



Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica

Andesite rock fracture and spectral analysis of acoustic emission signals

Dino Alberto Filipussi¹, Juan Pablo Muszkats², Miryam Patricia Sassano³, Miguel Eduardo Zitto⁴, Rosa Piotrkowski⁵

Fecha de recepción: 12 de octubre de 2018

Fecha de aceptación: 15 de abril de 2019

Cómo citar: Filipussi, D., Muszkats, J., Sassano, M., Zitto, M., Piotrkowski, R. (2019). Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica. *Tecnura*, 23(61), 45-56. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.15361>

Resumen

Contexto: En las rocas sometidas a esfuerzos se producen señales de emisión acústica (EA). Esta y la información sísmica son complementarias tanto en sus aplicaciones como en su base teórica. Por ende, el estudio de frecuencias características en las señales de emisión acústica tiene relevancia para comprender la propagación de ondas sísmicas en la Tierra.

Método: Se realizó un ensayo de compresión uniaxial en probetas cilíndricas de roca andesita, llevadas hasta la rotura. Se registraron las señales de EA obtenidas durante el ensayo. Un análisis de las frecuencias de estas señales cabe en el contexto de un modelo elemental de foco sísmico, el cual describe el avance y la propagación de ondas durante la fractura de un material frágil. A partir de los espectros de Fourier de las señales, convenientemente representados en escala logarítmica, se obtiene la

frecuencia esquina. Este parámetro da cuenta del tamaño de las fisuras durante el avance del daño en el material sometido a esfuerzo.

Resultados: En un primer análisis se determinó la frecuencia esquina. En un segundo análisis, se filtraron las señales para distintas bandas de frecuencias con transformada Wavelet y se obtuvo el Wavelet Energy b-value (bWE) correspondiente.

Conclusiones: El estudio de la evolución del bWE para las distintas bandas de frecuencia permitió determinar frecuencias características que se pueden asociar a distintos mecanismos de fracturas en las rocas.

Palabras clave: emisión acústica, frecuencia esquina, roca andesita, transformada Wavelet, b-value.

Abstract

Context: Stressed rocks produce acoustic emission signals. Acoustic emission and seismic information are complementary in their applications as well as

- 1 Licenciado en Ciencias Físicas, doctor en Ingeniería. Profesor en la Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín. Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Departamento ICES. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: filipuss@cnea.gov.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9585-3043>
- 2 Licenciado en Matemática, magíster en Ingeniería Matemática. Profesor adjunto, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Junín, Argentina. Contacto: jpmuszkats@comunidad.unnoba.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8176-558X>
- 3 Licenciada en Matemática, magíster en Ingeniería Matemática. Profesora adjunta, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: psassano@fi.uba.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5802-4756>
- 4 Licenciado en Ciencias Físicas, magíster en Simulación Numérica y Control. Profesor adjunto, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: mzitto@fi.uba.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6423-1719>
- 5 Licenciada en Ciencias Físicas, doctora en Ciencias Físicas. Centro de Matemática Aplicada, Universidad Nacional de San Martín. Profesora consulta asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: rosap46@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6004-5679>

on their theoretical basis. Thus, studying characteristic frequencies in acoustic emission signals is relevant to understanding the seismic wave propagation on the Earth.

Method: A uniaxial compression test was performed on cylindrical samples of andesite rock, which were stressed up to breakage. Acoustic emission signals were recorded during the test. Frequency analysis in these signals may be carried in the context of an elementary seismic focus model. This model describes the fracture advance and propagation during brittle material fracture. The corner frequency is obtained from the Fourier spectrum of the signals, conveniently represented in log scale. This parameter accounts

for the size of fissures as damage progresses when the material is stressed.

Results: The corner frequency was determined on a first analysis. On a second analysis, the signals were filtered on different bands with the Wavelet Transform and the corresponding wavelet energy b-value was obtained.

Conclusions: Studying the evolution of the wavelet energy b-value in different frequency bands allowed the determination of characteristic frequencies which can be associated with different fracture regimes in rocks.

Keywords: acoustic emission, corner frequency, andesite rock, wavelet transform, b-value.

INTRODUCCIÓN

En el interior de los materiales sometidos a esfuerzos se generan ondas elásticas producidas por la deformación del material y otras fuentes, como las debidas al crecimiento de fisuras, movimiento de dislocaciones, rotura de inclusiones, etc. La técnica de emisión acústica (EA) permite obtener información de estos procesos, detectar y medir estas ondas con sensores piezoeléctricos que transforman la señal mecánica en señal eléctrica. Las ondas elásticas provenientes del interior del material son registradas sobre la superficie, donde se ubican los sensores piezoeléctricos. Estas señales, en la forma de ráfagas llamadas *hits*, son procesadas para su posterior análisis. La señal eléctrica de EA es de muy baja amplitud ($10 \mu\text{V}$) y de alta frecuencia (50 kHz a 1 MHz). Como se ilustra en la [figura 1](#), exhibe eventos discretos con forma de pulsos oscilantes que alcanzan una amplitud máxima en un tiempo de subida (*rise time*) de la señal, para luego amortiguarse.

