

# Variación espacio-temporal del valor $b$ en el Volcán Cerro Machín, Colombia

John Makario Londoño<sup>1,2\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia. (\*) [jmakario@ucm.edu.co](mailto:jmakario@ucm.edu.co)

<sup>2</sup>Servicio Geológico Colombiano. Manizales, Colombia.

## Resumen

Se llevó a cabo un estudio de la variación espacio-temporal del valor  $b$  de la relación frecuencia-magnitud de sismos ocurridos en el Volcán Cerro Machín (VCM), Colombia, para el período 2007-2020. Se pudo establecer que el valor  $b$  presenta variaciones espaciales caracterizadas por valores altos (1,1-1,3) en la parte superficial del volcán, debajo del domo principal y hasta una profundidad de 1 km. Entre 1 y 6 km de profundidad, se observaron valores normales a bajos (0,8-0,6). Bajo el domo Tapias, entre 8 y 13 km de profundidad, se observaron valores altos de  $b$  (1,1-1,3). Estos valores anómalos indicarían zonas de circulación de fluidos hidrotermales en la parte superficial y posibles reservorios de magma en la parte más profunda del VCM. Adicionalmente, se observaron variaciones temporales del valor  $b$ ; se destacan tres cambios importantes, relacionados con variaciones en la actividad del VCM: el primero, ocurrido en noviembre 2008, se asoció con un enjambre al NE y E del domo principal (3-5 km de profundidad); el segundo, ocurrido en agosto-diciembre 2010, se asoció con la presencia de sismicidad profunda (12-18 km) a unos 8 km al SE del domo principal, y el tercero, ocurrido en febrero de 2018, se asoció con un enjambre sísmico (3-5 km de profundidad) al SW del domo principal. Estos tres cambios se interpretan como posibles intrusiones de pulsos de magma, asociadas a un dique o silo superficial (<4 km de profundidad) y a una entrada de magma a mayores profundidades (>15 km). Algunos de estos cambios en el valor  $b$  estuvieron asociados con cambios geoquímicos o de deformación de la superficie. Los resultados de este estudio muestran que el cálculo rutinario del valor  $b$  sirve como herramienta de monitoreo volcánico para el VCM.

**Palabras clave:** Dique; Silo; Cambios geoquímicos; Sismicidad; Intrusión magmática; Deformación.

## Spatial and temporal variation of b-value at Cerro Machín volcano, Colombia

### Abstract

A study of the spatiotemporal variation of b-value for earthquakes that occurred at Cerro Machin Volcano (CMV), Colombia was carried out for the period 2007-2020. b-value showed spatial variations, with high values (1.1-1.3) at the shallow portion of the volcano, beneath the main dome up to 1 km depth from the top of the volcano. Normal to low b-values (0.8-0.6) were observed between 1 and 6 km depth all around the volcano, while high b-values (1.1-1.3) were observed beneath the Tapias dome between 8 and 13 km depth. These b-values could indicate circulation of hydrothermal fluids at shallow depths, and a possible magma reservoir at deeper portions beneath the CMV. In addition, temporal variations of the b-value were observed during the study period. Three remarkable episodes of increase in b-value were detected related to changes in CMV activity. The first, which

Forma de citar: Londoño, J.M. (2022). Variación espacio-temporal del valor  $b$  en el Volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 143-158. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022006>

occurred in November 2008, related to a strong earthquake swarm (3-5 km depth) located to the NE and E of the main dome. The second, occurred between August and December 2010 related to deep seismicity (12-18 km depth), 8 km southeast of the main dome. The third occurred in February 2018 related to a strong earthquake swarm (3-5 km depth) located to the SW of the main dome. These three episodes are interpreted as pulses of magma at the volcanic system of CMV, associated with a dike or sill intrusion (<4 km depth) and input of magma to a deeper reservoir of CMV (>15 km depth). Some of these changes in the  $b$ -value were correlated to changes in geochemistry and ground deformation. The results of the study confirm the idea of the routine task of  $b$ -value calculation as a volcano monitoring tool for CMV activity.

**Keywords:** Dike; Sill; Geochemical changes; Seismicity; Magma intrusion; Ground deformation.

## Introducción

El vulcanismo es uno de los fenómenos geológicos más devastadores a los que se ha enfrentado el hombre. En particular, por la naturaleza y duración de las erupciones volcánicas, las cuales pueden llevar a veces a evacuar y relocalizar poblaciones enteras, con todas las implicaciones sociales, políticas y ambientales que esto conlleva. En Colombia, se conocen, hasta la fecha, 23 volcanes activos, localizados principalmente en la cordillera Central y cerca a varias de las regiones más pobladas y estratégicas del país, como el Eje Cafetero, la zona del Cauca y Nariño, entre otras.

Entre los volcanes más explosivos y peligrosos de Colombia, se encuentra el Volcán Cerro Machín (VCM), un volcán con composición geoquímica félsica, el cual ha presentado actividad explosiva en los últimos 5 ka. Su última erupción importante se registró hace 900 años (Méndez *et al.*, 2002). Se estima que su ciclo de actividad eruptiva violenta se produce cada 900 años, razón por la cual es de vital importancia estudiar este volcán en detalle, ya que una erupción en la actualidad del VCM podría causar una gran tragedia ambiental, social y económica para Colombia. También se estima que el occidente de Colombia quedaría aislado de la parte central y oriental del país, debido a que la vía terrestre conocida como La Línea sufriría enormes afectaciones. Por otra parte, el municipio de Cajamarca, con cerca de 15.000 personas, podría desaparecer en minutos si una gran erupción del VCM ocurriera. Además, gran cantidad de municipios del Tolima y algunos de Cundinamarca se verían afectados por lahares que se generarían durante y después de la erupción. Este panorama de riesgo volcánico indica que es de gran importancia conocer en el mayor grado posible el comportamiento del VCM desde diferentes puntos de vista y disciplinas.

Desde que Gutenberg y Richter (1954) establecieron la relación frecuencia-magnitud (FM) de los sismos

( $\log_{10} N = a - bM$ ; donde  $N$  = número de sismos acumulados con magnitud mayor o igual a  $M$ ,  $a$  = productividad sísmica,  $b$  = pendiente o valor  $b$ ), esta ha sido usada ininterrumpidamente para obtener información sobre la actividad sísmica de una región. Con el pasar del tiempo, se pudo determinar que esta relación brinda más información que la simple actividad sísmica de una región. Varios estudios han demostrado que cambios en las condiciones del medio como la presión de poros, variaciones en la temperatura, acumulación de esfuerzos, entre otros, hacen que el parámetro conocido como valor  $b$ , o la pendiente de la relación FM, varíe (Scholz, 1968; Warren y Latham, 1970; Wyss *et al.*, 1997; Wiemer y Wyss, 2000, entre otros). El valor de 1 para  $b$  ha sido considerado el valor normal de la relación entre sismos grandes y pequeños, mientras que valores por encima o debajo de 1 se consideran anómalos. La distribución espacial del valor  $b$  ha sido usada como ayuda para determinar zonas donde este parámetro presenta valores anómalos. Estas zonas permiten identificar parte de la estructura interna de una región. En particular, en zonas volcánicas, el mapeo o distribución espacial del valor  $b$  ha permitido definir zonas con valores anómalos mayores a 1, que posiblemente están asociadas con acumulación de magma o fluidos (Wyss *et al.*, 1997; Wiemer y Wyss, 1997; Wyss *et al.*, 2001; McNutt, 2005; Sánchez *et al.*, 2005; Londoño y Rodríguez, 2013; Chiba y Shimizu, 2018). Por su parte, se han reportado cambios temporales en el valor  $b$  antes de la ocurrencia de sismos (Smith, 1986; Enescu e Ito, 2001; Tsukakoshi y Shimazaki, 2008; Mallika *et al.*, 2013; Zheng y Zhou, 2014; Chen y Zhu, 2020) y erupciones volcánicas (Patanè *et al.*, 1992; Nishimura *et al.*, 2016). Esto demuestra la utilidad del valor  $b$  como herramienta de monitoreo sísmico y volcánico, aunque hasta la fecha no se ha definido oficialmente por la comunidad científica como un premonitorio de sismos o erupciones volcánicas.

Algunos estudios sísmicos se han realizado para el VCM (Figura 1), el cual ha registrado sismicidad desde

que se inició su monitoreo sísmico continuo en 1989 (Londoño, 2004, 2012). Sin embargo, a la fecha no se ha realizado un estudio de la variación espacio-temporal del valor  $b$  en el VCM. Este trabajo busca realizar un análisis de la variación espacio-temporal del valor  $b$  en el VCM y establecer relaciones de esas variaciones con su actividad para el período 2007-2020.

