

PROPUESTA DE GUÍA DE REGULACIÓN COLOMBIANA PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES POR VOLADURAS DE ROCAS EN ÁREAS URBANAS. RCOLVV.09

(Colombian Regulation Guidelines' Proposal for the Rock Blowing Vibrations' Control in Urban Areas. RCOLVV.09)

Luis Humberto Pinto Morales*, María del Carmen Fuentes Fuentes**

*I.GeosoftMineLimited, **Uptc, Seccional Sogamoso
pintomoraleshumberto@yahoo.com - www.vibracionescolombia

(Recibido noviembre 15 de 2007 y aceptado junio 3 de 2008)

<p>Resumen: Presentación de una guía preliminar para la regulación de vibraciones generadas por voladuras en áreas urbanas, las cuales influyen sobre estructuras o viviendas cercanas a los sitios de su ejecución. Rocas, suelos o materiales con resistencias superiores a 50 y 60 Mpa hacen necesaria la utilización de explosivos para su fragmentación; estos producen alteraciones ambientales, como vibraciones, ruido y proyecciones que generan molestias a personas, y posibles daños a sus viviendas.</p>	<p>Abstract: A preliminary guide appears for the regulation of vibrations generated by blasts in urban areas and their influence on the structures or the houses near the sites where the explosions take place. It refers to rocks, grounds or materials with compressive strengths average of 60 Mpa, that makes necessary the use of explosives for its fragmentation; which produces environmental alterations like vibrations, noise and projections that to generate annoyances to people and possible damages to their houses.</p>
<p>Palabras clave: Tiempos de retardo, Voladura de rocas, Ley de vibración, Onda de sobrepresión.</p>	<p>Key Words: Delay Times, Rock Blasts, Law of Vibrations, Overpressure Wave.</p>

1. INTRODUCCIÓN

Colombia no cuenta actualmente con una regulación estándar o específica para el control de vibraciones generadas por voladuras y de su efecto o influencia sobre estructuras cercanas a los sitios de explosión; es por esto que se plantea el diseño de una guía regulatoria preliminar que sirva como punto de partida para llegar a estandarizar una norma nacional.

El presente artículo forma parte del trabajo de investigación exigido por la Escuela de Ingenieros Militares (Institución Universitaria, Colombia), como parte de los requisitos para optar al titulado de Especialista en la línea de “Técnicas de voladuras en obras de ingeniería civil y Militar”, adelantado por el ingeniero Luis Humberto Pinto Morales, con la cooperación de la ing. Msc. Geofísica Maria del Carmen Fuentes, docente investigadora de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Seccional Sogamoso, y de la firma I.GeosoftMine Limited.

El objetivo principal de este artículo es proponer el diseño de un espectro preliminar de la posible norma regulatoria de vibraciones generadas por voladura de rocas en Colombia. Norma que propugnará:

- Controlar la ocurrencia y reducir el riesgo de daños sobre estructuras, que pueden producir las voladuras realizadas en áreas urbanas.
- Reducir las molestias o daños sobre personas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La propuesta guía se fundamenta en una base de datos conformada por más de 800 registros de voladuras obtenidos por la Firma I.GeosoftMine Limited entre los años 2000 y 2009. Estos registros fueron tomados a distancias promedio de 10 a 1000 m, medidos del sitio de explosión al sitio de registro.

La base de datos obtenida fue lograda a través de la participación en diferentes proyectos de perforación y voladura en minería a cielo abierto, subterránea y construcción civil para diferentes tipos de rocas en los siguientes departamentos de Colombia (ver tabla 1).

2.1 Requerimientos y equipos de registro

Los requerimientos que deben cumplir los equipos de registro son:

- Captar la velocidad de partícula pico, PPV, en las tres componentes ortogonales principales: longitudinal, vertical y transversal. Vector suma mm/s.
- Los equipos de registros deben tener sensores en las tres componentes, preferiblemente, que registren velocidad, aceleración y desplazamiento, con respuesta lineal en frecuencia de 2-250 Hz y velocidad de partícula pico, PPV, entre 1,0 y 250 mm/s, con sonómetro para captar la onda de sobrepresión en rango de resolución lineal de 80 a 140 dB para impacto puntual.

Tabla 1. Sitios de adquisición de registros en los diferentes departamentos colombianos (ver anexo 3).

Departamento	Municipio	Tipo de material
Boyacá	Tunja	Suelos
	Sogamoso	Calizas, Carbón Fosforita
	Nobsa	Calizas
	Tibasosa	Calizas
	Duitama	Calizas
	Iza	puzolanas
	Firavitoba	Calizas
	Gachantivá	Calizas
	Sáchica	Calizas Travertino
	Paz del Río	Hierro
	Betétiva	Calizas
Cundinamarca	Labrazagrande	Limolitas Areniscas
	La Calera, Chingaza	Arcillolitas
	Tausa	Carbón
Santander	Zipaquirá	Arenas-sílice
	San Gil Curití	Calizas
Magdalena	Santa Marta Túnel Metroag.	Filitas
Guajira	Piedemonte de la Sierra Nevada	Igneas Basaltos
Cesar	Curumani	Calizas y Agreg.
Vaupés	Mitú	Igneas Granitos
Tolima	Payande	Calizas
	Boquerón	Areniscas Limolitas
Casanare	Corregimiento el Morro	Limolitas y areniscas
Valle (Cauca)	Lobo Guerrero	Igneas Granitos

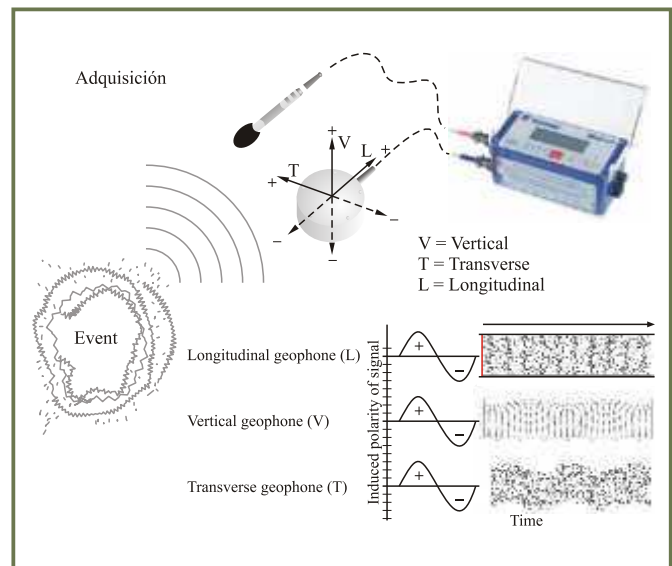
2.2 Adquisición de registros

En cada uno de los puntos de medición se utilizó un arreglo triaxial de sensores, cuyas direcciones quedaron referidas al punto de la voladura de la siguiente manera: un registro horizontal en la dirección normal al punto de la voladura; un registro paralelo a la dirección del punto de la voladura, y un registro vertical.

2.3 Equipamiento

La adquisición de datos se realiza con monitores avanzados de vibraciones y de onda de sobrepresión:

1. Geoposicionador, GPSmap 60CSx
2. Radios Vertex de largo alcance
3. Sismómetros digitales fabricados por la compañía InstanTel (USA-Canadá), veamos:
 - a. MiniMate Plus con dos geófonos triaxiales
 - b. MiniMate Blaster un geófono triaxial
 - c. MiniMate DS 077 con un geófono triaxial (ver figura 1)

**Figura 1.** Sismómetro digital Minimate Plus.

Transductores sísmicos externos: Range 0,5- 254 mm/s; Resolution 0,005 in/s (0,127 mm/s) a 0,000625 in/s (0,0159 mm/s); Trigger Levels 0,005 a 10 in/s (0,127 a 254 mm/s); Sampling Rate. Standard 1024 sample per second; Frequency Response. 2 to 250 Hz; Sonómetro: Range 88-148 dB y Resolution 0,1 dB above 120 dB (0,25 Pa).