El equipo de EA ([figura 2](#)) cuenta con una placa electrónica que se encarga de la toma de las amplitudes de la señal en función del tiempo, con lo cual es posible observar la forma de onda de la

señal; más tarde la placa procesa esta información y computa los valores de los parámetros característicos de la señal: energía, valor cuadrático medio (valor *RMS*), amplitud, *rise time*, duración del evento, etc. Esta técnica de EA proporciona un método para caracterizar los daños que sufre el material cuando es llevado a la rotura y dar cuenta, entre otros, de los procesos de microfisurado, crecimiento de fisuras y, por último, la coalescencia en macrofisuras hasta la rotura final del material.

Desde la década de 1960 se registran artículos sobre fractura de rocas sometidas a compresión (Hoek y Bieniawski, 1965; Lockner, 1993; Scholz, 1968) y es también un tema de actualidad por sus aplicaciones (Mirmohammadlou, Memarian, Mohammadi y Jafari, 2017). Resulta interesante observar que la EA es generada en distintas escalas espaciales y temporales abarcando desde la ruptura de ligaduras atómicas hasta fallas sísmicas. Por ello, la información sísmica y la EA son complementarias, tanto en sus aplicaciones como en su base teórica. A partir de esta idea, para dar cuenta de los procesos de daño en un material rocoso sometido a esfuerzos, hay trabajos (Carpinteri, Lacidogna y Puzzi, 2009; Rao y Prasanna Lakshmi, 2005; Shiotani, Yuyama, Li, y Ohtsu, 2001; Zhang,

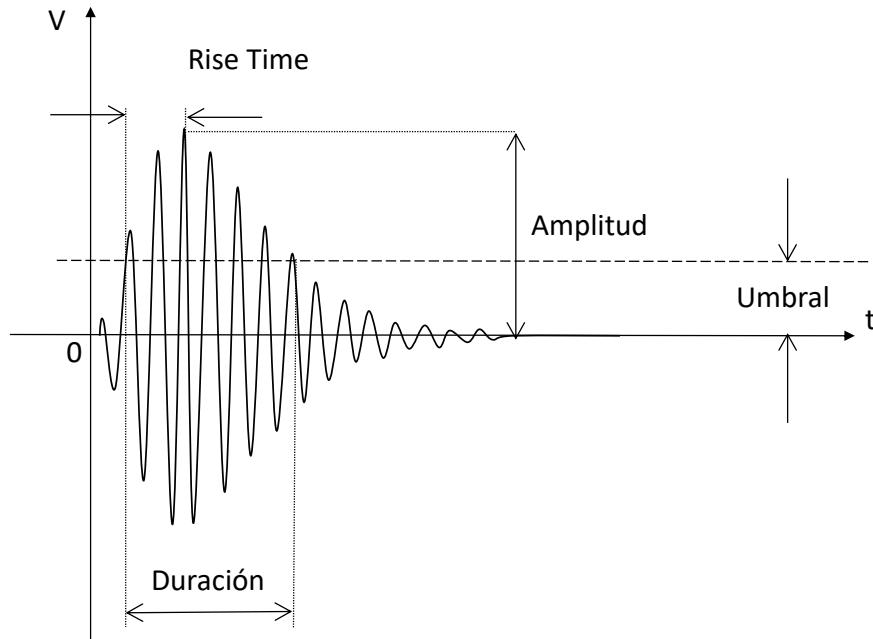


Figura 1. Señal de EA y parámetros que la caracterizan

Fuente: elaboración propia.