### Actividad reciente del VCM

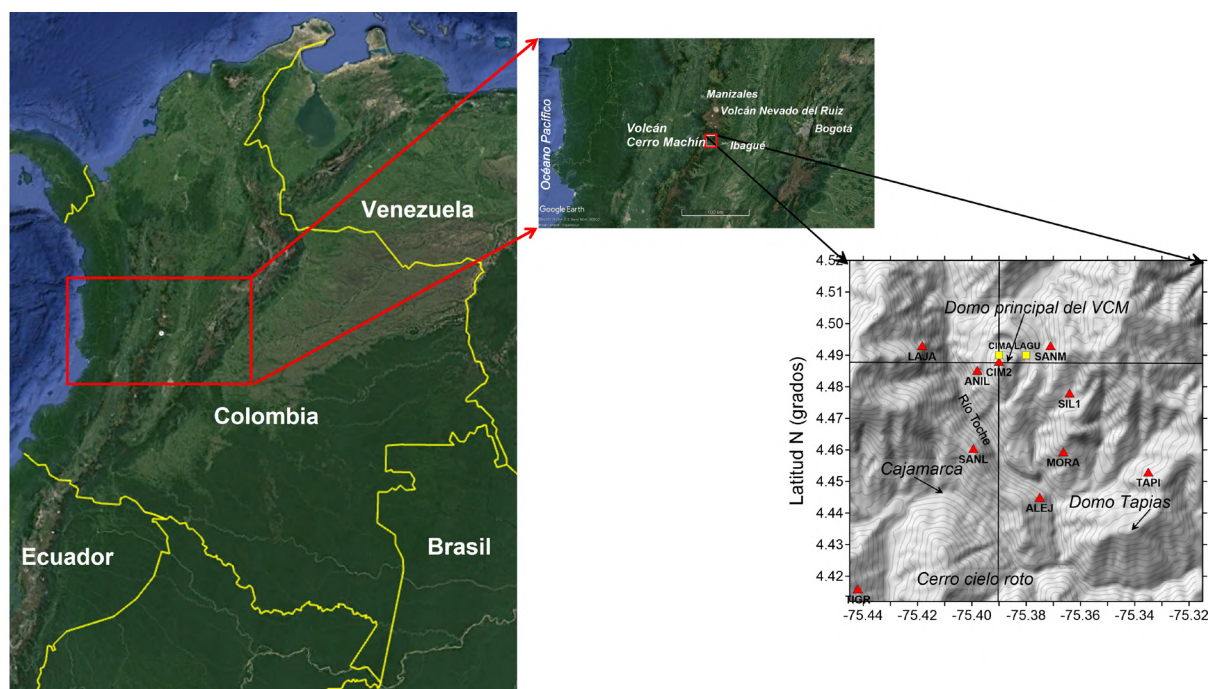
El VCM localizado en la cordillera Central de Colombia (Figura 1) es catalogado como uno de los volcanes más explosivos del país (Cepeda y Murcia, 2000). Se han podido identificar al menos seis erupciones importantes en los últimos 5000 años, la última hace 900 años (Rueda *et al.*, 2005). El monitoreo continuo del VCM se inició en 1989, y posteriormente en 2004 se diversificó la red de monitoreo, con diferentes estaciones instaladas en campo, que cubren disciplinas como sismología, geodesia, geoquímica y geofísica de campos potenciales.

En los últimos años, el VCM ha presentado incrementos en su actividad, particularmente en la actividad sísmica, deformación y geoquímica, lo cual evidencia cambios en los sistemas hidrotermal y magmático (Inguaggiato *et al.*, 2017). Se han observado cambios en la deformación en cercanías al domo principal, con una subsidencia o deflación hacia el SSW, mientras

que el resto de zonas han permanecido estables sin signos de deformación.

Entre 2008 y principios de 2013, el volcán mostró la mayor actividad sísmica registrada hasta la fecha en términos de energía y número de sismos; se destaca el enjambre sísmico ocurrido en noviembre de 2008 hacia el NE y E del domo principal (INGEOMINAS, 2008), en el cual se registró el sismo de mayor magnitud observado hasta la fecha, ocurrido el 9 de noviembre ( $M_L$  4,9,  $prof=3,0$  km, a 1 km al E del domo principal). Así mismo, durante ese período, se registró sísmica distal (4-10 km) hacia el SE del domo principal, particularmente entre 2010 y principios de 2013 (julio 2010 a abril de 2011 y octubre 2012 a febrero de 2013), con profundidades entre 9 y 18 km, la cual no se había registrado anteriormente.

Así mismo, en enero de 2013, se pudo detectar geoquímicamente la entrada de un posible nuevo pulso de magma en la parte profunda del volcán, relacionada con un cambio en la firma isotópica en la relación  $R/R_a$  vs  $\log(C/3He)$ . Esta entrada de material magmático se evidenció al cambiar la relación  $R/R_a$  de 3,6 en noviembre de 2011 a 5,87 en enero de 2013. Simultáneamente, la relación  $\log(C/3He)$  pasó de 57% a 80% en esas mismas fechas, lo que indica un origen mantélico de dicho incremento (Inguaggiato *et al.*, 2017).

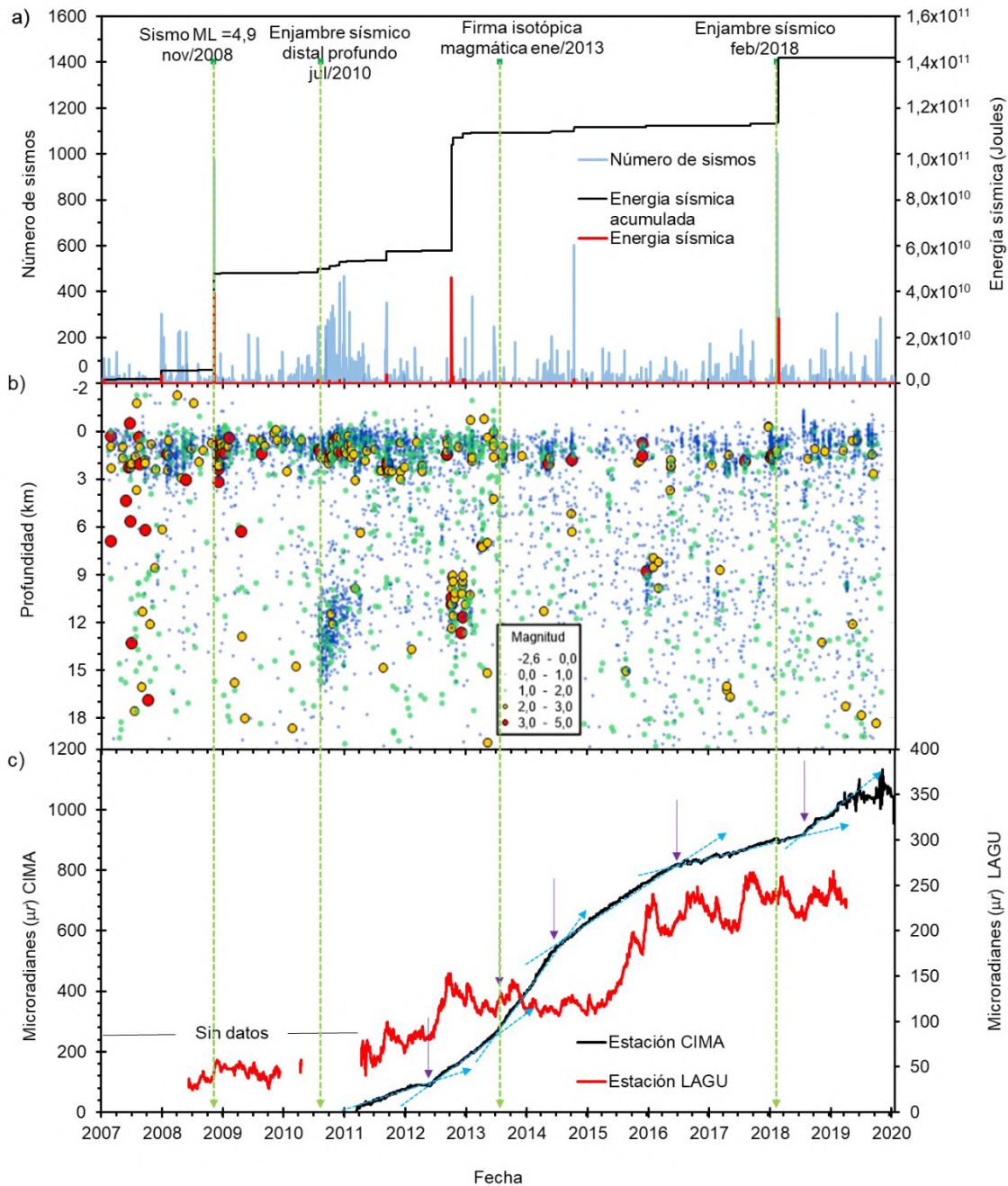


**Figura 1.** Localización del VCM y red de estaciones sísmicas usadas para la localización hipocentral de sismos (triángulos rojos). Los rectángulos amarillos representan la ubicación de dos inclinómetros electrónicos usados para el análisis.



En febrero de 2018, ocurrió un enjambre sísmico hacia el SW del domo principal, entre 3 y 5 km de profundidad, con el mayor número de sismos diarios registrado hasta la fecha, aunque no tan energéticos como en el período 2008-2012. La sismicidad de tipo volcánico-tectónica, asociada con fracturamiento

y agrietamiento de las rocas al interior del volcán, es la que predomina en el VCM (Figura 2), aunque en el período 2018-2019 se han registrado unas pocas señales sísmicas que podrían estar asociadas a actividad de fluidos dentro del volcán.