2.4 Procesamiento de señales

Los siguientes análisis permiten definir los valores de amplitud y velocidad de partícula pico, PPV, pico resultante y frecuencia (zero crossing, Minimate method), de las señales en las tres direcciones según tiempos de arribo.

El objetivo principal es mostrar cómo se llevó a cabo el procesamiento de señales a través de software especializado, con la finalidad de definir las frecuencia principal de cada evento en las tres direcciones (T, V, L); esto permite optimizar tiempos de retardo en los diseños de las voladuras para evitar efectos de amplificación por acoplamiento de señales (ver anexos 1 y 2). El procesamiento de señales también permite obtener frecuencias principales generadas por las voladuras, que pueden ser modificables en un momento dado para que no coincidan con las frecuencias de las estructuras por proteger. Otro parámetro importante es la definición del vector suma o resultante de la sumatoria cuadrática de las tres componentes. A modo de ejemplo se presenta el análisis de un registro de voladura con rocas graníticas (Mitú, departamento del Vaupés, Colombia), de acuerdo con las siguientes características: a. Distancia entre el punto de explosión y el punto de registro: 40 m. b. Diámetro del barreno: 40 mm. c. Número de barrenos: 20. d. Carga operante de 1,7 a 3,0 kg. e. Carga total de 34 a 60 kg. f. Profundidad de barrenación: 2,5 m. g. Plantilla: 1,5*1,5 (ver figuras 2, 3, 4 y 5, y registros anexos 2 y 3).

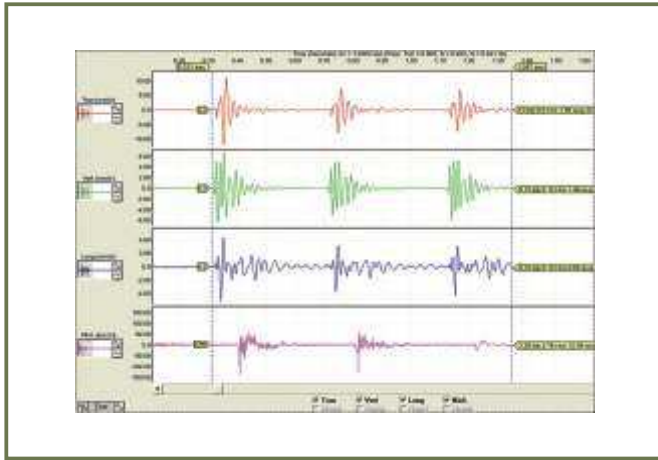


Figura 2. Registro de las tres componentes y sobrepresión, donde se observa el buen funcionamiento de los tiempos de retardo con poca dispersión.

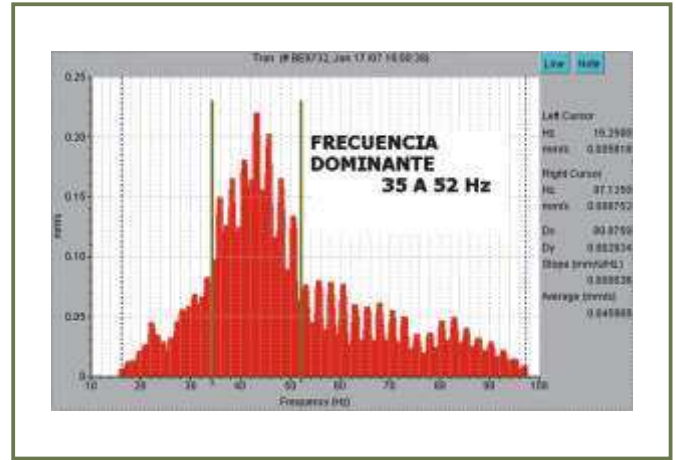


Figura 5. Frecuencia dominante obtenida a través de la aplicación de la transformada de Fourier-FFT, en la componente transversal (T), la cual puede generar daños cosméticos o estructurales en edificaciones que estén dentro de este rango 35 a 52 Hz.

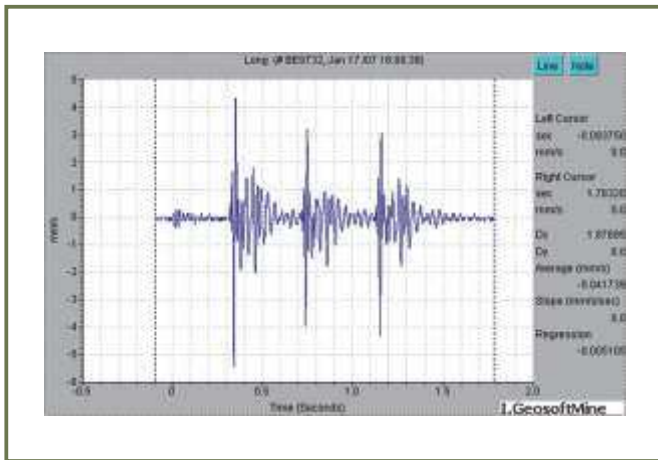


Figura 3. Análisis de los picos de velocidad en la componente longitudinal (L).

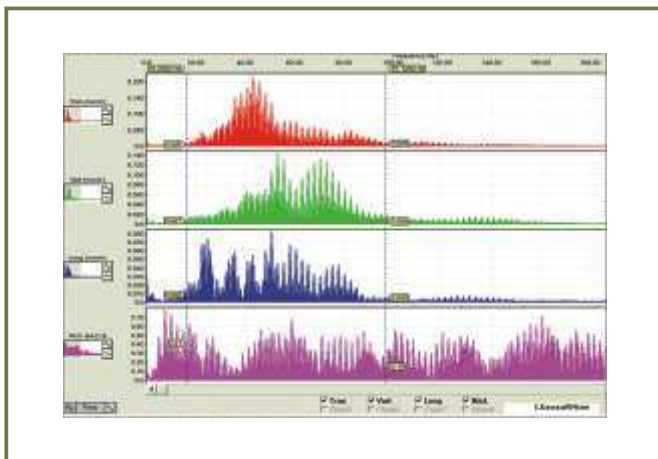


Figura 4. Gama de frecuencias dominantes en las tres componentes (T,V,L).

2.5 Normas y criterios de prevención

Existen más de 20 normas internacionales para el control de vibraciones; en la tabla 2 se presentan las normativas internacionales vigentes más relevantes.

Tabla 2. Normas internacionales.

País	Norma	Fecha
Estados Unidos	USBM Ri8507 OSM 817.67	1980 1983
Canadá	NPC 2001	1983
Alemania	DIN 4150, Parte 3	1999
R. D. Alemana	Directriz KDT 046	1972
España	UNE 22.381-93	1993
Francia	GFEE	2001
Inglaterra	BS 7385 parte 2	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992
Escocia	PAN50	2000
Portugal	NP2074	1983
Italia	UNI 9916	1991
Internacional	ISO 4866	1990
India	CMRI	1991
Australia	AS2187	1983
Brasil	NBR 9653	1986

Por lo general, los espectros de umbral de daño trabajan en función de la velocidad de partícula pico PPV (mm/s) y la frecuencia de las oscilaciones (Hz), como es el caso de la norma Alemana DIN 4150; sin embargo, existen otras normativas que trabajan en función del desplazamiento, la velocidad y la frecuencia del movimiento oscilatorio, como es el caso de la norma americana USBM RI8507 y la norma española UNE 22.381-93; además existen otras, como la norma Sueca SS 460 48 46, que tiene en cuenta la velocidad de la partícula pico PPV (mm/s), en función de la distancia (m); veamos una descripción general de las normas antes mencionadas:

- Norma Americana USBM y OSMRE. La USBM elaboró un gráfico utilizando una combinación de velocidad y desplazamiento, en el cual se presentan los niveles seguros de vibración para las residencias (ver figura 6).