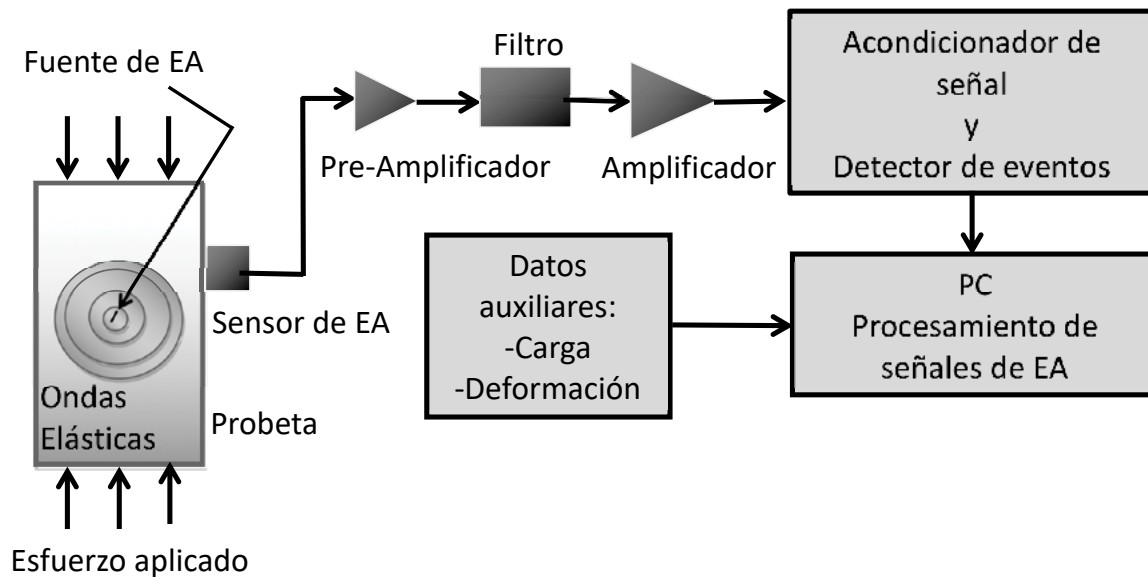


Figura 2. Equipo de EA. Adquisición y procesamiento de datos

Fuente: elaboración propia.

2018) que estudian el valor del *b-value*. Este parámetro surge de la distribución del número acumulado de *hits* de EA en función de su respectiva

amplitud. Se comprueba que la relación en escala *log-log* es lineal y es conocida su aplicación en la sismica como *ley de Gutenberg-Richter*.

METODOLOGÍA

Diseño experimental

Siguiendo el trabajo de Filipussi *et al.* (2015), se ensayaron cuatro probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 150 mm de largo, sobre testigos de andesita extraídos *in situ* de roca del Cerro Blanco, provincia de San Juan, Argentina. Estas probetas fueron ensayadas a compresión simple uniaxial y llevadas a la rotura. Se utilizó una máquina marca CGTS de 100 toneladas de capacidad, de tipo servohidráulica y lazo cerrado donde se impuso una velocidad de desplazamiento de actuador de 0,12 mm/min. La figura 3 muestra el arreglo experimental de una probeta de andesita instrumentada con sensores de EA.

Se emplearon tres sensores piezoeléctricos para monitorear la EA. En la superficie de la probeta se colocaron dos sensores, uno sintonizado a 60 kHz y otro a 150 kHz. Al tercero, de banda ancha, se lo adhirió al plato de carga inferior teniendo en cuenta la propiedad de buena guía de onda del metal involucrado. El equipo de EA se completó con una placa de dos canales de (Physical Acoustic Corporation) y

se utilizó el *software* comercial *AEWIN* para el análisis y determinación de la mayoría de los parámetros característicos de las señales.

Modelo de fractura. Frecuencia esquina

D. Filipussi, Piotrkowski, y Ruzzante (2012) simulan una señal de EA cuya fuente es una fisura que se propaga en un medio material frágil, homogéneo e isótropo, a partir de un modelo de fractura cuyos fundamentos provienen de la geofísica (Aki y Richards, 1980). La duración del evento de EA, su amplitud y tiempo de subida son estimados por el modelo y se relacionan con características de la fuente. El análisis del espectro de Fourier de la señal de EA obtenida del modelo está dado por la ecuación (1).

$$|\hat{\Omega}(\omega)| = \frac{U_0 A}{\sqrt{1 + \omega^2 T}} \left| \frac{\text{sen}\left(\frac{\tau_0 \omega}{2}\right)}{\frac{\tau_0 \omega}{2}} \right| \quad (1)$$

Donde, es la transformada de Fourier del campo de desplazamiento; U_0 , el valor máximo alcanzado por la discontinuidad del desplazamiento en la fractura; A , el área de la fractura; T , el tiempo en



Figura 3. Configuración experimental y equipo de medición de EA

Fuente: elaboración propia.

alcanzar la discontinuidad un 63 % de U_0 , y τ_o , el tiempo de subida de la señal a detectar. En el espectro teórico determinado por el modelo se observa que la señal es constante a bajas frecuencias y luego decrece a frecuencias más altas con la inversa del cuadrado de la frecuencia. La frecuencia de encuentro de estas dos tendencias del espectro en una escala *log-log* se denomina *frecuencia esquina* f_c . El modelo predice también que la longitud de la fractura es inversamente proporcional a la frecuencia esquina y está dada por la ecuación (2).

$$L = \frac{v}{2\pi f_c(1 - \eta \cos\theta)} \quad (2)$$

Donde $\hat{\Omega}(\omega)$, L es la longitud de la fisura; $\eta = \frac{v}{c}$ es la proporción entre la velocidad de avance de la fractura y la velocidad de onda del sonido en el medio material (η vale cerca de 1 para un material frágil); θ es el ángulo de detección respecto a la línea de avance de la fractura.