**Figura 2.** A. Series de tiempo de número de sismos y energía sísmica liberada diaria. B. Serie de tiempo de magnitud y profundidad. C. Vectores resultantes de inclinometría electrónica del VCM para el período 2007-2019. Las flechas gruesas verticales y punteadas de color verde representan eventos relevantes en la actividad del VCM. Las flechas punteadas de color azul representan tramos de la curva del vector resultante del inclinómetro electrónico CIMA con la misma pendiente, y las flechas delgadas de color violeta indican los puntos de cambio de la pendiente de dicha curva.

## Metodología

Para calcular el valor  $b$  ( $b$ ), se utilizó el método de máxima verosimilitud (Shi y Bolt, 1982; Aki, 1965; Utsu, 1965), mediante la expresión:

$$b = \frac{\log_{10}e}{(\bar{M} - M_{min})} \quad (1)$$

Donde  $\bar{M}$  es la magnitud promedio y  $M_{min}$  es la magnitud mínima de una muestra de datos, que puede expresarse en función de la magnitud de completitud,  $M_c$ . Así mismo, Bender (1983) y Utsu (1999), entre otros, establecieron un  $\Delta M$  correspondiente a un "bin" o rango de magnitudes agrupadas o acumuladas, que por lo general tiene un valor de 0,1, modificando la fórmula de Aki (1965) y Utsu (1965) así:

$$b = \frac{\log_{10}e}{(\bar{M} - (M_c - \Delta M/2))} \quad (2)$$

De acuerdo con Aki (1965), el valor  $b$  obtenido por la fórmula de Utsu (1965) (ecuación 1) es la estima con máxima verosimilitud; este autor también propuso los límites de confianza de dicha estimación para diferentes muestras, estableciendo que:

$$\frac{(1 - d_\epsilon/\sqrt{n})}{\sum_i^n \frac{M_i}{n-M_c}} \leq b' \leq \frac{(1 + d_\epsilon/\sqrt{n})}{\sum_i^n \frac{M_i}{n-M_c}} \quad (3)$$

Donde  $b'=b/\log_{10}e$ ,  $d_\epsilon=1,96$  para una probabilidad ( $\epsilon$ ) del 95% o un nivel de confianza del 95%. Aki (1965) define además los valores de  $d_\epsilon/\sqrt{n}$  para diferentes niveles de confianza y muestras.

Para determinar la porción de la curva FM, donde esta toma una forma lineal, y sobre la cual en la práctica se calcula el valor de la magnitud de completitud,  $M_c$ , de la que depende en gran medida el valor  $b$ , existen diferentes métodos (Woessner y Wiemer, 2005; Mignan y Woessner, 2012). En este trabajo se utilizó el método de máxima curvatura, MaxC (Wiemer y Wyss, 2000), que se basa en cambios en la distribución de FM o cambios en la pendiente de dicha curva. Este método proporciona un valor de  $M_c$  confiable de manera rápida, y busca el máximo punto de curvatura, el cual

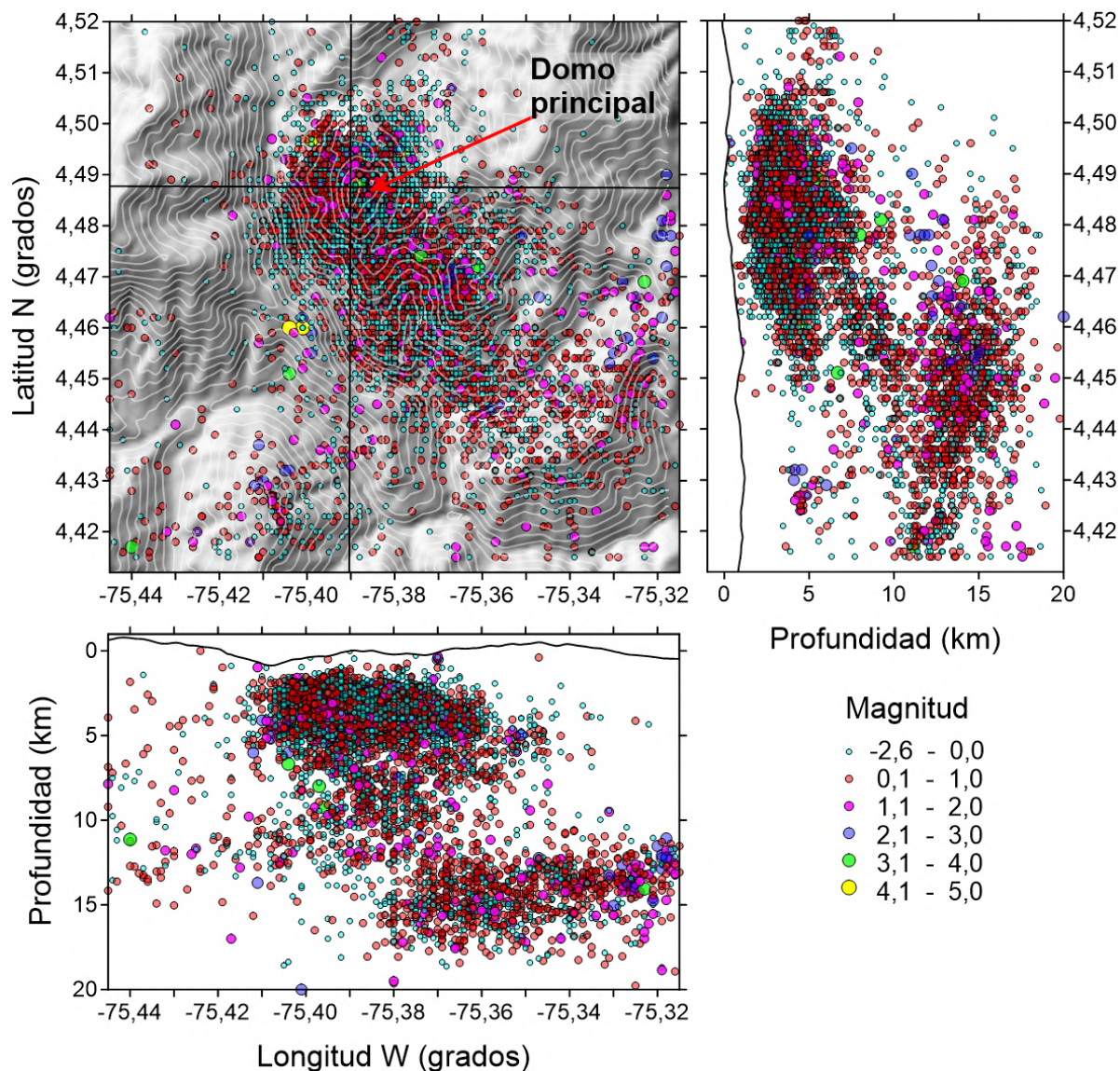
se define como el valor máximo de la primera derivada de la curva FM, que coincide con el *bin* de magnitud que contiene la más alta frecuencia de eventos en la curva FM no acumulada. Este método, por lo general, produce un valor subestimado de  $M_c$ , ya que puede omitir curvaturas graduales en la curva FM debido a las posibles heterogeneidades espaciales o temporales. No obstante, según Mignan y Woessner (2012), si se eliminan dichas heterogeneidades, la técnica de MaxC no subestima los valores de  $M_c$ .

Para mapear la distribución espacial del valor  $b$ , se utilizó el método de Wiemer y Wyss (1997), el cual consiste en discretizar la zona de estudio mediante una retícula, donde en cada nodo se define un cilindro vertical y se calcula el valor  $b$  usando un radio variable hasta alcanzar un número determinado de sismos (muestras) o mediante un radio y un número fijo de sismos. En este caso, se utilizó una retícula de  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  km, con un radio variable hasta encontrar 300 sismos para la distribución del valor  $b$  en perfil o profundidad, y se usaron estos mismos criterios, pero sin importar la profundidad del sismo, para el mapa del valor  $b$  en planta. Debido a la diferencia de calcular el valor  $b$  en planta y perfil, es posible observar discrepancias en cercanías a la superficie entre los valores de  $b$  en planta y perfil.

Para la variación temporal del valor  $b$ , se tomaron ventanas de tiempo de 90 días, con traslape de 30 días, y en cada una de ellas se calculó el valor  $b$  y su error estándar. Se elaboraron gráficas y mapas de distribución temporal y espacial del valor  $b$  para el VCM.

El catálogo sísmico fue facilitado por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Dicho catálogo de sismos abarca el período enero de 2007 a diciembre de 2019 y contiene un total de 12.155 sismos. Los sismos fueron localizados con el algoritmo HYPO71PC (Lee y Valdez, 1985) y un modelo de corteza propuesto por Londoño (2004). La Figura 3 muestra los hipocentros usados para el estudio. La magnitud local se calculó a partir de una fórmula derivada para la zona de estudio por Londoño (2016).