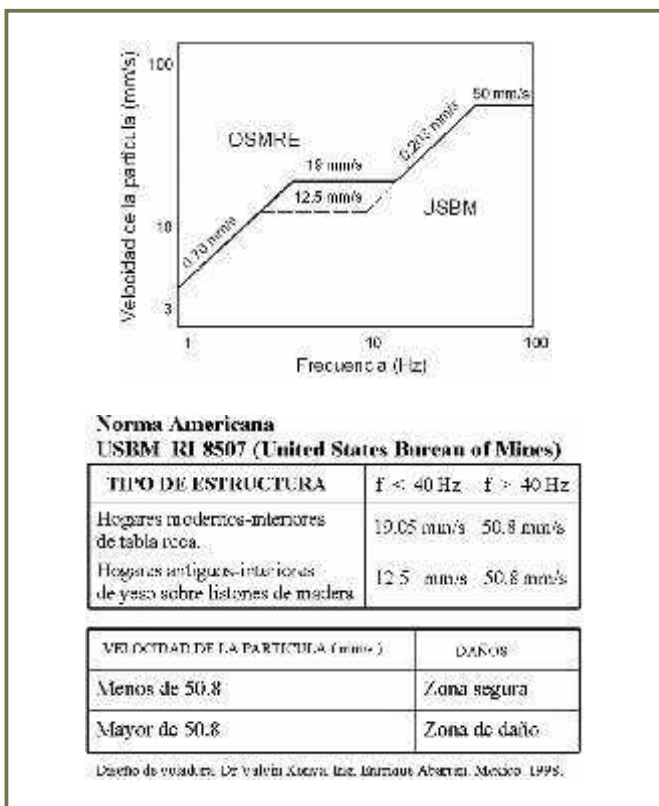


Figura 6. Valores admitidos por la norma Americana.

- Norma Alemana DIN 4150. La norma Alemana DIN 4150 (1986, revisada en el 2001), ofrece valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de construcción civil con el intervalo de frecuencia en Hz (ver figura 7).

- Norma Española UNE-22-381-93. La normativa española distingue los siguientes grupos de estructuras: Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de

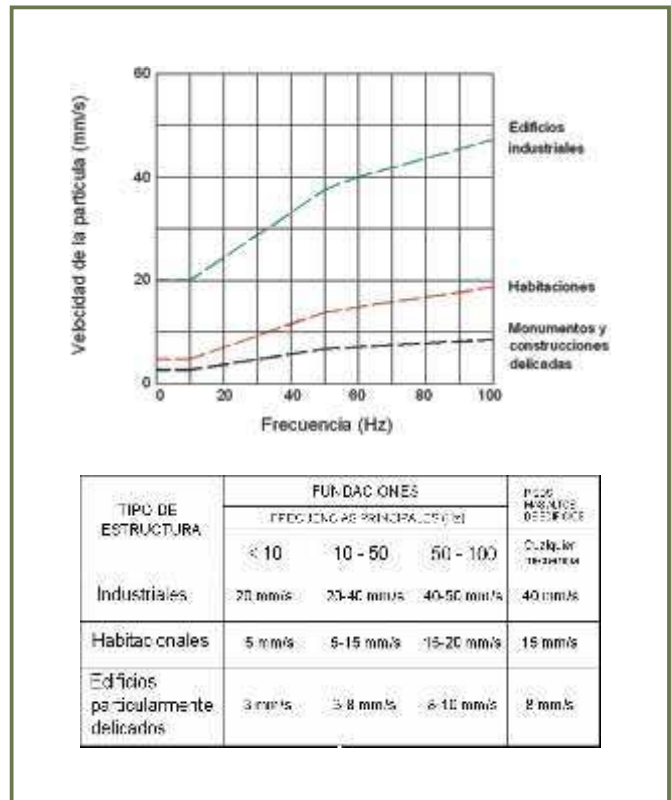


Figura 7. Valores admitidos por la Norma Alemana DIN 4150 para daños en edificios (Bacci, 2000, adaptado por Berta, 1985).

hormigón armado o metálicas. Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico, que por su fortaleza no presente especial sensibilidad a las vibraciones. Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener (ver figura 8).

Los umbrales de perturbación se establecen en función de la frecuencia principal de vibración y del tipo de estructura por proteger, utilizando como parámetro de medida la velocidad de la partícula, aunque en el intervalo de frecuencias de 15 a 75 Hz se utilice el parámetro de desplazamiento.

- Norma Sueca SS 460 48 46 (1991). Esta norma se basa en un amplio conjunto de datos y mediciones de voladuras de todo tipo, asociadas a distintos tipos de rocas, tipos de construcciones y tipos de materiales usados para construir edificaciones. Tiene en cuenta la componente vertical V_z , no tiene en cuenta las componentes longitudinal y transversal o radial, y tampoco tiene en cuenta las frecuencias de las ondas; es por esto que se recomienda solo para estudios teóricos preliminares. La expresión para su cálculo tiene la siguiente forma:

$$V_z = V_0 * F_b * F_m * F_d * F_t$$

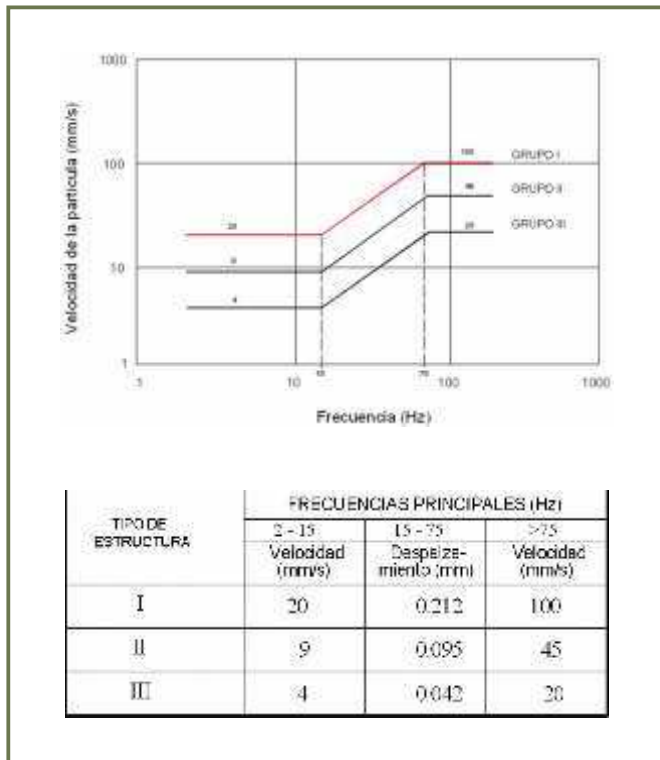


Figura 8. Tipos de estructuras y velocidades pico para la Norma Española.

Donde:

V_z : Velocidad vertical máxima permisible

V_o : Velocidad máxima de partícula [$V_o(\text{mm/s}) = V_p(\text{m/s}) / 65$]

F_b : Factor de Edificación [0,5–1,7]

F_m : Factor de materiales de construcción [0,65 – 1,20]

F_d : Factor de distancia entre la tronadura y el punto del registro [$F_d = 1,91 * d - 0,28$]

F_t : Factor de tiempo con el que se cuenta la duración de los trabajos con el explosivo [0,75–1,00] (ver figura 9).

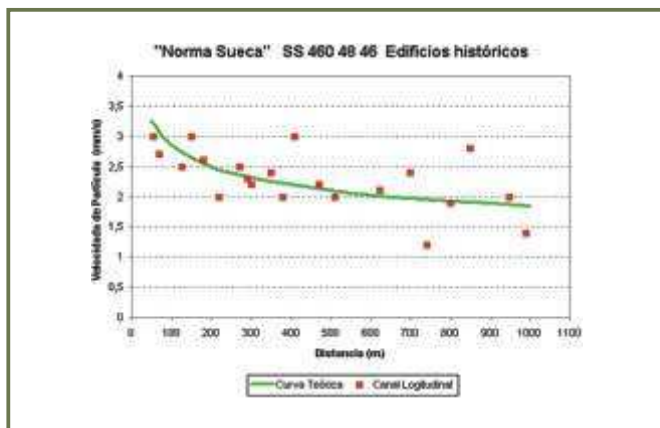


Figura 9. Umbral de velocidad (mm/s) vs. distancia (m), para el caso más crítico a diferentes distancia del punto de la voladura, registro de la componente V.