En este trabajo se estimó la longitud de las fisuras con esta última ecuación, a través de la medición de las frecuencias esquinas de las señales adquiridas en los instantes de tiempo en que la energía del *hit* alcanza valores máximos relativos. Se consideró que $\eta = 0.7$ por ser el material frágil, que la detección fue aproximadamente en la línea de avance de la fractura ($\theta = 0^\circ$) y que la velocidad de propagación de onda en la andesita es $c = 4500 \frac{m}{s}$ como se menciona en Schön (2011).

En la [figura 4](#) se muestra un *hit* y en la [figura 5](#) su correspondiente espectro en escala *log-log*, donde se indica la frecuencia esquina determinada por el punto de intersección de las tendencias a baja y alta frecuencia.

Los *hits* seleccionados para la obtención de la frecuencia esquina corresponden a aquellos intervalos de tiempo donde el valor cuadrático medio RMS de las señales alcanza un máximo relativo, como se muestra en la [figura 6](#).

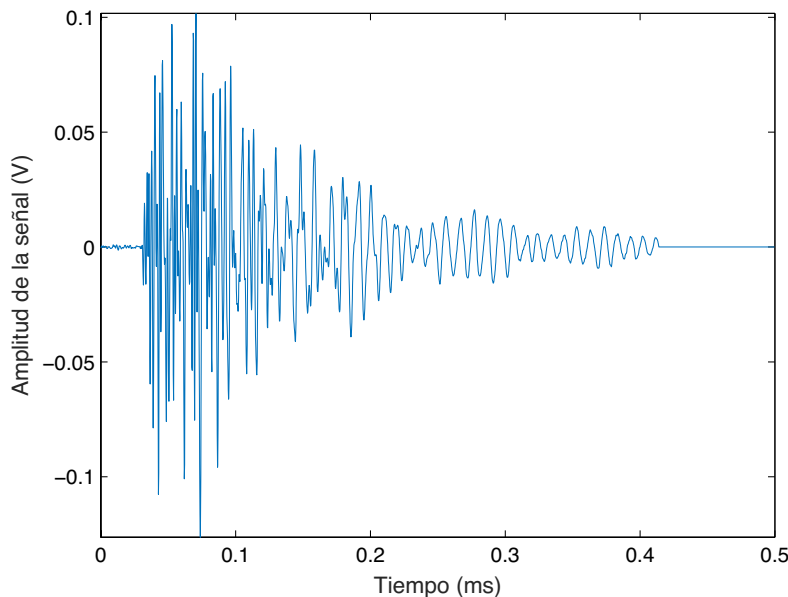


Figura 4. Gráfico de un *hit*

Fuente: elaboración propia.

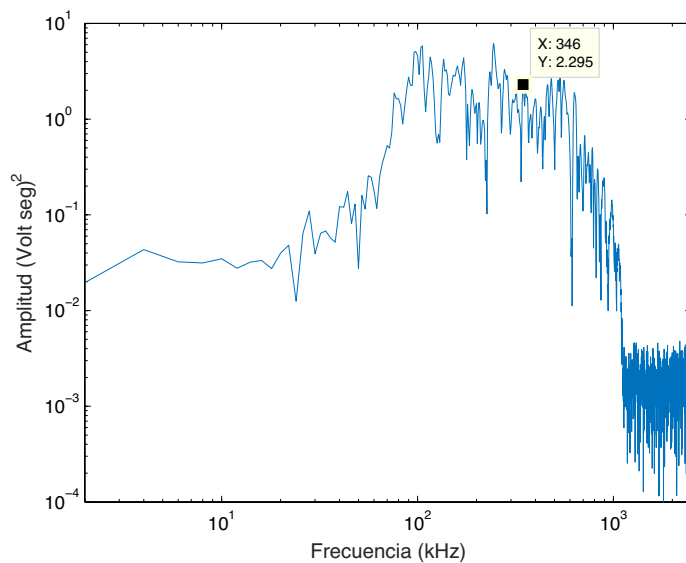


Figura 5. Espectro de Fourier de un *hit* en escala *log-log* con frecuencia esquina 302,1 kHz

Fuente: elaboración propia.

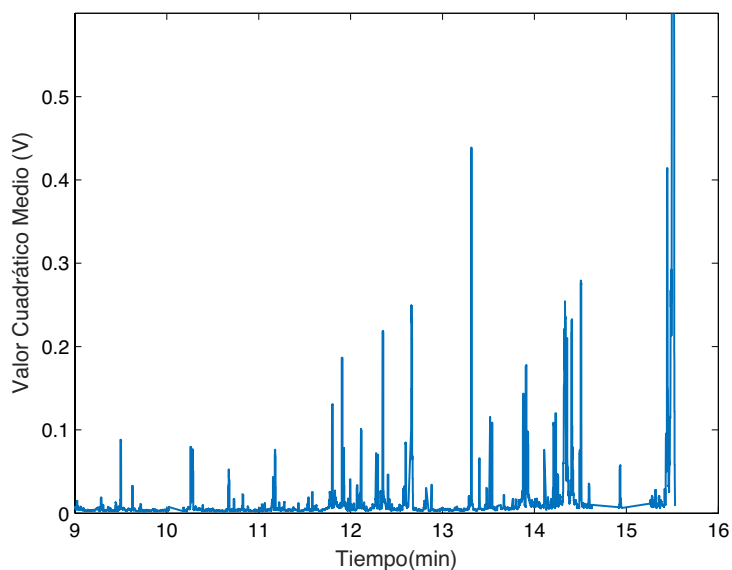


Figura 6. Valor cuadrático de cada *hit* en función del tiempo del ensayo

Fuente: elaboración propia.