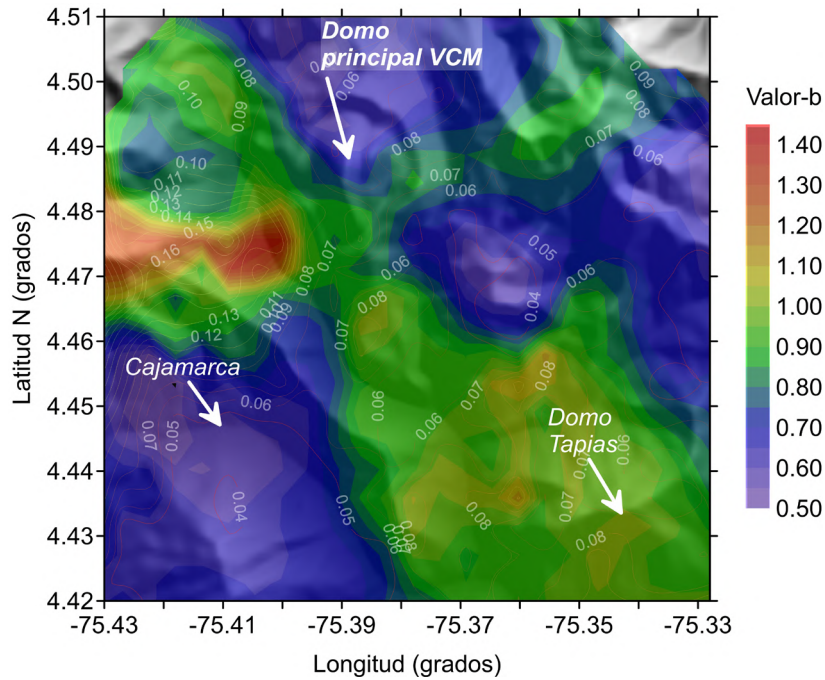


**Figura 3.** Hipocentros (círculos de colores) del período 2007-2019 usados para el análisis del valor  $b$ . Se muestran dos perfiles, EW y NS, cruzando por el domo principal.

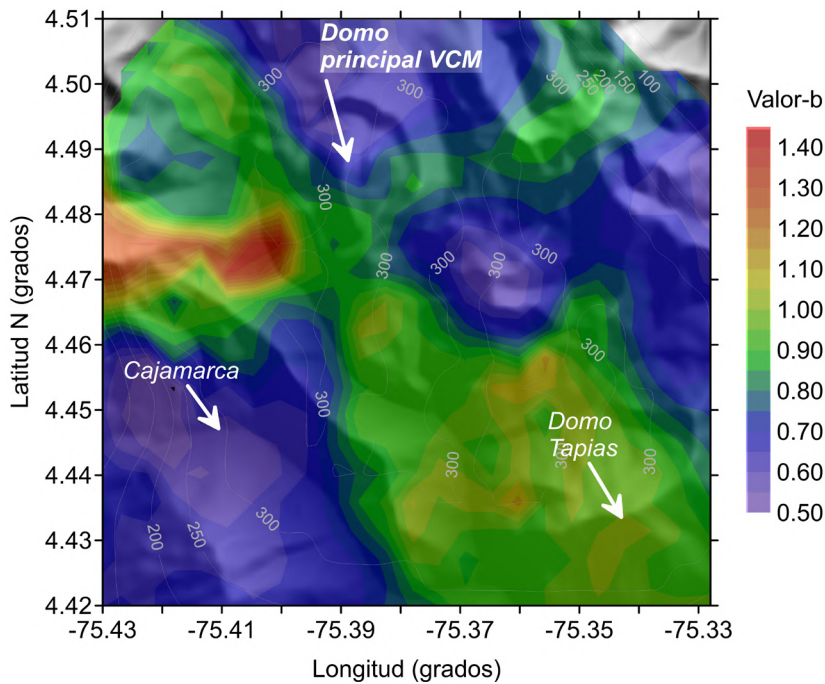
### Resultados

Antes de analizar los resultados obtenidos del cálculo espacial del valor  $b$  es necesario validarlos. Para ello, se elaboraron mapas del valor  $b$  superponiendo contornos de errores, número de sismos por nodo y de radio necesario (en km) para incluir 300 sismos en un nodo. Las Figuras 4, 5 y 6 muestran los resultados de la distribución espacial del valor  $b$ , su error, número de sismos y radio para cada nodo. En estas figuras se puede observar que los errores de los valores de  $b$ , en general, son bajos, en su mayoría menores a 0,07, si se toma como referencia un valor de 1,0 (Wyss *et al.*, 2001), aunque se pueden observar algunos valores más altos hasta máximo 0,23 hacia la parte SW del domo principal (Figura 4).

Por su parte, la distribución del número de sismos por nodo muestra que todos los nodos que cubren la zona del volcán presentan 300 sismos o más (Figura 5) en un radio menor a 1,5 km, tomado desde las coordenadas del nodo. Para los extremos NE y SW del volcán, no se obtuvieron buenos resultados del valor  $b$ , por lo que se consideran zonas con mala resolución, con menos de 200 sismos por nodo y radios mayores a 3 km para obtener un mínimo de 300 sismos (Figura 6). Estos resultados demuestran que los valores obtenidos del valor  $b$  para la zona que cubre el edificio del VCM son confiables y realistas y no se deben a artefactos matemáticos.

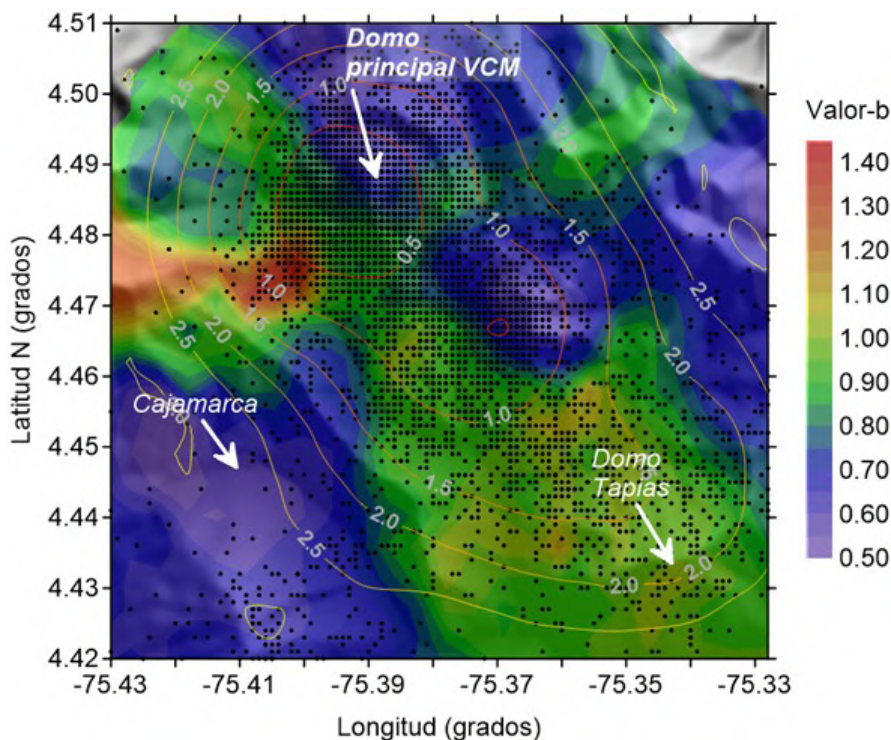


**Figura 4.** Distribución espacial en planta del valor  $b$  en el VCM. Las curvas de colores degradados de rojo a amarillo y rotuladas con texto de color blanco representan los contornos cada 0,01 del error del valor  $b$ , en el rango de 0,04 (línea roja) a 0,18 (línea amarilla).



**Figura 5.** Distribución espacial del valor  $b$  en el VCM. Los contornos rotulados con texto de color blanco representan los contornos del número de sismos por nodo, en el rango de 50 a 300.





**Figura 6.** Distribución espacial del valor  $b$  en el VCM. Las curvas de colores degradados de rojo a amarillo y rotuladas con texto de color blanco representan los contornos cada 0,5 km del radio volumétrico necesario para incluir 300 sismos para cada nodo, en el rango de 0,5 (línea roja) a 3 km (línea amarilla). Los puntos negros representan los epicentros de los sismos usados para el análisis.

Con miras a validar la confiabilidad e independencia de los valores  $b$  calculados espacialmente, se seleccionaron aleatoriamente tres nodos a los cuales se les calculó el valor  $b$  y se compararon las muestras tomadas para dicho cálculo. La **Figura 7** muestra los resultados. De esta figura es posible concluir que los tres valores son independientes y que las muestras usadas para el cálculo también lo son.