3. PROPUESTA GUÍA DE REGULACIÓN. RESULTADOS

La guía regulatoria se fundamenta en criterios de prevención y normas desarrolladas por autores y firmas internacionales, tales como Bollinger, G. A. (1971), Esteves, J. M. (1978), Dowding Ch. H. (1985, 1996), López Jimeno Carlos (1996), Sarby, R. (2000), Dowding Ch., Siskind, Mckenna, Martel, Martín (2003), Gama D. C. (2004), entre otros, a través de investigaciones realizadas desde los años treinta.

Desde esa época se trabaja en la búsqueda de una relación empírica entre alguna medida de la energía de la vibración y la posibilidad de daños a residencias y otras estructuras cercanas a los sitios donde se realizan voladuras.

La regulación propuesta expresa el criterio de daño en función de la velocidad de partícula pico PPV y la frecuencia de vibración (Hz), teniendo en cuenta que las investigaciones recientes indican que el espectro de frecuencias del movimiento vibratorio es tan o más importante que la velocidad de vibración en la evaluación de potencial de daño. Los límites de vibración por debajo de 10 mm/s, en particular para las estructuras Tipo III y IV, se evaluaron teniendo en cuenta la tendencia de los registros obtenidos y tomando como referencia la investigación adelantada por Chapot en el año 1981, el cual, luego de un profundo estudio retrospectivo, ejecutando centenas de mediciones, sugiere una gama de velocidades de 10 a 30 mm/s, con mención a la frecuencia para evitar daños en construcciones. No obstante, este mismo autor considera que los límites inferiores a 10 mm/s deben ser considerados en el problema de canteras (o explotaciones de minas en áreas urbanas), donde la influencia de las detonaciones puede durar varios años (Unesco, 1995), lo cual es común en nuestro entorno.

En Canadá, Edwards y Northwood (1960) midieron comparativamente desplazamiento, velocidad y aceleración, así como las deformaciones en estructuras, y concluyeron que la mejor correlación con el daño se encuentra cuando se emplea la velocidad de la partícula, para todo tipo de terreno.

Existen “conceptos básicos” citados por autores-investigadores a nivel internacional, entre los que se encuentran algunos de los mencionados anteriormente. Estos conceptos se deben tener en cuenta cada vez que se quiera abordar el tema de vibraciones por voladuras, citamos algunos:

- Una estructura residencial responderá menos a un movimiento del terreno de 12 mm/s a una frecuencia principal de 80 Hz, que a una frecuencia principal de 10 Hz (Dowding 1985).
- El problema de las bajas frecuencias es que la frecuencia principal del movimiento vibratorio puede ser igual a la frecuencia natural (de resonancia) de la estructura, caso en que el movimiento se amplificará y las deformaciones serán más importantes (Dowding, 1985).
- Estudios detallados han demostrado que las frecuencias naturales de estructuras residenciales están comprendidas entre

5 y 10 Hz, mientras que las paredes de estas residencias presentan frecuencias del orden de 12 a 20 Hz, dependiendo del tipo de construcción y de los materiales empleados (Dowding 1985).

- En un análisis de 23 estructuras residenciales de uno y dos pisos, encontraron una media de 7 Hz como frecuencia natural (variando de 3 a 11 Hz); las casas de una sola planta presentaron un resultado de 8 Hz, mientras en las casas de dos plantas se obtuvo una media de 5,8 Hz. La frecuencia natural media de deformación de las paredes fue medida en 15,2 Hz (variando de 12 a 20 Hz) (Dowding et ál., 1985).

- Se pueden generar daños cosméticos a una frecuencia de 4 Hz con valores guía de velocidad de partícula pico de 15 mm/s, con incremento a 20 mm/s, entre 1 y 15 Hz; por encima de 40 Hz puede llegar a 50 mm/s, (PAN 50, Annex D).

- Los límites seguros para realizar desmontes (voladuras) son de 70 mm/s para rocas duras, 35 mm/s para rocas de densidad media y 18 mm/s para materiales no consolidados (Langefors y Kihlstrom, 1958).

- En Brasil, la norma técnica NBR 9653, de 1986, establece un valor máximo de 15 mm/s, independientemente del tipo de construcción y la frecuencia (Unesco, 1995).

- Los rangos típicos de frecuencias de vibraciones en suelos producidas por laboreo minero superficial están entre 5 y 40 Hz, con valores predominantes de 20 y 30 Hz, en canteras o graveras (PAN 50, Annex D, The Control of Blasting at Surface Mineral Workings, February 2000).

- En el caso de minas a cielo abierto, los valores de frecuencias dominantes oscilan entre 5 y 15 Hz (ITGE).

- La presencia de una capa no consolidada causa mayor amplitud de movimiento en bajas frecuencias que en roca sana, en iguales condiciones de distancia y de carga explosiva, (Dowding et ál., 2003).

3.1 Procedimientos metodológicos

Entre los procedimientos metodológicos están: -Adquisición de la base de datos. -Procesamiento de los datos, -Comparación con las regulaciones y -Diseño de las curvas seguras.

El análisis detallado de cada una de las normas internacionales vigentes disponibles nos permite seleccionar las normas Americana (USBM R18507), Alemana (DIN 4150), Española (UNE 22.381-93), Sueca (SS 460 48 46), Suiza (SN 640 312^a), Francesa (GFEE) y Brasileira (NBR 9653) como las que inicialmente pueden aportar conceptos y parámetros importantes por tener en cuenta para ser aplicados en el proyecto. Fundamentos para tener en cuenta:

- Características del medio de transmisión, estructuras geológicas.
- Velocidad de la partícula pico y frecuencias de las ondas generadas por la voladuras.

- Carga del explosivo y la distancia a las estructuras.
- Tipos de construcciones por cautelares.

En principio se concluye que para el presente estudio tendremos como base para las investigaciones preliminares las siguientes normas: Americana, Alemana, Española, Suiza y Brasileira, que a nuestro criterio aplican en nuestro medio para la prevención de daño sobre estructuras, especialmente la norma Alemana DIN 4150 2001^a, y alternativamente la Directriz KDT 046/72 (1972), por presentar los umbrales de prevención más restrictivos, y la representación grafica de más de 800 voladuras registradas por la firma I.GeosoftMine Limited (1999-2009) (ver anexo 1 y figura 10).

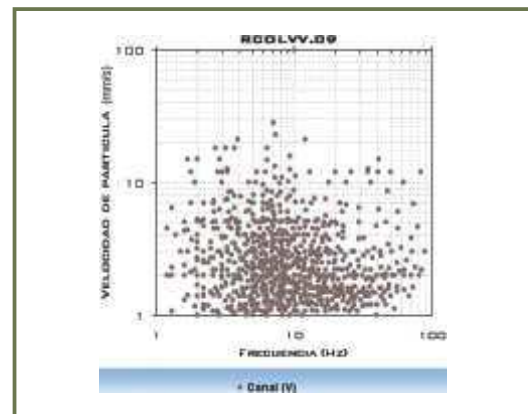


Figura 10. Puntos registrados.

La figura 10 funciona como patrón comparativo de las tendencias vibratorias tomadas para el presente estudio. Cabe destacar que los estudios de vibración no son extrapolables de un sitio a otro, la propagación de las ondas en el macizo están influenciadas por factores intrínsecos de cada lugar, en particular: tectónica, nivel de saturación, estratigrafía y propiedades físico-mecánicas de las rocas, entre otros.