La [tabla 1](#) detalla los valores de frecuencia esquina determinados para los tiempos indicados

que corresponden a un intervalo de tiempo que contiene a un máximo relativo de RMS.

Tabla 1. Frecuencia esquina y su correspondiente longitud de fisura

Tiempo (s)	Frecuencia Esquina (kHz)	Longitud de la fisura (mm)
615,60	239,6	5,53
615,74	302,1	4,39
615,88	197,9	6,70
616,02	270,8	4,89
616,18	302,1	4,39
616,34	354,2	3,74
616,52	270,8	4,89
616,73	291,7	4,54
616,91	302,1	4,39
617,18	291,7	4,54

Fuente: elaboración propia.

Transformada Wavelet continua

La transformada wavelet continua (*Continuous Wavelet Transform*, CWT) permite, como la transformada de Fourier, estudiar las componentes de frecuencia de una señal. Además, brinda información acerca de la localización temporal de dichas componentes. Siguiendo la exposición de Boggess y Narcowich (2009), se considera una función Wavelet $\Psi(t)$ que cumpla con los requisitos de ser continua, tener decaimiento exponencial e integral nula en \mathbb{R} . Bajo estas condiciones, la CWT de una función $f \in L^2(\mathbb{R})$ es la función $W_f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{C}$ definida por la ecuación (3).

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

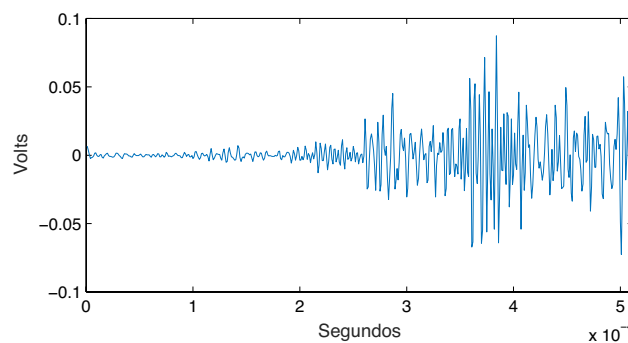
En el caso en que $a \neq 0$, mientras que $W_f(0, b) = 0$. La integral definida por la ecuación (3) compara la función $f(t)$ con la Wavelet $\Psi(t)$ después de un cambio de escala y una traslación temporal. De esta forma, el valor $W_f(a, b)$ mide la componente en frecuencia de la señal $f(t)$ proporcional a $(1/a)$ y localizada en torno al tiempo b .

En el presente trabajo se utilizó la Wavelet de Morlet definida por la ecuación (4).

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \cdot e^{6it} \cdot e^{-t^2/2} \quad (4)$$

Los detalles de implementación de la CWT para señales discretas pueden consultarse en el trabajo clásico de Torrence y Compo (1998). En la [figura 7](#) se ilustra uno de los *hits* estudiados y en la [figura 8](#) su correspondiente escalograma, es decir, un gráfico de la densidad de energía Wavelet correspondiente a cada tiempo y frecuencia.

A partir de la transformada Wavelet de una señal pueden filtrarse las frecuencias indeseadas eliminando los coeficientes correspondientes y reconstruyendo la señal. En la [figura 9](#) se ilustra el *hit* anterior filtrado entre 240 kHz y 300 kHz, y en la [figura 10](#), su correspondiente escalograma.

**Figura 7.** Gráfico de un *hit*

Fuente: elaboración propia.

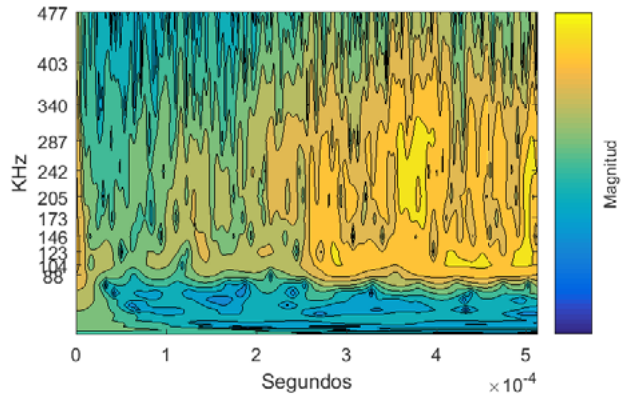


Figura 8. Escalograma de un *hit*

Fuente: elaboración propia.