En la **Figura 4** se puede observar que, en general, los valores de  $b$  para el VCM son bajos ( $<0,7$ ) para las zonas del domo principal y hacia el SE del mismo, mientras que se observan valores relativamente altos para el SW del domo principal y para la zona SE más distal del edificio, cerca al domo de Tapias. La **Figura 8** muestra un perfil NW-SE cruzando el domo principal y el domo de Tapias, donde se observan los valores de  $b$  en profundidad. Para el cálculo de este perfil se usó la misma retícula de  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  km. De esta figura es posible observar que el VCM presenta tres zonas anómalas de valores  $b$  en profundidad; una localizada entre  $-1$  y  $1$  km de profundidad al SW

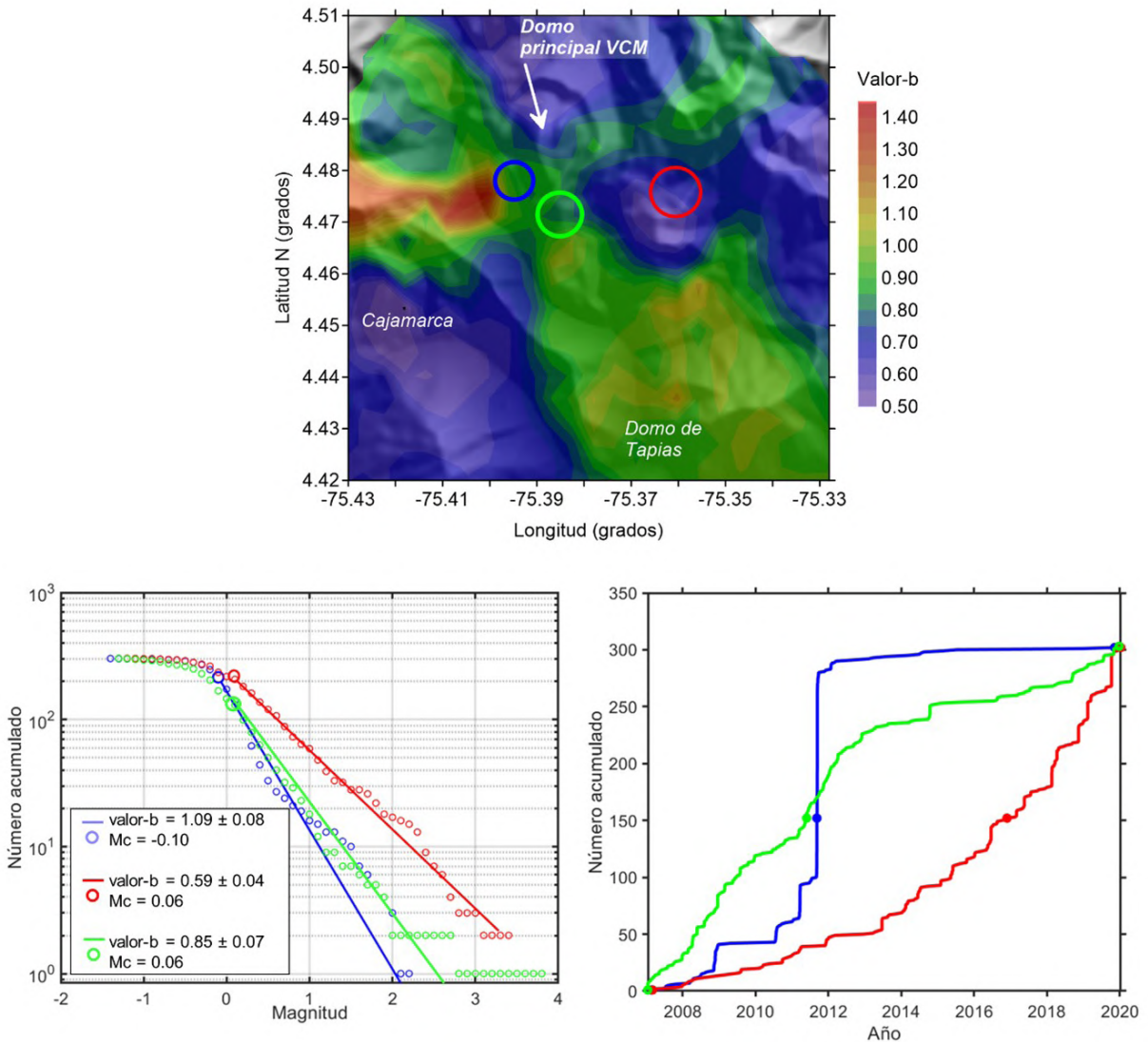
del domo ( $b > 1,3 \pm 0,13$ ); otra debajo del domo central entre  $0$  y  $1$  km ( $b > 1,3 \pm 0,13$ ) y otra entre  $8$  y  $13$  km de profundidad debajo del domo Tapias ( $1,2 \pm 0,1$ ).

La **Figura 9** muestra la variación temporal de la magnitud de completitud ( $M_c$ ) y del valor en el VCM entre 2007 y principios de 2020.  $M_c$ , en general, varió entre  $-1$  y  $0,7$ , con promedio cercano a cero. Se puede observar también que el valor  $b$  presentó cambios temporales; en particular, tres cambios importantes se pudieron detectar. El primero (1 en **Figura 9**), en el período diciembre 2007 a febrero de 2008, que varió de  $0,8$  antes de ese período hasta  $1,4$  durante ese período, luego descendió hasta  $0,55$  antes del sismo de  $M_L 4,9$  el 9 de noviembre de 2008. El segundo (2 en **Figura 9**), ocurrido en el período octubre a la primera mitad de noviembre de 2010, varió de  $0,8$  antes de ese período a  $1,5$  durante ese período, justo después de la aparición de sismicidad profunda ( $9-18$  km) localizada entre  $4$  y  $10$  km hacia el SE del domo principal. El tercero (3 en **Figura 9**), ocurrido en el mes de febrero de 2018,

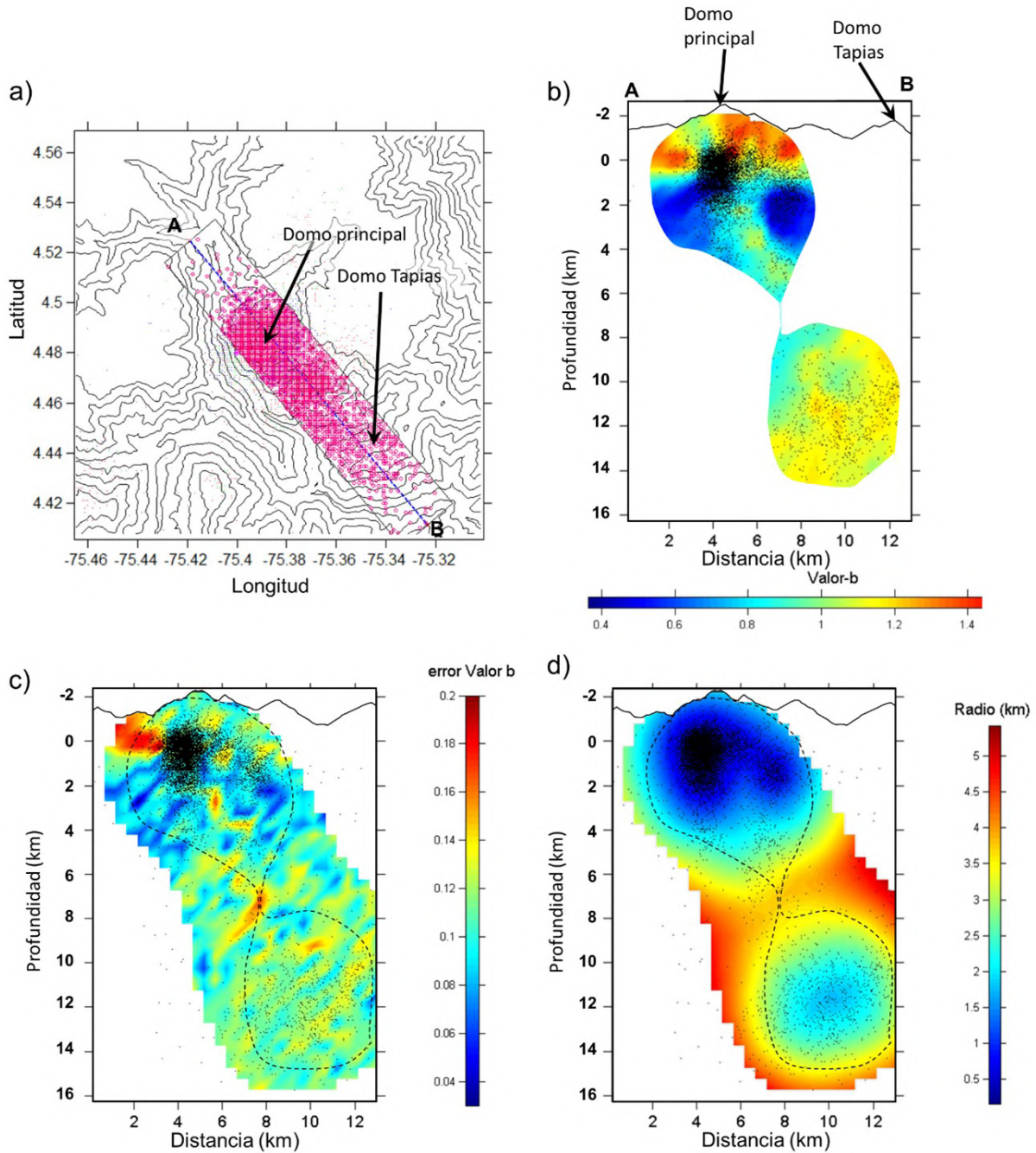


se asocia con un aumento importante de la sismicidad del VCM (Figura 2), variando los valores de  $b$  de 1,0 a finales de enero de 2017 a valores de 2,5 a mediados de febrero de 2018, luego de lo cual retornó a valores de 1,0 a finales del mismo mes. Entre noviembre de 2013 y noviembre de 2017, el valor  $b$  mostró inestabilidad, con una gran variación oscilatoria (0,6 a 1,5), sin mostrar una