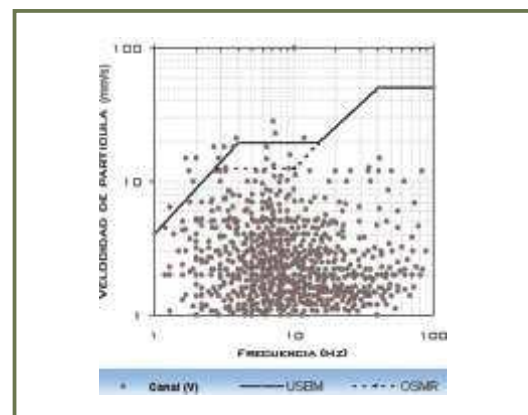


Figura 11. Comparación de la norma americana con los puntos registrados en la componente L.

La gráfica 11 demuestra que la norma americana es bastante complaciente con las vibraciones generadas por las voladuras; en nuestro medio son muy pocas las vibraciones que superan el umbral seguro de la USBM, sin embargo se presentan daños en viviendas.

Partiendo de la reflexión anterior y teniendo en cuenta las tendencias y concentraciones de la nube de puntos, se plantea un espectro velocidades PPV vs. frecuencia dominante para la especificación guía que denominaremos en adelante RCOLVV.09.

3.2 Especificación de la guía propuesta RCOLVV.09

La guía estipula umbrales seguros para cuatro tipos de construcciones, ajustando a las necesidades de nuestro medio. Los límites admisibles de vibración equivalen a patrones ambientales, establecidos para evitar efectos dañinos a la salud humana y controlar daños a las construcciones.

Existe una clasificación interesante que puede ser aplicada en nuestro medio, donde las edificaciones se han dividido para efectos de la evaluación de su comportamiento ante la intensidad de un sismo (Escala de Mercalli, 1956), de acuerdo con sus características constructivas, tales como tipo de muros, cimentaciones, clase de terreno y diseño estructural (Ritcher, 1958); esta clasificación divide las construcciones en cuatro tipos: A, B, C y D, los cuales son equivalentes a los planteados por la regulación RCOLVV.09, que tiene en cuenta las viviendas promedio que se localizan cerca a explotaciones realizadas en canteras, veamos:

TIPO A (I). Buena edificación con mortero; construida con arreglo a un proyecto, reforzada especialmente en los encuentros y enlazada con perfiles, anclajes, etc., proyectada para resistir esfuerzos laterales.

TIPO B (II). Buena construcción con mortero; reforzada, pero no calculada para resistir esfuerzos laterales.

Tipo C (III). Construcción ordinaria con mortero; no demasiado débil (sin tirantes en los ángulos), pero sin reforzar, ni calculada para resistir esfuerzos laterales.

TIPO D (IV). Construcción de escasa calidad, hecha con materiales flojos, como adobes, morteros pobres, madreaguada y débiles en sentido horizontal.

3.3 Clasificación del tipo de estructura RCOLVV.09

TIPO I. Edificaciones pesadas, naves industriales con estructura de hormigón armado o metálicas (cumpliendo con la Norma Colombiana Sismo-Resistente NSR-98, AIS 98).

TIPO II. Edificios de viviendas y oficinas, edificios de comercio o centros comerciales (cumpliendo con la NSR-98, AIS 98).

TIPO III. Viviendas estándar de uno y dos pisos con refuerzo estructural (cumpliendo con la NSR-98, AIS 98).

TIPO IV. Estructuras particularmente delicadas, edificaciones históricas en condición débil, viviendas de uno y dos pisos sin ningún tipo de refuerzo estructural susceptibles a vibraciones (no cumplen con la NSR-98 - AIS 98).

3.4 Campo de aplicación

Vibraciones producidas por voladuras en canteras que pueden durar varios años (Barkley et ál., 1983), eventualmente aplicable a demoliciones, maquinaria, tráfico de carreteras y ferroviario, teniendo en cuenta las frecuencias principales (Hz), asociadas a la máxima velocidad pico (PPV mm/s), con énfasis en la resultante y velocidad vertical pico (V_z , mm/s), para edificaciones históricas.

La tabla 2 presenta las frecuencias (Hz), que limitan las magnitudes de velocidad (mm/s).

Tabla 2. Frecuencias principales.

Frecuencias principales (Hz)					Tipo de estructura
<2.5	2.5 - 12	12 - 50	50 - 100	Hz	
11 - 20	20	20 - 50	50	mm/s	I
6.5 - 12	12	12 - 30	30	mm/s	II
2.8 - 5	5	5 - 12.5	12.5	mm/s	III
1.6 - 3	3	3 - 7.5	7.5	mm/s	IV

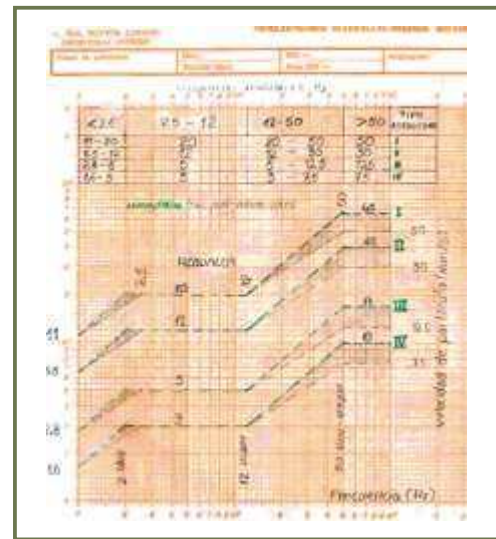


Figura 12. Espectro manual Log-Log de umbrales seguros para la guía RCOLVV.09.

El espectro propuesto se diseñó realizando un análisis minucioso de las velocidades y frecuencias dominantes de todos los registros obtenidos en diferentes tipos de rocas en función de los medios de propagación y los tipos de estructuras por proteger.

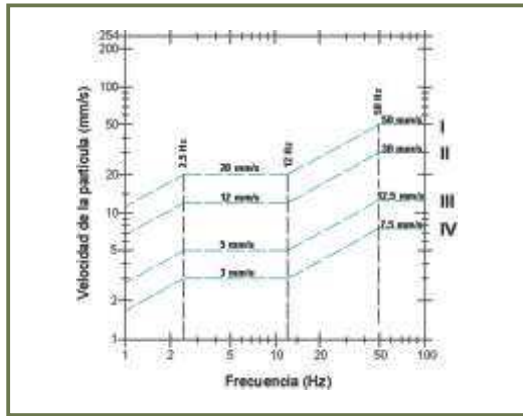


Figura 13. Espectro de umbral de daño para la guía RCOLVV.09.

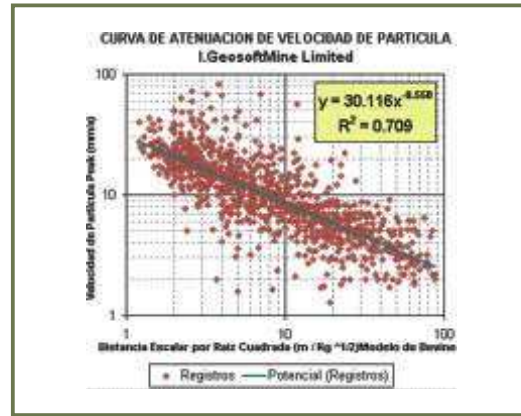


Figura 15. Curva de atenuación de velocidad de partícula para determinación de la Ley de Vibración.

En las figuras 12 y 13 se observa que la regulación propuesta restringe en gran medida las vibraciones entre los 2 y 12 Hz.

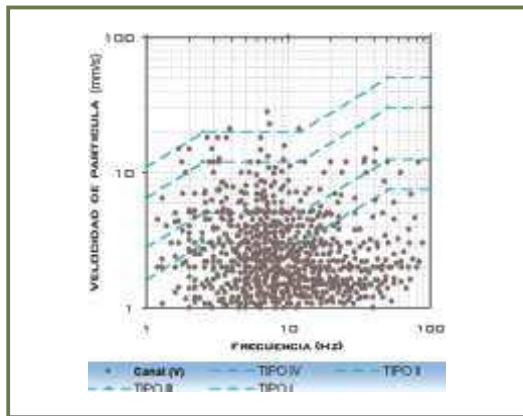


Figura 14. Comparación de los registros de vibración con los umbrales seguros de la guía RCOLVV. 09.

