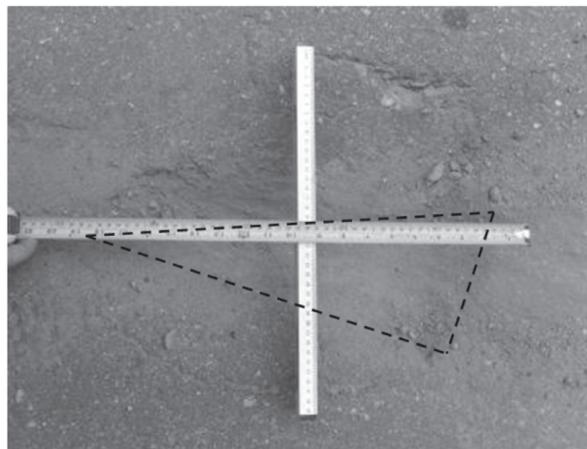


Figura 5. Huella típica de contorno triangular.

Para el cálculo de la penetración (X) de bloques aproximadamente cúbicos impactando sobre uno de sus vértices o filo, se requieren los siguientes parámetros:

ρ_s = densidad del material impactado, en nuestro caso pavimento asfáltico y se usa una densidad media de 2400 kg/m^3 .

ρ_{roc} = densidad de la roca, para el caso en estudio se usa una densidad media de 2700 kg/m^3 .

R = Resistencia del material impactado a la penetración y para este estudio se estima en 98 MPa (se define por interpolación lineal entre $1 \text{ MPa} - 5 \text{ MPa}$ para suelo fino y $200 \text{ MPa} - 250 \text{ MPa}$ para roca sana y usando como base de interpolación la densidad de estos materiales límite y la densidad del pavimento asfáltico).

d = diámetro del bloque (m). Para el caso del cálculo de la penetración de bloques que impactan sobre su lado curvo se adopta la aproximación de concentrar la masa en una esfera, en este caso el diámetro d corresponde al diámetro de la esfera equivalente que contiene exactamente la masa en estudio. Para el caso de bloques aproximadamente cúbicos que impactan

sobre su vértice se usa la formulación de Pichler *et al.* [11] (1).

$$d = 1,05\sqrt[3]{V} \quad (1)$$

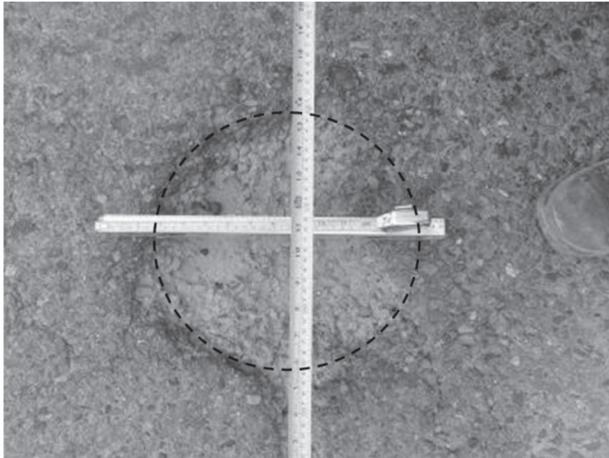


Figura 6. Huella típica de contorno semicircular.

Donde V es el volumen del bloque.

Las constantes usadas son:

$k = 1,257$ (constante calculada por Pichler para bloques cúbicos impactando sobre el vértice).

$B = 1,2$ (parámetro de compresibilidad adimensional del material impactado, que varía muy poco para diferentes materiales, se usa el de gravas muy densas).

En el análisis de huellas sobre el pavimento asfáltico, se pudo observar, que en su totalidad corresponden a impactos de baja penetración, (menores a 10 cm) por lo que se usa la siguiente fórmula propuesta por Pichler para calcular la penetración máxima, esta fórmula es válida solo para relaciones X/d menores o iguales a 1,257.

$$\frac{X}{d} = \sqrt{\frac{1 + k\pi/4N}{1 + I/N} \frac{4k}{\pi} I} \quad \text{for } \frac{X}{d} \leq k \quad (2)$$

X denota la profundidad de penetración, N es una función que caracteriza la agudeza de la punta del punto de contacto durante el impacto, e I es la función de impacto que describe su intensidad. La función de geometría N se define como:

$$N = \frac{m}{\rho_s d^3 B N^*} \quad (3)$$

Donde m denota la masa del bloque que impacta, ρ_s es la densidad del material impactado, N^* es el factor de forma de la nariz del bloque, la función de impacto por su parte se define como:

$$I = \frac{mv_0^2}{Rd^3} \quad (4)$$

Donde v_0 es la velocidad del impacto, para la velocidad final del impacto se supone que es la misma evaluada en el análisis de *RocFall* para cada sección a lo largo de la vía, esta suposición se considera aceptable si se tiene en cuenta que la velocidad de impacto depende fundamentalmente de la altura desde donde se desprende el bloque y de los coeficientes de restitución de las superficies donde este rebota, y estos parámetros son constantes e independientes del tipo de análisis.