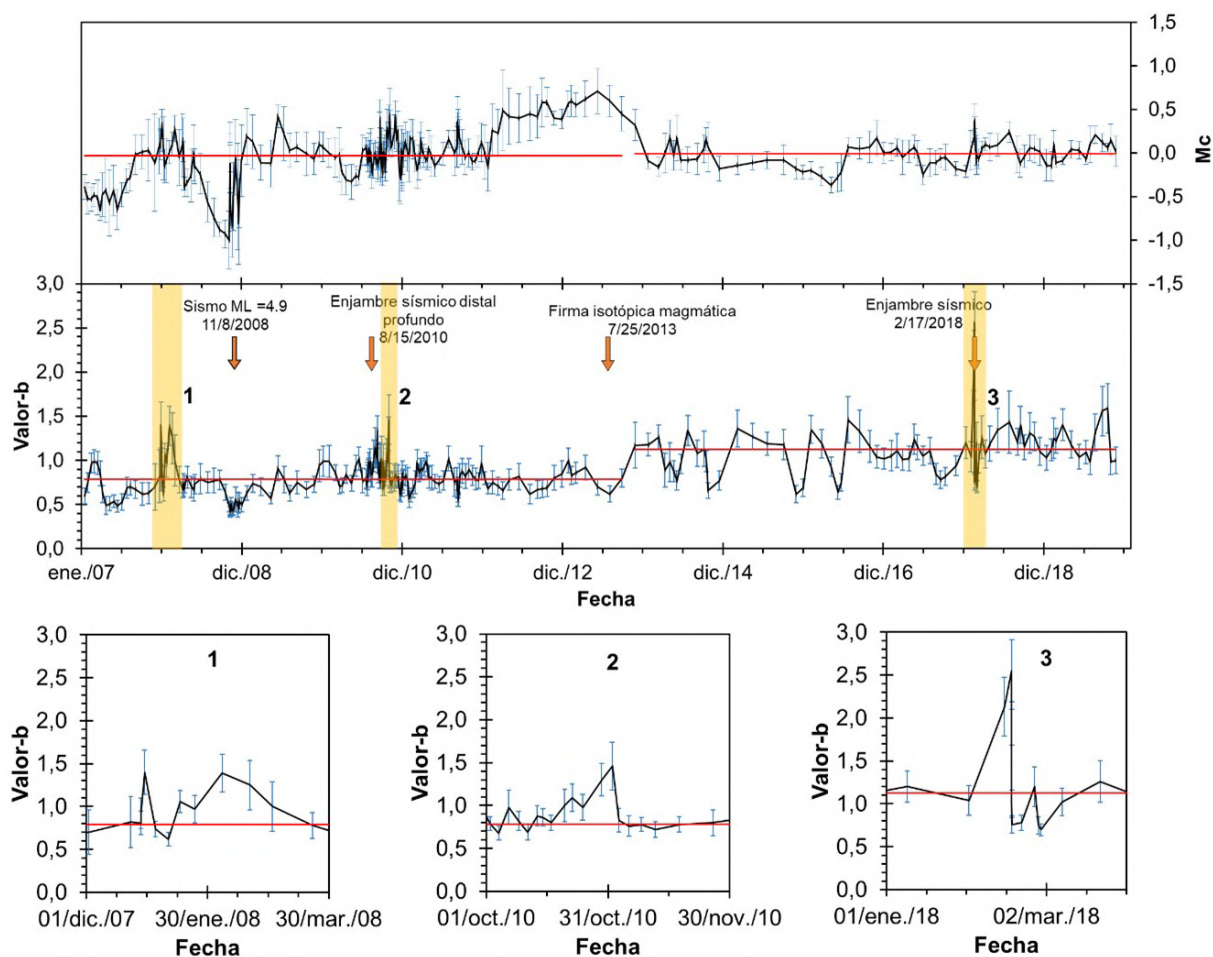
tendencia clara. Así mismo, también es posible observar en la Figura 9 que, a partir de octubre de 2013, el valor  $b$  aumentó su promedio, mientras que la  $M_c$  permaneció similar, por lo que es posible separar en dos grandes períodos los valores de  $b$  en el VCM para la ventana de tiempo analizada: entre enero de 2007 y septiembre de 2013, y entre octubre de 2013 y enero de 2020.



**Figura 7.** Comparación de valores  $b$  para tres nodos diferentes. Los radios de los círculos de color representan el radio necesario para incluir 300 sismos con los cuales se calculó el valor  $b$  en cada nodo. Cada línea y símbolo de color representa una muestra de datos en un nodo diferente.



**Figura 8.** A. Selección de sismos para cálculo del valor  $b$  en perfil. El ancho del perfil AB es 2 km a cada lado. B. Distribución espacial del valor  $b$  en perfil NW-SE. C. Distribución del error del valor  $b$ . D. Mapa de resolución con el radio necesario para incluir 300 sismos en cada nodo. Los círculos (en A) y los puntos (en B, C y D) representan los hipocentros. La línea punteada representa la zona con mejor resolución y sobre la cual se limita la distribución espacial del valor  $b$  en el perfil. El perfil topográfico se ha añadido para referencia.



**Figura 9.** Variación temporal de la magnitud de completitud ( $M_c$ ) y el valor  $b$  en el VCM.  $M_c$  y el valor  $b$  se calcularon para ventanas de 90 días con traslapo de 45 días. Las barras azules verticales representan el error estándar de  $b$  y  $M_c$ . Las líneas rojas representan promedios del valor  $b$  y  $M_c$  en diferentes rangos de fechas. Los números (1, 2, 3) y las barras horizontales de color amarillo representan tres rangos de fechas analizados con variaciones importantes (aumento) del valor  $b$  (ver texto). Las flechas de color naranja representan fechas de eventos importantes en la actividad del VCM.

### Análisis e interpretación

Para este estudio, no se realizó desagrupamiento (*declustering*) del catálogo sísmico, dado que la sismicidad del VCM básicamente se produce a manera de enjambres sísmicos, fenómeno que es intrínseco a un posible proceso de intrusión que puede estar presentando el VCM, y que no está relacionado con la historia sísmica de la zona (Van Stiphout *et al.*, 2012).

Por otra parte, de acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas sobre la independencia de los valores de  $b$  obtenidos en cada nodo, se asume que los valores de  $b$  obtenidos en este trabajo son independientes en cada nodo, lo que permite observar variaciones espaciales que se pueden originar en

los cambios reales en el valor  $b$ , más que en efectos estadísticos o de repetición de datos.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el valor  $b$  en la zona del VCM ha experimentado cambios tanto espaciales como temporales en el lapso estudiado (2007-enero 2020). Estos cambios podrían obedecer a variaciones en la actividad del VCM. Las tres zonas con valores anómalos altos de  $b$  ( $>1,2$ ) en profundidad, localizadas SW (-1, 1 km), debajo del domo principal (0, -1 km) y al SE del domo central (8-13 km), permiten suponer que es posible que estén asociadas a parte de la estructura interna del volcán y sus alrededores (Figura 8). La zona al SW más superficial podría estar asociada con material fluido y caliente, posiblemente