3.5 Ley de vibración

Aplicando el criterio de Devine, se obtiene el modelo de ajuste (ver figura 15).

Fórmula general del Modelo de Devine:

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha}$$

Donde:

PPV: Velocidad de Partícula Peak (mm/s)

W: Peso de la carga explosiva

d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonado

K: Factor de Velocidad

α: Factor de Atenuación

$$V_{\text{máx}} = k * (D/W^{0.5})^m$$

Coefficiente de correlación : 0,709

Coefficiente k : 30.116

Coefficiente alfa : -0.550

Puntos de ajuste : 900

$$V = 30.116 * (D/W^{0.5})^{-0.550}$$

Aplicando el criterio de daño y un límite de velocidad de partícula podemos diseñar la carga requerida de explosivo para el límite de vibraciones establecido. El análisis anterior permite obtener curvas carga-distancia, ver figura 16.

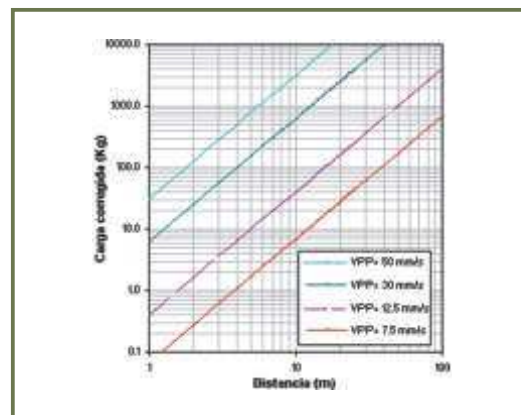


Figura 16. Curvas de carga corregida (Q), en función de la distancia (D), para velocidades de partícula pico límites de 7,5, 12,5, 30 y 50 mm/s.

3.6 Comparación de la guía propuesta con normativas internacionales

Esta comparación se lleva a cabo superponiendo los umbrales de cada norma internacional referenciada con la guía propuesta; esto permitió realizar un análisis más detallado de

los límites de velocidades, frecuencias y desplazamientos seguros estipulados por cada una de estas (ver figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24), veamos:

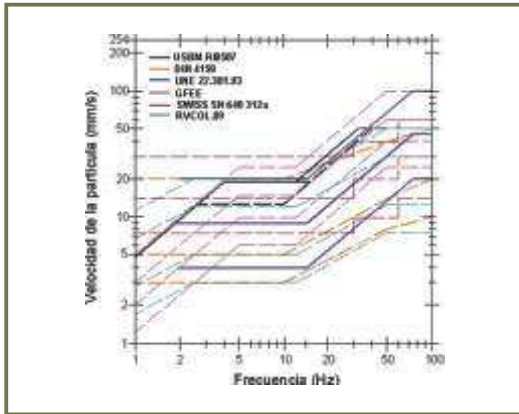


Figura 17. Espectro comparativo entre las normas USBM R18507, DIN 4150, UNE 22.381-93, GFEE, SMSB SN 640 312^a, NBR 9653 con la guía colombiana.

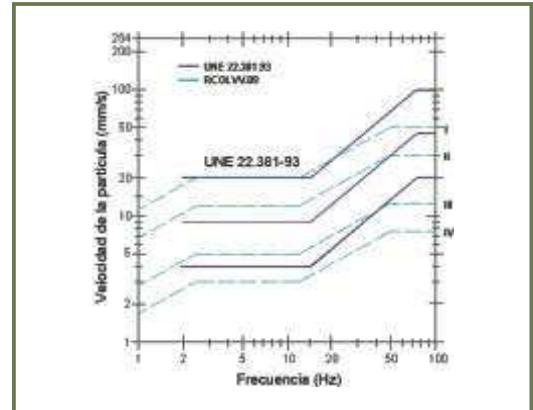


Figura 20. Comparación con la norma Española.

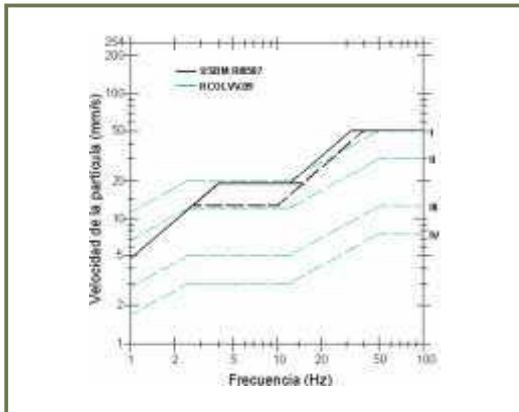


Figura 18. Comparación con la norma Americana.

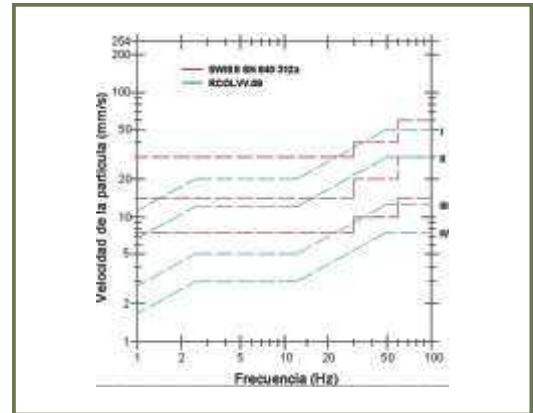


Figura 21. Comparación con la norma Suiza.

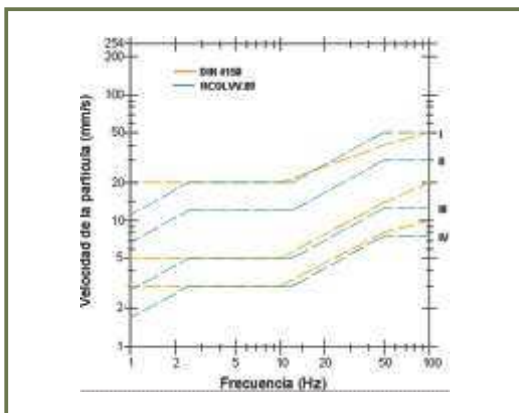


Figura 19. Comparación con la norma Alemana.

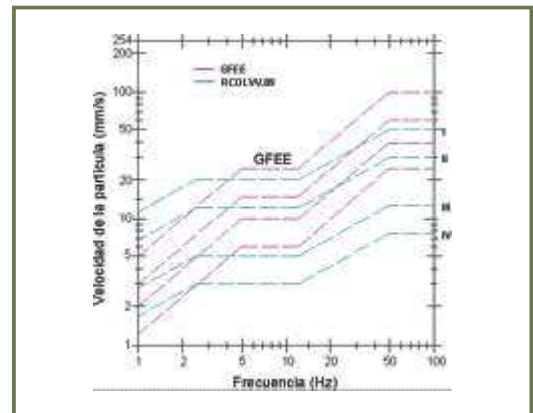


Figura 22. Comparación con la norma Francesa.

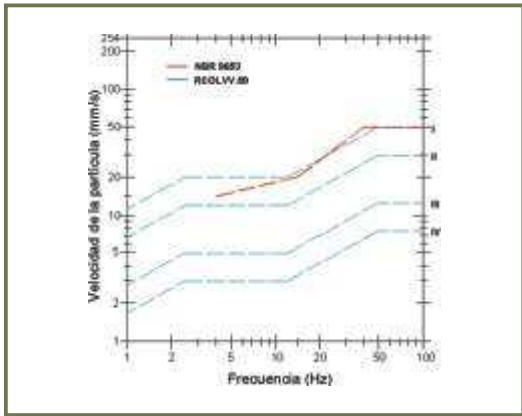


Figura 23. Comparación de la propuesta de regulación nacional RVCOL-09 con la regulación brasilera; cabe destacar que la norma Brasilera es muy similar a la Británica (ver figuras 23 y 24).

vibración para cuatro tipos de construcciones (I, II, III y IV), con un espectro que trabaja en función de la velocidad de partícula pico vs. frecuencia principal (ver tabla 3 y figuras 25, 26 y 27).