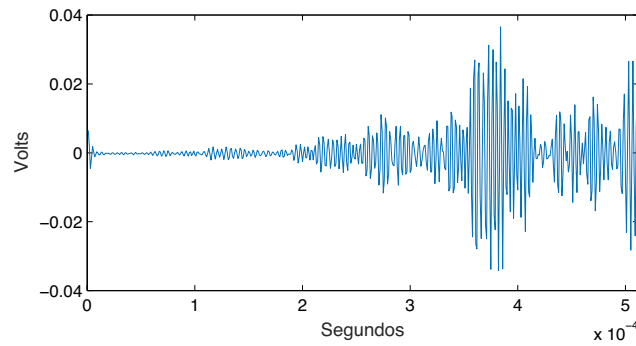


Figura 9. Gráfico de un *hit* filtrado

Fuente: elaboración propia.

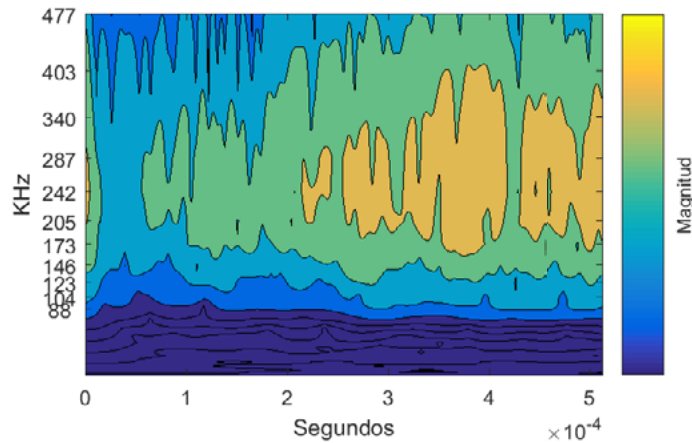


Figura 10. Escalograma de un *hit* filtrado

Fuente: elaboración propia

Aplicación al ensayo

Al aplicar la CWT a cada *hit* registrado en el ensayo se conocen sus componentes de frecuencia localizadas en el tiempo. El gráfico de la [figura 11](#) representa para cada *hit* la frecuencia de mayor energía. En el eje vertical se expresa la frecuencia en kHz y en el eje horizontal el tiempo real en segundos de ocurrencia del *hit* durante el ensayo. Se aprecia que las componentes de mayor frecuencia se manifiestan hacia el final del ensayo.

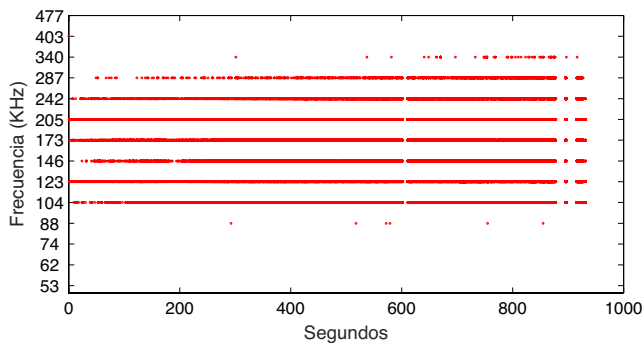


Figura 11. Frecuencia de máxima energía de cada *hit*

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Conteo de *hits* a diferentes frecuencias

Frecuencia (kHz)	Cantidad de <i>hits</i>
88	6
104	7066
123	21386
146	6589
173	10373
205	12769
242	15603
287	1527
340	66
403	1

Fuente: elaboración propia.

Las dos frecuencias para las cuales se alcanza más veces el máximo de energía son 123 kHz y 242 kHz. La [figura 12](#) se obtuvo después de filtrar

los *hits* para valores próximos a la frecuencia esquina: entre 240 kHz y 300 kHz. Una vez más, se indica la frecuencia a la que cada *hit* alcanza su máxima energía. En esta ocasión, se agrega un círculo cuyo diámetro y color responden al nivel de energía alcanzado. Aunque no es concluyente, se aprecia cierta tendencia a que los *hits* más energéticos se den hacia el final del ensayo.

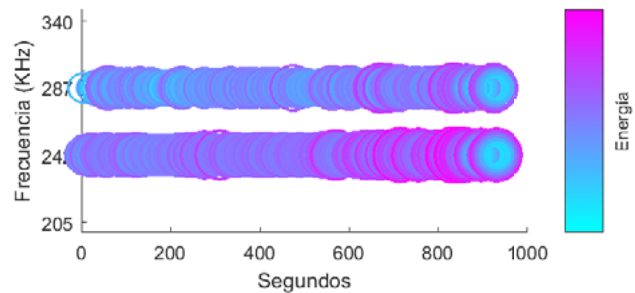


Figura 12. Frecuencias características luego de filtrar en base a la frecuencia esquina

Fuente: elaboración propia.