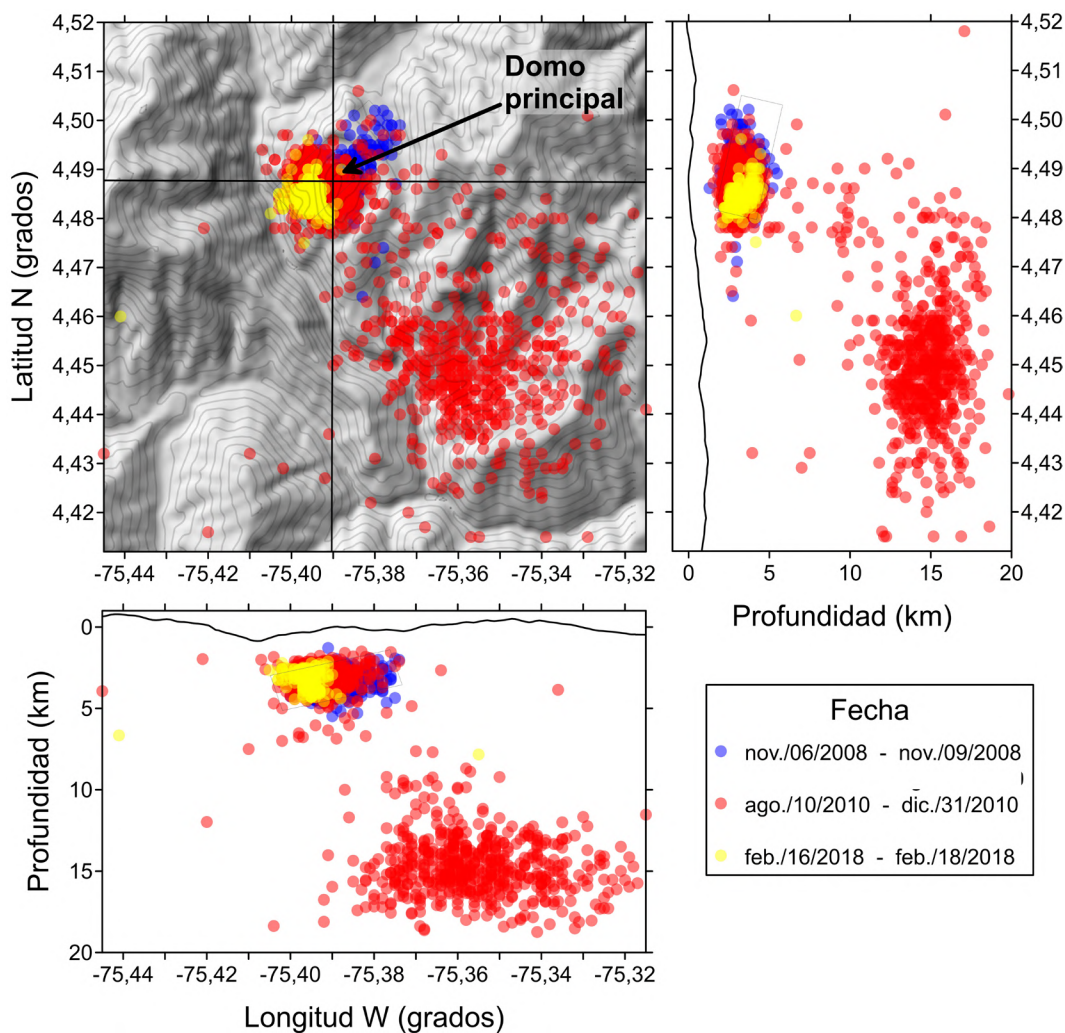


perteneciente al sistema hidrotermal del VCM, y que es en parte responsable de la actividad fumarólica y de fuentes termales con relativa alta temperatura que se encuentran en cercanías del domo central (Inguaggiato *et al.*, 2017). Por su parte, la zona anómala al SE, más profunda, podría estar relacionada con parte de uno de los reservorios magmáticos del VCM. La zona anómala debajo del domo central se podría relacionar con parte del sistema magmático superficial del VCM, posiblemente con parte de la estructura interna del domo central. Londoño (2012) realizó una tomografía sísmica 3D de velocidad para el VCM y definió una zona de baja velocidad entre 10 y 12 km de profundidad, coincidente con la zona anómala de valores de  $b$  hacia el SE del VCM, en cercanías al domo Tapias.

Por otra parte, las variaciones temporales del valor  $b$  estarían indicando cambios en la actividad del

volcán a través del tiempo. Los tres rangos de fechas en los que el aumento del valor  $b$  es más claro, descritos anteriormente y observados en la Figura 9, corresponden a períodos de cambios en la actividad del volcán, lo que evidencia la utilidad del valor  $b$  como herramienta rutinaria de monitoreo volcánico.

En el primer período (rotulado 1 en la Figura 9), en noviembre de 2008, como se mencionó anteriormente, ocurrió el sismo de mayor magnitud registrado hasta la fecha en el VCM. Este sismo ocurrió dentro de un enjambre sísmico importante localizado en el domo principal y sus alrededores (Figura 10), que registró el segundo pico mayor en número de sismos hasta la fecha en el VCM. El sismo se localizó a 1,5 km al NE del domo principal y a 3 km de profundidad.



**Figura 10.** Distribución hipocentral de los sismos localizados en los tres rangos de fechas relacionados con incrementos importantes del valor  $b$  en el VCM 2007-2020. El rectángulo representa la posible ubicación de un dique o silo.

Es interesante observar, inicialmente, el aumento importante del valor  $b$  ( $>1,4$ ), en diciembre de 2007 y enero de 2008, es decir, entre 10 y 11 meses antes del enjambre, y posteriormente la disminución importante ( $<0,6$ ) justo un mes antes del enjambre (Figura 9), lo que podría estar indicando una posible pequeña intrusión de magma entre abril y mayo de 2008, que posiblemente pudo iniciar su ascenso sin que se registrara sismicidad en grandes proporciones ni deformación (Figuras 2 y 10); esta posteriormente hizo que se generara un aumento en la presión de poros dentro del edificio volcánico en la parte más superficial, lo cual disminuyó drásticamente el valor  $b$  ( $<0,6$ ) y generó luego el fuerte enjambre sísmico que incluyó el sismo de mayor magnitud registrado hasta la fecha, el cual tuvo manifestaciones superficiales importantes como la salida de fuentes de agua en lugares donde normalmente no se presentaba, agrietamiento del terreno y varios deslizamientos de tierra.

Así mismo, se detectaron cambios geoquímicos antes del enjambre (INGEOMINAS, 2008). Por lo tanto, es posible suponer que este primer cambio importante del valor  $b$  estuvo asociado a una intrusión magmática, posiblemente en forma de dique o silo, sugerida además por la distribución de los hipocentros (ver más adelante).

El segundo aumento importante del valor  $b$  sucedió aproximadamente dos meses después de la ocurrencia de una sismicidad profunda (12-18 km), que inició a mediados del mes de agosto de 2010 y finalizó en diciembre de 2010, localizada entre 4 y 10 km al SE del domo principal, cubría parte del domo de Tapias y la cual no se había presentado antes en el VCM desde que se tiene registro instrumental, el cual empezó en 1988 (Figura 10). Si bien es cierto que los valores de  $b$  eran menores a 1,0 antes del incremento, no se observó una tendencia a disminuir de manera importante, como sí sucedió en el primer incremento discutido anteriormente, razón por la cual probablemente no se generó un sismo de tamaño similar al del primer incremento.

Es posible que este segundo incremento temporal del valor  $b$  pueda estar asociado a un nuevo ascenso de un pulso de magma, tal vez más profundo que el primero, pero ciertamente localizado hacia el SE del VCM a diferencia del primero que estaría más cerca del domo principal, o a un movimiento de una falla enterrada que no se observa en superficie. La primera opción es más factible que la segunda, ya que la sismicidad inició de manera distal y con el tiempo fue acercándose al domo principal. Incluso de forma simultánea ocurría sismicidad tanto en el domo principal como en la parte distal (Figura 10). Este comportamiento sísmico y

distribución de la sismicidad, la cual cambia o rebota de una zona a otra, es muy común en procesos de intrusión de diques en zonas volcánicas (Savage y Cockerham, 1984; Morishita *et al.*, 2016; Woods *et al.*, 2019; Bonaccorso y Giampiccolo, 2020; Koike y Nakamichi, 2021).

Adicionalmente, después de la ocurrencia de esta sismicidad distal de 2010, se observó un cambio geoquímico importante con un aumento en isótopos en la relación R/Ra vs  $\log(C/3He)$ , asociado con una inyección de magma profunda, entre 2011 y 2013, como se mencionó anteriormente (Figura 9) (Inguaggiato *et al.*, 2017); esto soporta la idea de una intrusión magmática como la responsable de este cambio en el valor  $b$ . Es notable que a esa profundidad se observa una zona de valores altos de  $b$  (1,1-1,3; Figura 4).

Por último, es interesante observar que justo después del cambio en la firma isotópica geoquímica mencionada anteriormente, el promedio del valor  $b$  cambia, aumentando su valor. Al comparar los valores antes y después de esa fecha (2013), se observa una variación del promedio general (Figura 9). Este comportamiento del valor  $b$  podría indicar el efecto de la inyección magmática profunda tanto en la sismicidad como en el medio del VCM, la cual posiblemente produjo un aumento en la temperatura al interior del volcán. Otra posibilidad es un aumento en la presión de poros debido a dicha intrusión magmática, lo que genera un aumento en el valor  $b$  (Wiemer *et al.*, 1998). Así mismo, se observó un cambio en la pendiente de la curva de deformación de uno de los inclinómetros electrónicos instalados en el domo principal (estación CIMA en Figura 2C). Esta estación empezó a mostrar cambios importantes a partir de junio de 2012 en la pendiente de la curva, asociados con una deflación hacia el SSW (Figura 2C).

El tercer incremento del valor  $b$  se dio en medio de un enjambre con el mayor número de sismos que se haya registrado en un día en el VCM hasta la fecha (enero 2022), con más de 1000 sismos en un día, ocurrido entre el 17 y 27 de febrero de 2018 (SGC, 2018). Este evento fue similar al ocurrido en noviembre de 2008, aunque un poco menos energético (Figura 3). Esto lleva a suponer que muy posiblemente también se haya tratado de una intrusión de un pulso de magma ubicado en el mismo sector que en 2008, pero localizado un poco más hacia el SW del domo principal, definiendo una posible zona de intrusión superficial para el VCM con dirección SW-NE y que cruza el domo principal (Figura 10). Este aumento del valor  $b$  se dio en medio

de un proceso de deformación en la zona del domo principal, el cual se observa en la [Figura 2C](#), luego del cual la curva del vector resultante del inclinómetro electrónico CIMA muestra un cambio en la pendiente. Esta observación puede tener implicaciones en la evaluación de la amenaza volcánica del VCM, ya que la posible presencia de una intrusión de un dique o un silo relativamente superficial puede aumentar la probabilidad de una erupción en el VCM.

Si bien los valores de  $b$  presentan cierta incertidumbre intrínseca, es posible usarlo como una herramienta rutinaria de monitoreo volcánico, a la vez que su distribución espacial ayuda a delimitar posibles zonas relacionadas con reservorios magmáticos o fluidos hidrotermales. En este trabajo se muestra la utilidad del cálculo del valor  $b$  como apoyo a la evaluación de la evolución de la actividad del VCM.

### Conclusiones

Se llevó a cabo un estudio de la variación espacio-temporal del valor  $b$  en el VCM para el período 2007-2020. Se pudieron detectar cambios espaciales y temporales de dicho valor, los cuales se han asociado con cambios en la actividad del VCM. En particular se detectaron tres episodios temporales de aumento del valor  $b$  que pueden estar asociados a tres posibles intrusiones de pulsos de magma en 2008, 2010 y 2018.