Tabla 3. Categorías de edificios y velocidades admisibles, Directriz KDT 046/72 (1972).

	Categoría de las construcciones	Vz, Adm (mm/s)
I	Monumentos históricos	2
II	Construcciones intermedias de madera	5
III	Construcciones de pared (e.g. construcciones en pared de ladrillo, losas, bloques)	10
IV	Construcciones armadas o reforzadas (e.g. construcciones en acero, concreto reforzado, madera)	30

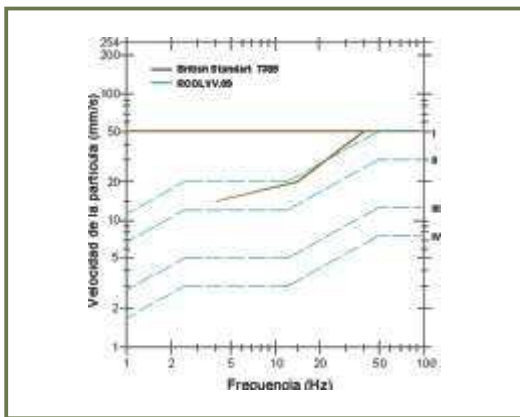


Figura 24. Comparación con la norma Británica (Inglaterra).

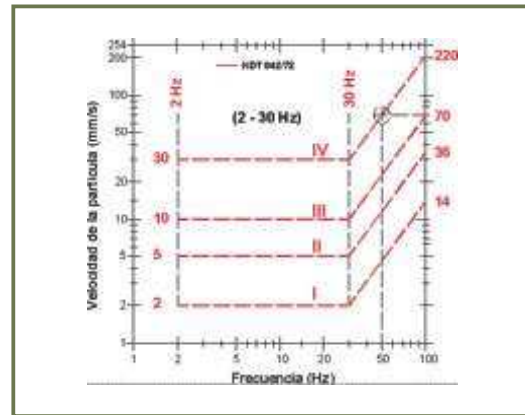


Figura 25. Espectro de la Directriz KDT 046/72 (1972), con frecuencias límites entre 2 Hz y 30 Hz.

4. GUÍA ALTERNATIVA CON MAYOR RESTRICCIÓN

Dentro de la gran diversidad de normativas a nivel internacional surge una regulación muy interesante, que se puede aplicar a nuestro medio con mayor restricción que la guía anterior propuesta. La guía alternativa presenta límites de vibración muy similares a los planteados por la RCOLVV.09 (3, 5, 12 y 20), pero con mayor restricción para la estructuras tipo I y II (2,5 mm/s para la tipo I y 10 mm/s para la tipo III).

El límite de 2,5 mm/s para las estructuras más delicadas se basa en una recomendación establecida por el Ingeominas en el año 1994, dentro del “Estudio sísmológico para determinar el efecto de las vibraciones generadas por las voladuras, Cementos Paz del Río S.A. 1994, Dpto. de Boyacá”.

La alternativa propuesta se diseña ajustando la guía propuesta RCOLVV.09 a la Directriz KDT 046/72 (1972), que fue creada por la Cámara Tecnológica de la antigua República Democrática Alemana, en el año 1972. Esta directriz plantea límites de

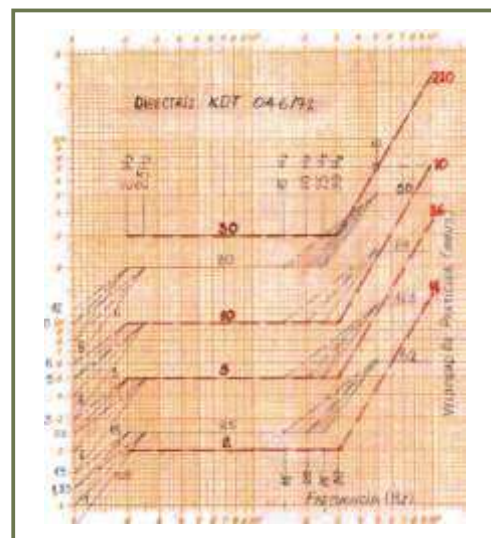


Figura 26. Diseño alternativo para la guía colombiana, en función del espectro de la Directriz KDT 046/72.

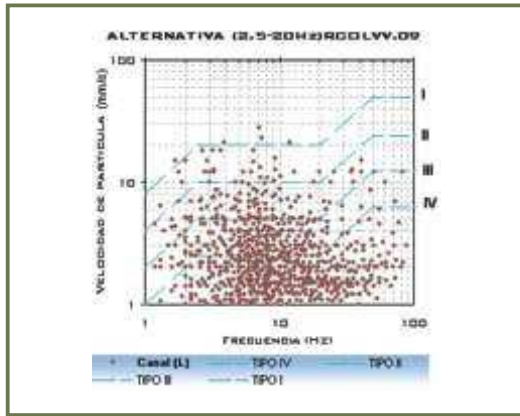


Figura 27. Espectro de la alternativa RCOLVV.09 con frecuencias límites entre 2.5 Hz a 20 Hz.

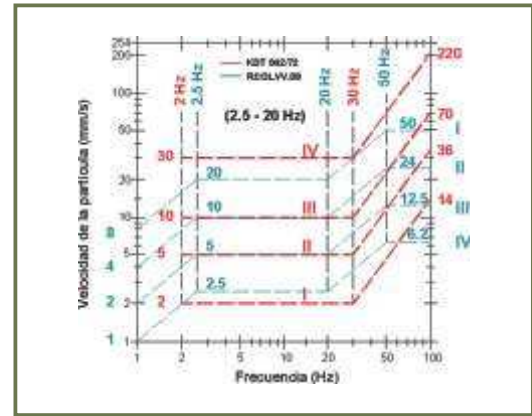


Figura 29. Espectro con frecuencias límites entre 2,5 Hz y 20 Hz.

Para un mejor entendimiento y análisis de los límites seguros, de acuerdo con la base de datos obtenida, se realizarán varias simulaciones, teniendo como parámetro principal de variación lateral la frecuencia. Cabe destacar que la directriz DTK hace especial énfasis en la velocidad admisible de componente vertical Vz, para estructuras particularmente delicadas.

Los análisis con variación de frecuencias entre 2,5-25 Hz, 2,5-20 Hz y 2,5-15 Hz se presentan en las figuras 28, 29 y 30 respetivamente.

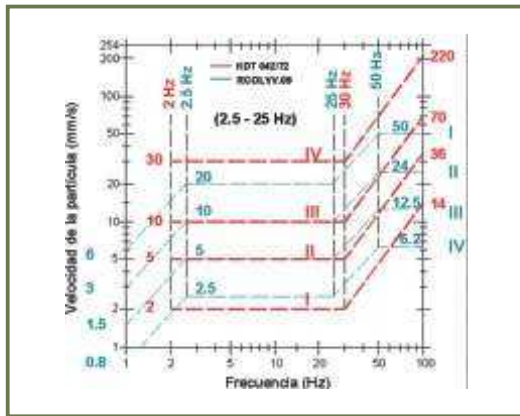


Figura 28. Espectro con frecuencias límites entre 2,5 Hz y 25 Hz.

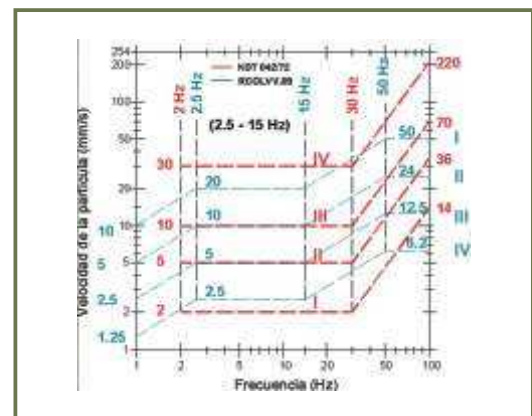


Figura 30. Espectro con frecuencias límites entre 2,5 Hz a 15 Hz.