Wavelet energy b-value

Siguiendo a Sagasta *et al.* (2018), se presenta una adaptación de la ley de Gutenberg-Richter usada en sismología. En este contexto, la EA se interpreta como sismología de pequeña escala. Para ello se considera la energía wavelet (*AEE*) de cada señal reconstruida luego del filtrado (ecuación (5)).

$$AEE = \sum x_i^2 \cdot \Delta t \quad (5)$$

Luego se la vincula con la cantidad *N* de *hits* cuya energía supera un valor dado de *AEE*. La [figura 13](#) ilustra esta relación para la probeta del ensayo, con los *hits* reconstruidos luego del filtrado entre 240 kHz y 300 kHz. Para cada *hit* representado se asigna además un color que indica su ocurrencia en el tiempo. Una vez más se aprecia que los *hits* de mayor energía ocurren hacia el final del ensayo.

Como sugiere el gráfico, se puede postular una relación lineal entre los logaritmos de estas variables (ecuación (6)).

$$\log_{10}N(AEE) = a - b_E \cdot \log_{10}(AEE) \quad (6)$$

El *Wavelet Energy b-value* (bWE) se define justamente como el valor b_E de esta fórmula. Un

valor grande de b_E indica una rápida variación de N con respecto a la energía, lo cual representaría un régimen de fractura estable. Esto es usualmente indicativo de una gran cantidad de eventos de energía relativamente baja, lo cual es consistente con procesos de creación de microfisuras o de crecimiento lento de fisuras. En cambio, un valor pequeño de b_E indica

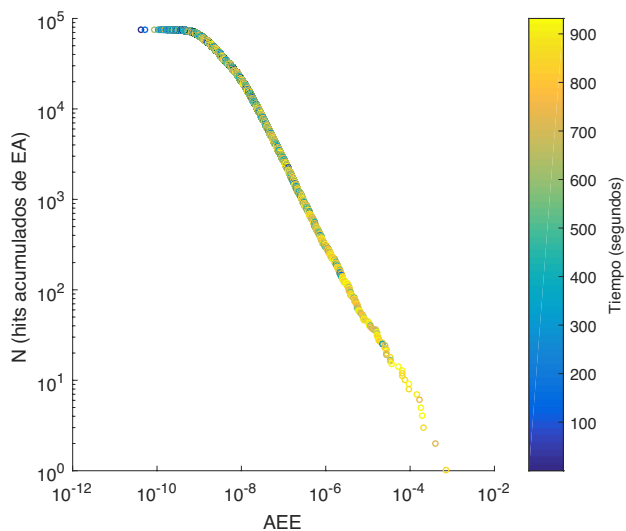


Figura 13. N vs AEE

Fuente: elaboración propia.

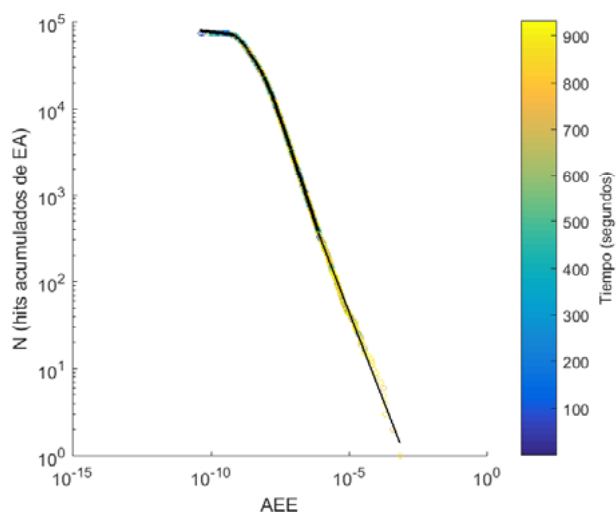


Figura 14. N vs. AEE . Ajuste por cuadrados mínimos

Fuente: elaboración propia.

una variación brusca de energía en pocos *hits*, lo que sugiere la formación de macrofracturas o crecimiento rápido de fracturas. Es importante identificar los valores de energía para los cuales se alcanzan mínimos locales del índice. La

figura 14 ilustra las rectas de cuadrados mínimos obtenidas al dividir el intervalo de *AEE* en subintervalos de igual cantidad de *hits* y calcular b_E en cada uno de ellos. La figura 15 muestra el bWE obtenido para distintos subintervalos.