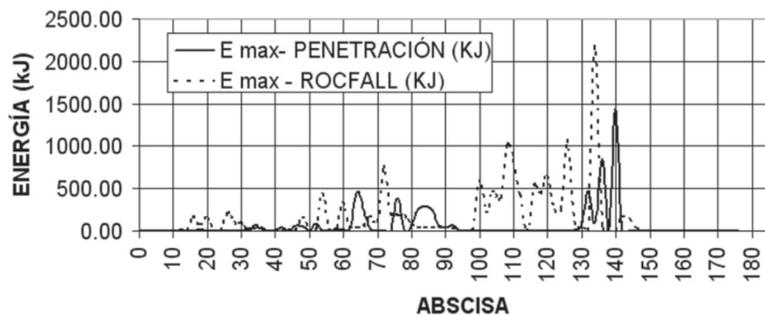


Figura 7. Energía cinética de impacto a lo largo del tramo en estudio, calculadas a partir de *RocFall* y análisis de huellas.

Para el caso de impactos de bloques irregulares cuya huella se aproxima a una circunferencia se usa la expresión de Tolch y Bushkovitch [13], que se presenta a continuación, y que fue calibrada para impactos sobre rocas blandas, que por analogía de propiedades

mecánicas se adopta para este trabajo para impactos sobre pavimentos asfálticos:

$$Xp = 0,001d\rho_{sc}Vs \quad (5)$$

Donde X_p corresponde a la penetración del bloque, d es el diámetro de la esfera equivalente que impacta el material objetivo, V_s es la velocidad del bloque tal como se definió atrás y ρ_{sc} queda definida por la siguiente expresión:

$$\rho_x = \frac{6W}{(\pi d^3 \rho_s)} \quad (6)$$

Donde W es el peso del bloque de roca, ρ_s es la densidad del acero y d es el diámetro de la esfera equivalente de la masa que impacta.

A partir de las expresiones empíricas adoptadas y explicadas en párrafos anteriores se procedió a despejar la energía requerida para producir determinadas penetraciones conocidas (levantadas en campo), y con base en esto, se dibujaron las siguientes curvas que muestran la variación de la energía cinética a lo largo del tramo en estudio (figura 7).

En la figura 7 se muestra simultáneamente, la curva de la energía inferida por medio del análisis de huellas y la curva de la energía estimada por medio del análisis bidimensional de trayectorias de caída, evaluada con la ayuda del programa *RocFall*.

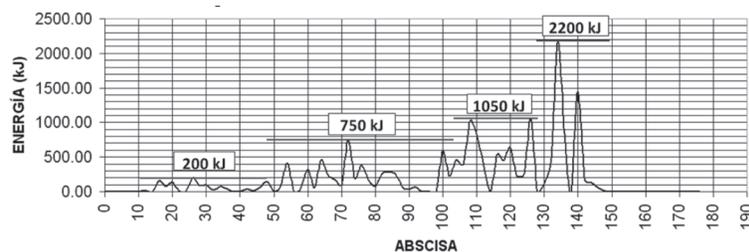


Figura 8. Envolvente de la Energía cinética de impacto a lo largo del tramo en estudio, calculadas a partir del programa *RocFall* y análisis de huellas.

6. FORMULAS EMPÍRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA DE IMPACTO A PARTIR DE LAS HUELLAS

La idea general desarrollada en numerales anteriores permite plantear también una sencilla formulación que ayuda a evaluar en campo, y previo estudios más detallados, el nivel de energía cinética de impacto máximo que podría haber soportado determinado sector de la vía, esta información es de fácil acceso en una primera visita de reconocimiento y es útil para

De la figura 7 se puede concluir que puntos en los que la energía de la amenaza actual es menor a la energía de la amenaza ya ocurrida, representan zonas en las cuales ya ocurrieron los eventos de caída de rocas más grandes que se podían esperar en dicho punto. En contraste con lo anterior, en otros puntos (la mayor parte del tramo en estudio) se observa que la energía de la amenaza actual supera la energía máxima hasta ahora ocurrida en el sitio, esto permite concluir que aún esta vigente la mayor parte de la amenaza a lo largo del tramo en estudio, es decir que se deben esperar desprendimientos de roca con la misma frecuencia como han venido ocurriendo, y además, es muy probable que la energía de estos eventos aumente con el tiempo. El desfase observado entre los picos de ambas curvas (figura 7) se puede explicar por la falta de un análisis tridimensional de las trayectorias de caída de rocas.