4.1 ¿Por qué no se recomienda utilizar la NSR-98 para estudios de vibraciones generadas por voladuras de rocas?

- Es una norma de diseño estructural aplicado a construcciones sismo-resistentes, basadas en estudios de micro-zonificación sísmica y sirve para definir los movimientos sísmicos de diseño que exige la norma (NSR-98).
- Establece coeficiente de aceleración pico esperado en un periodo de ocurrencia de 50 años (vida útil de una edificación) y un 10% de probabilidad de que sea excedido; en voladuras los periodos de ocurrencia son muy cortos y la probabilidad de que los umbrales seguros estipulados sean excedidos se limita a

un 5%, debido a que es posible conocer la ley de propagación de las ondas en el macizo.

- Los espectros de la NSR-98 trabajan en función de la aceleración (g) vs. periodo (s), luego los sensores de adquisición son de aceleración (g); las regulaciones específicas para control de vibraciones por voladuras recomiendan la adquisición con sensores de velocidad (mm/s).
- Por lo general, las voladuras son impactos puntuales de corta duración, “fenómenos de corto plazo” (tiempos de retorno cortos: daños cosméticos no estructurales), mientras que los sismos son eventos que pueden durar varios segundos, con presencia de réplicas ocasionales poseventos (tiempo de retorno largos pueden generar daños estructurales).
- La escala de Mercalli, normalmente usada para evaluar efecto de terremotos, es inadecuada para vibraciones producidas por explosivos; para aceleraciones consideradas de daños serios o totales, en aquel caso no se observó ningún daño durante los ensayos, solo se presentaron daños cuando la aceleración era aproximadamente igual o mayor que la aceleración de la gravedad (g). Para evitarlos fue recomendado que la aceleración no sobrepasara 0,1 g (Dowding et ál., 2003).

5. CONCLUSIONES

La propuesta guía de regulación colombiana, presentada en este artículo, pretende mostrar un procedimiento sencillo para determinar los umbrales seguros que apliquen en nuestro medio para mitigar molestias a personas y controlar el daño sobre estructuras sin restringir los trabajos desarrollados con el uso de explosivos.

La propuesta guía presenta límites seguros de velocidad que van de 1,6 a 3 mm/s entre 1 y 2,5 Hz y de 3 mm/s entre los 2,5 y los 12 Hz (estructuras de uno y dos pisos), suficientes para controlar vibraciones sobre estructuras susceptibles a vibraciones.

Prácticamente ninguna normativa establece criterios de prevención para los niveles de onda aérea. El Bureau of Mines de EE.UU. establece unos niveles de seguridad en función de la frecuencia, que son de 134 dB para frecuencias medidas a partir de 0,1 Hz. Nuestros valores medidos oscilan entre 110 y 125 dB.

La propuesta guía busca generar inquietudes sobre el tema a nivel local y nacional, con la finalidad de adelantar nuevos estudios, que permitan el desarrollo definitivo de la normativa colombiana.

La Directriz KDT 046/72 (1972) es la regulación más restrictiva a nivel internacional.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Superior de Ingenieros Militares de Colombia, ESING, y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, Seccional Sogamoso, por su cooperación; y a la Firma I.GeosoftMine (Blast Vibration Control Services), por los aportes a este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Asociación Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9653. Norma procedimiento, (1986), Sao Paulo (SP).
- Barkley, R. C. et ál. (1983). Ground and Air Vibrations Caused by Surface Blasting. N.T.I.S.
- Bollinger, G. A. (1971). Blast Vibration Analysis..
- BS-7385- Part 1 (1990). Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to damage groundborne vibration. British Standard.
- DIN 4150. Strutural vibration in buildings-effects on structures. (1986). Gennan Standards.
- Dowding, Ch. H. (1985). Blast Vibration Monitoring and Control. USA: Prentice Hall.
- _____ (1996). Construction vibrations, USA: Prentice Hall.
- Dowding, Siskind, McKenna, Martel, Martin (2003). Comparative Study of structures Response to Mine Blasting. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, Appalachian Regional Coordination Center Pittsburgh, Pennsylvania.
- Esteves, J. M. (1978). Control of Vibrations Caused by Blasting, Memoria 498. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

- Gama, D. C. (2004). Vibrações dos terrenos em Portugal. Manual de mecánica de rocas. Asociación Brasileira de Geotecnia.
- López J., C.. (1996). Manual de Voladura - Manual de minería en túnel y a cielo abierto. ETSIM. Madrid, España.
- NPC-212. Model Municipal Noise Control by-law. Vol. 2- Revised NPC Publications Ministry of Enviroment. Ontario. Canadá 1983.
- PAN 50 Annex D (1998). Controlling the Environmental Effects of Surface Mineral Workings, published by The Stationery Office.
- Pinto M., L. H. y Fuentes, M. C. (2006). Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, 2(1): 2-9, Uptc-Sogamoso.
- Sarby, R. (2000). Environmental Geotechnics. Thomas Telford.
- Unesco (1995). Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, Vol 1.
- U.S. Bureau of Mines-RI 8506 Blast vibration Instrumentation.
- U.S. Bureau of Mines-RI 9455 Blast vibration Impacting a Distant Community.
- USBM RI8507. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. Report of investigation 8507 USBM-United States Bureau of Mines.

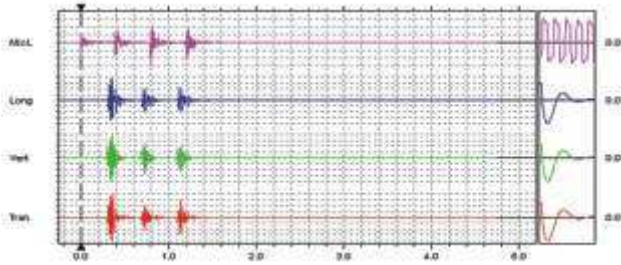
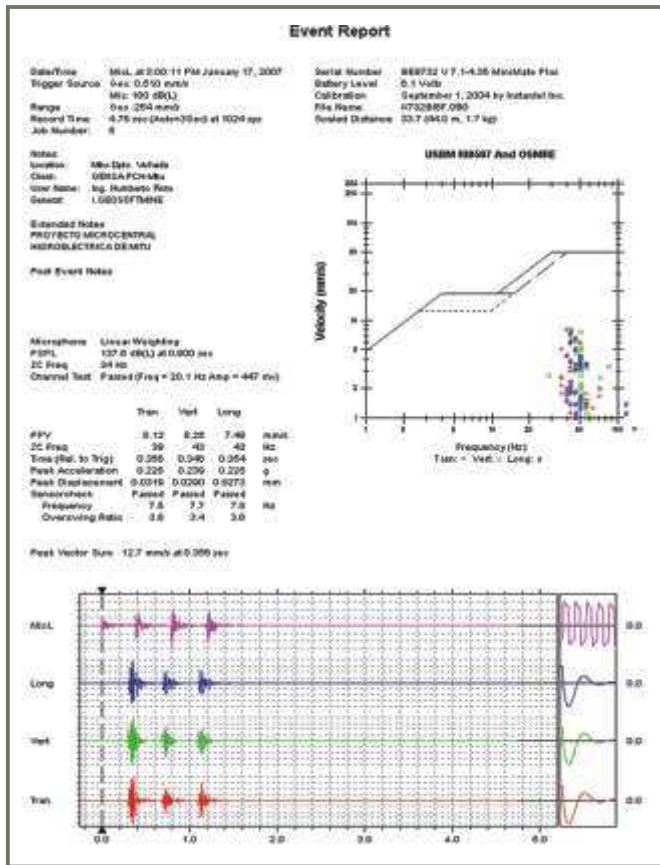
ANEXOS

Anexo 1

Localización de los sitios donde se han monitoreado vibraciones por voladura de rocas en Colombia (tomado de I.GeosoftMine, 2006).



Anexo 2



Anexo 3