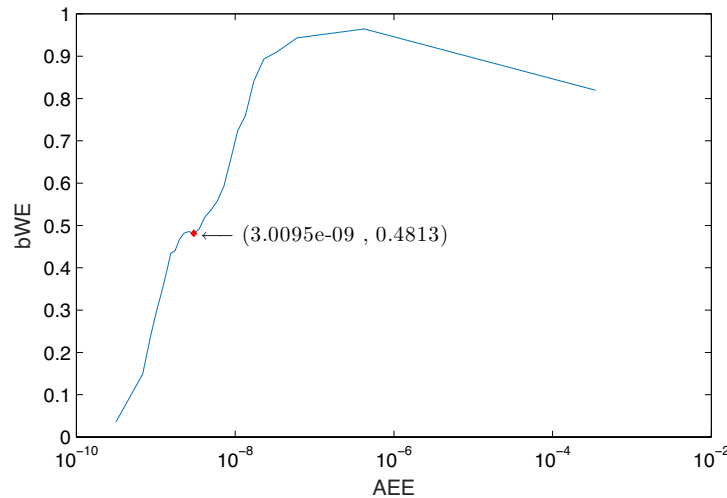


Figura 15. bWE obtenido para distintos subintervalos

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

La frecuencia característica obtenida mediante la CWT resulta consistente con los resultados para la frecuencia esquina (ver tabla 2, donde se hace el conteo de *hits* a diferentes frecuencias).

El estudio de la evolución del bWE para las distintas bandas de frecuencia sugiere la existencia de energías características que se pueden asociar a distintos mecanismos de fracturas en las rocas. Los mínimos locales de bWE (figura 15) identifican estos valores críticos de AEE.

CONCLUSIONES

A partir de un ensayo de una probeta de andesita bajo compresión uniaxial llevada a la rotura y del registro de EA mediante un sensor de banda ancha, se pudo identificar en los *hits* de mayor energía

una frecuencia esquina del orden de 300 kHz que se correspondió con una longitud de fisura del orden de 5 mm.

Los resultados obtenidos con el análisis Wavelet permiten una mayor precisión en la determinación de frecuencias características, que fueron 123 kHz y 242 kHz, siendo esta última consistente con la frecuencia esquina. La combinación de ambos criterios, frecuencia esquina y máximo de energía de la CWT permitió, filtrando entre 240 kHz y 300 kHz, encontrar con precisión las frecuencias de 242 kHz y 287 kHz que se podrían asignar a mecanismos de fractura. El bWE calculado en la banda 240-300 kHz permitió hallar, mediante la localización de mínimos locales, valores críticos de energía que identificarían la aparición de macrofisuras. Los *hits* de mayor energía se manifiestan preponderantemente hacia el final del ensayo.

FINANCIAMIENTO

Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Departamento ICES.

Este trabajo tiene apoyo financiero y es parte del Programa UBACyT 20020160100038BA.

REFERENCIAS

- Aki, K. y Richards, P.G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. Sausalito, CA: University Science Book. Recuperado de https://books.google.com.ar/books?id=k8R_QgAACAAJ
- Boggess, A. y Narcowich, F.J. (2009). *A first course in wavelets with Fourier analysis*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1485592>
- Carpinteri, A., Lacidogna, G. y Puzzi, S. (2009). From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0. *Chaos, Solitons and Fractals*, 41(2), 843-853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2008.04.010>
- Filipussi, D.A., Guzmán, C.A., Xargay, H.D., Hucaíluk, C. y Torres, D.N. (2015). Study of Acoustic Emission in a Compression Test of Andesite Rock. *Procedia Materials Science*, 9, 292-297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.MSPRO.2015.04.037>
- Filipussi, D., Piotrkowski, R. y Ruzzante, J. (2012). Characterization of a Crack by the Acoustic Emission Signal Generated During Propagation. *Procedia Materials Science*, 1, 266-272. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.036>
- Hoek, E. y Bieniawski, Z.T. (1965). Brittle fracture propagation in rock under compression. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(3), 137-155. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00186851>
- Lockner, D. (1993). The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* y *Geomechanics Abstracts*, 30(7), 883-899. doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90041-B](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B)
- Mirmohammadlou, A., Memarian, H., Mohammadi, S. y Jafari, M. (2017). Experimental and Numerical Investigation of Rock Dynamic Fracture. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 51(1), 37-46. doi: <https://doi.org/10.22059/IJMGE.2017.62151>
- Rao, M.V.M.S. y Prasanna Lakshmi, K.J. (2005). Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current Science*, 89(9), 1577-1582. doi: <https://doi.org/10.2307/24110936>
- Sagasta, F., Zitto, M.E., Piotrkowski, R., Benavent-Clement, A., Suarez, E. y Gallego, A. (2018). Acoustic emission energy b -value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 262-277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.09.022>
- Scholz, C.H. (1968). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 73(4), 1417-1432. doi: <https://doi.org/10.1029/JB073i004p01417>
- Schöñ, J. (2011). *Physical properties of rocks: a workbook*. Amsterdam: Elsevier.
- Shiotani, T., Yuyama, S., Li, Z.W. y Ohtsu, M. (2001). Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials. *Journal of Acoustic Emission*, 19, 118-133.
- Torrence, C. y Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61-78. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APG-TWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APG-TWA>2.0.CO;2)
- Zhang, J. (2018). Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks. *Shock and Vibration*, 2018, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/3057628>