Finalmente, se debe consolidar la curva de energía máxima en una sola curva que caracteriza la amenaza máxima esperada en la zona, y que sirve de base para dimensionar la solución de mitigación. Para esta curva final, considerando las incertidumbres y suposiciones involucradas en el proceso [6] se recomienda trabajar con la envolvente máxima (figura 8) de las curvas de amenaza pasada y actual (figura 7).

obtener una primera aproximación de la magnitud de la amenaza de caída de rocas que se desea resolver. Para las siguientes formulas (7 y 8), deducidas por medio de análisis inverso a partir de la expresión (2) de Pichler *et al.* [11] para impactos sobre un vértice y la expresión (5) de Tolch y Bushkovitch [13] para el caso de impactos sobre lado curvo o diferente a vértice, también aplican las suposiciones y aproximaciones esbozadas en este artículo, sin embargo, considerando que lo que se pretende es obtener un primer orden de magnitud del problema en general, se consideran válidas para vías con pavimento asfáltico.

$$E_T = 2 \frac{X^3}{\sqrt{H}} \tag{7}$$

Donde E_{c_T} corresponde a la energía cinética máxima estimada en kilojulios (kJ) para un bloque aproximadamente cúbico que cae sobre uno de sus vértices o sobre un filo (contorno de huella triangular o con tramos rectos y largos), H es la altura de caída libre equivalente del bloque (m) y X es la penetración máxima del bloque (cm). La gráfica de la figura 9 presenta la fórmula (7) evaluada para tres alturas de caída libre del bloque particulares, se puede apreciar la tendencia exponencial que relaciona la profundidad de la penetración del bloque con la energía del impacto.

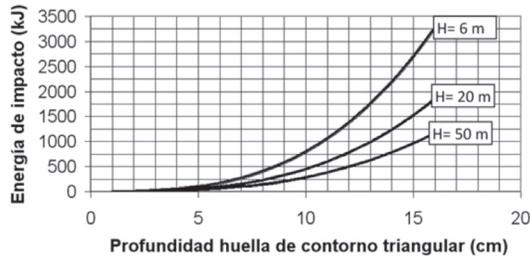


Figura 9. Curvas: energía cinética (kJ) vs. Penetración máxima del bloque aproximadamente cúbico (cm).

La gráfica de la figura 9 tiene la misma utilidad que la ecuación (7), ya que permite inferir la energía que produjo una determinada huella sobre el pavimento asfáltico conociendo la altura aproximada desde la cual cayó el bloque y la forma de la huella.

Siguiendo la misma metodología, pero esta vez, para un bloque semiesférico cayendo sobre uno de sus lados curvos, (huella semicircular) se puede deducir la siguiente expresión:

$$E_c = 6,5 \frac{X^3}{\sqrt{H}} \tag{8}$$

Donde E_{c_c} corresponde a la energía cinética máxima estimada en kilojulios (kJ), H es la altura de caída libre equivalente del bloque (m) y X es la penetración máxima del bloque (cm). La gráfica de la figura 10 presenta la fórmula (8) evaluada para tres alturas de caída libre del bloque particulares, se puede apreciar la tendencia exponencial que relaciona la profundidad de la penetración del bloque con la energía del impacto.

La gráfica de la figura 10 tiene la misma utilidad que la ecuación (8), ya que permite inferir la energía que

produjo una determinada huella sobre el pavimento asfáltico, conociendo la altura aproximada desde la cual cayó el bloque y la forma de la huella.

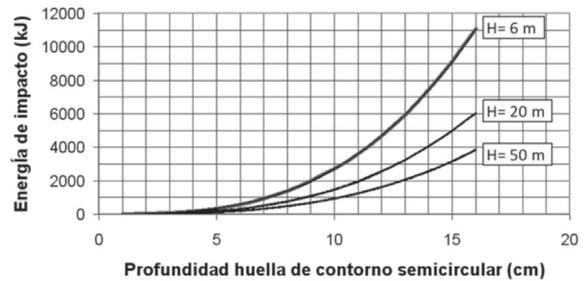


Figura 10. Curvas: energía cinética (kJ) vs. Penetración máxima del bloque aproximadamente esférico (cm).

7. CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para analizar la amenaza histórica de caída de rocas, fundamentada en el estudio de las huellas de impacto de roca sobre el pavimento asfáltico. Se demostró como esta metodología puede ser usada complementariamente con otras metodologías convencionales, como las de análisis de trayectorias, para mejorar el conocimiento del fenómeno de caída de rocas y perfeccionar con esto la evaluación y localización de la amenaza.

Del análisis de caída de rocas en el sector “La Volcana” se puede concluir que es recomendable una intervención para mitigar la amenaza identificada, como intervención se recomienda la construcción de un falso túnel, ya que, considerando los niveles de energía evaluados y la dificultad que ofrece el sector, es poco factible pensar en otras soluciones (idea que fue presentada por Ordóñez *et al.* [10]). Para facilitar el dimensionamiento de la solución de mitigación propuesta, se calcularon las siguientes constantes empíricas, a partir de la metodología de análisis presentada en este trabajo (Tabla 3):

Tabla 3. Evaluación de la amenaza de caída de rocas a lo largo del tramo en estudio.

Abscisa		L (m)	E _{max} (kJ)	V (m/s)	m (kg)
Inicial	Final				
K 0+010	K 0+050	40	200	22,2	812
K 0+050	K 0+105	55	750	13,7	7992
K 0+105	K 0+128	23	1050	16,7	7530
K 0+128	K 0+150	22	2200	20,9	10073

Adicionalmente, se logró deducir por análisis inverso, y a partir de la expresión (2) de Pichler, *et al.* [11] y la expresión (5) de Tolch y Bushkovitch [13], dos ecuaciones de orden empírico, que permiten calcular el orden de magnitud de la energía cinética máxima involucrada en los eventos de caída de rocas pasados, a partir de la observación de las huellas sobre el asfalto y la altura de caída libre equivalente aproximada (7 y 8).

REFERENCIAS

- [1] Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J. y Amigó, J., Estimación de la eficacia de las protecciones contra caída de bloques, *Revista de Obras Públicas*, 3394, pp. 37-48, 2000.
- [2] Falcetta, J., Un nouveau modèle de calcul de trajectories de blocs rocheux, *Revue Française de Géotechnique*, 30, pp. 1-80, 1985.
- [3] Forrestal, M.J., Altman, B.S., Cargile, S.J. and Hanchak, S.J., An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets, *International Journal of Impact Engineering*, 15(4), pp. 395–405, 1994.
- [4] Goldsmith, W., *Impact, The theory and physical behavior of colliding solids*, Edward Arnold. London, 1960.
- [5] Hakala, W.W., *Resistance of a granular medium to normal impact of a rigid projectile*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg VA, 1965.
- [6] Labiouse, V and, Descoedres, F., Possibilities and difficulties in predicting rockfall trajectories, *Joint Japan-Swiss scientific Seminar on impact load by rock falls and design of protection structures*, Kanazawa, 1999.
- [7] Li, Q.M. and Chen, X.W., Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, *International Journal of Impact Engineering*, 28, pp. 93-116, 2003.
- [8] Maurer, W.C., *Impact crater formation in sandstone and granite*, Master's Thesis, Colorado School of Mines, 1959.
- [9] Montani, S., *Sollicitation dynamique de la couverture des galleries de protection lors de chutes de blocs*. PhD Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, 1998.
- [10] Ordóñez, O., Henao, D., Arenas, M., Fuertes, W., Renjifo, J. y González, J. *Falsos túneles en el corredor vial Valle de Aburrá – Río Cauca*, Primer Simposio Suramericano de Excavaciones en Roca, Bogotá, Colombia, 2008.
- [11] Pichler, B., Hellmich, CH. and Mang, H.A., Impact of rocks onto gravel. Design and evaluation experiments, *International Journal of Impact Engineering*, 31, pp. 559-578, 2005.
- [12] Rocscience, *Statistical Analysis of Rockfalls, RocFall User's Guide*, Available: <http://www.rocscience.com>, [citado 8 de septiembre de 2011]
- [13] Tolch, N.A. and Bushkovitch, A.V., *Penetration and crater volume in various kinds of rocks as dependent on caliber, mass and striking velocity of projectile*, BRL Report no. 641. UK, 1947.