Adicionalmente, se pudieron identificar dos zonas con valores anómalos altos del valor  $b$  ( $>1,2$ ) hacia el SW del domo principal, entre  $-1$  y  $1$  km de profundidad, y en la parte SE distal del domo principal, en cercanías al domo de Tapias, entre  $8$  y  $13$  km de profundidad, las cuales pueden estar asociadas, la primera, con la presencia de fluidos hidrotermales y, la segunda, con un reservorio de magma.

El cálculo rutinario del valor  $b$  sirve como herramienta de monitoreo para el VCM, que ayuda a entender mejor su comportamiento y a realizar un mejor diagnóstico de su estado de actividad.

### Agradecimientos

El autor desea agradecer al Servicio Geológico Colombiano, a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, por facilitar los datos para la realización de este estudio. Este trabajo fue financiado por la Universidad Católica de Manizales mediante proyecto de investigación interna.

### Referencias

- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43, 237-239.
- Bender, B. (1983). Maximum likelihood estimation of  $b$  values for magnitude grouped data. *Bulletin of Seismological Society of America*, 73(3), 831-851. <https://doi.org/10.1785/BSSA0730030831>
- Bonaccorso, A.; Giampiccolo, E. (2020). Balance between deformation and seismic energy release: The Dec 2018 'Double-Dike' intrusion at Mt. Etna. *Frontiers in Earth Science*, 8, 583815. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.583815>
- Cepeda, H.; Murcia, A. (2000). Atlas de amenaza volcánica en Colombia. INGEOMINAS. Publicación especial, 119 p.
- Chen, J.; Zhu, S. (2020). Spatial and temporal  $b$ -value precursors preceding the 2008 Wenchuan, China, earthquake ( $M_w = 7.9$ ): implications for earthquake prediction. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1196-1211. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1784297>
- Chiba, K.; Shimizu, H. (2018). Spatial and temporal distributions of  $b$ -value in and around Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 122. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0892-7>
- Enescu, B.; Ito, K. (2001). Some premonitory phenomena of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) earthquake: seismicity,  $b$ -value and fractal dimension. *Tectonophysics*, 338(3-4), 297-314. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00085-3)
- Gutenberg, B.; Richter, C.F. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press.
- INGEOMINAS. (2008). Boletín semestral de actividad registrada por los volcanes activos del Complejo Volcánico Cerro Machín – Cerro Bravo. Diciembre de 2008. Informe interno.
- Inguaggiato, S.; Londoño, J.M.; Chacón, Z.; Liotta, M.; Gil, E.; Alzate, D. (2017). The hydrothermal



- system of Cerro Machín volcano (Colombia): New magmatic signals observed during 2011-2013. *Chemical Geology*, 469, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.020>
- Koike, M.; Nakamichi, H. (2021). Dike Inflation Process Beneath Sakurajima Volcano, Japan, During the Earthquake Swarm of August 15, 2015. *Frontiers in Earth Science*, 8, 600223. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.600223>
- Lee, W.; Valdez, C. (1985). HYPO71PC; a personal computer version of the HYPO71 earthquake location program. USGS, Open-File Report, 85-749, 1-35. <https://doi.org/10.3133/ofr85749>
- Londoño, J.M. (2004). Actividad sísmica del Volcán Cerro Machín. *I Congreso Colombiano de Sismología*, Armenia, Colombia.
- Londoño, J.M. (2012). Tomografía sísmica 3D del Volcán Cerro Machín. Informe Interno, Servicio Geológico Colombiano.
- Londoño, J.M.; Rodríguez, S.P. (2013). Mapeo tridimensional del valor b en el Volcán Nevado del Ruíz, Colombia. *Ventana Informática*, 29, 129-144. <https://doi.org/10.30554/ventanainform.29.249.2013>
- Londoño, J.M. (2016). Definición de fórmulas de magnitud local para el área del Complejo volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Informe interno, 16 p.
- Mallika, K.; Gupta, H.; Shashidhar, D.; Purnachandra, N.; Yadav, A.; Rohilla, S.; Satyanarayana, H.V.S.; Srinagesh, D. (2013). Temporal variation of *b* value associated with  $M \sim 4$  earthquakes in the reservoir-triggered seismic environment of the Koyna–Warna region, Western India. *Journal of Seismology*, 17(1), 189-195. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9318-3>
- McNutt, S.R. (2005). Volcanic seismology. *Annual Review of Earth Planet Sciences*, 33, 461-491. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122459>
- Méndez, R.A.; Cortés, G.P.; Cepeda, H. (2002). Evaluación de la amenaza potencial del Volcán Cerro Machín. Memoria explicativa INGEOMINAS. 10 p.
- Mignan, A.; Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. <https://doi.org/10.5078/corssa-00180805>
- Morishita, Y.; Kobayashi, T.; Yurai, H. (2016). Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event Sakurajima in 2015 by exploiting the right hand left-looking ALOS-2 INAR. *Geophysical Research Letters*, 43(9), 4197-4204. <https://doi.org/10.1002/2016GL068293>
- Nishimura, T.; Iguchi, M.; Hendrasto, M.; Aoyama, H.; Yamada, T.; Ripepe, M.; Genco, R. (2016). Magnitude-frequency distribution of volcanic explosion earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0505-2>
- Patanè, D.; Caltabiano, T.; Del Pezzo, E.; Gresta, S. (1992). Time variation of *b* and  $Q_c$  at Mt. Etna (1981–1987). *Physics of Earth and Planet International*, 71(3-4), 137-140. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90070-C](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90070-C)
- Rueda, H.; Macias, J.L.; Siebe, C.; Cepeda, H.; Méndez, R.; Cortés, G. (2005). Holocene eruptions of Machin volcano: stratigraphy and eruptive dynamics. *EOS Trans, American Geophysical Union, Fall Meeting*. San Francisco, USA.
- Sánchez, J.J.; Gómez, D.M.; Torres, R.A.; Calvache, M.L.; Ortega, A.; Ponce, A.P.; Acevedo, A.P.; Gil-Cruz, F.; Londoño, J.M.; Rodríguez, S.P.; Patiño, J.deJ.; Bohórquez, P. (2005). Spatial mapping of the *b*-value at Galeras volcano, Colombia, using earthquakes recorded from 1995 to 2002. *Earth Sciences Research Journal*, 9(1), 30-36.
- Savage, J.C.; Cockerham, R.S. (1984). Earthquake swarm in Long Valley Caldera, California, January 1983: evidence for dike inflation. *Journal of Geophysical Research*, 89(B10), 8315-8324. <https://doi.org/10.1029/JB089iB10p08315>
- Scholz, C.H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399-415. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>

- SGC (2018). Informe técnico-operativo de la actividad volcánica Segmento norte de Colombia. Informe interno.
- Shi, Y.; Bolt, B.A. (1982). The standard error of the magnitude-frequency  $b$  value. *Bulletin of Seismological Society of America*, 72(5), 1677-1687. <https://doi.org/10.1785/BSSA0720051677>
- Smith, W.D. (1986). Evidence for precursory changes in the frequency - magnitude  $b$ -value. *Geophysical Journal International*, 86(3), 815-838. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1986.tb00662.x>
- Tsukakoshi, Y.; Shimazaki, K. (2008). Decreased  $b$ -value prior to the  $M$  6.2 Northern Miyagi, Japan, earthquake of 26 July 2003. *Earth, Planets and Space*, 60(9), 915-924. <https://doi.org/10.1186/BF03352847>
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of  $b$  in a formula  $\log N = a - bM$  showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophysics Bulletin of Hokkaido University*, 13, 99-103.
- Utsu, T. (1999). Representation and Analysis of the Earthquake Size Distribution: A Historical Review and Some New Approaches. *Pure and applied Geophysics*, 155(2-4), 509-535. <https://doi.org/10.1007/s000240050276>
- Van Stiphout, T.; Zhuang, J.; Marsan, D. (2012). Seismicity declustering. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. <https://doi.org/10.5078/corssa-52382934>
- Warren, N.W.; Latham, G.V. (1970). An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 75(23), 4455-4464. <https://doi.org/10.1029/jb075i023p04455>
- Wiemer, S.; Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7), 15115-15128. <https://doi.org/10.1029/97JB00726>
- Wiemer, S.; McNutt, S.R.; Wyss, M. (1998). Temporal and three-dimensional spatial analysis of the frequency-magnitude distribution near Long Valley Caldera, California. *Geophysical Journal International*, 134(2), 409-421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00561.x>
- Wiemer, S.; Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 90(4), 859-869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>
- Woessner, J.; Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of Seismological Society of America*, 95(2), 684-698. <https://doi.org/10.1785/0120040007>
- Woods, J.; Winder, T.; White, R.S.; Brandsdóttir, B. (2019). Evolution of lateral dike intrusion revealed by relatively-relocated dike-induced earthquakes: the 2014-15 Bárðarbunga-Holuhraun rifting event, Iceland. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 506, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.032>
- Wyss, M.; Shimazaki, K.; Wiemer, S. (1997). Mapping active magma chambers by  $b$  values beneath the off-Ito volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20413-20422. <https://doi.org/10.1029/97JB01074>
- Wyss, M.; Klein, F.; Nagamine, K.; Wiemer, S. (2001). Anomalously high  $b$ -values in the South Flank of Kilauea volcano, Hawaii: evidence for the distribution of magma below Kilauea's East rift zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(1-2), 23-37. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00263-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00263-8)
- Zheng, Y.; Zhou, S. (2014). The spatiotemporal variation of the  $b$ -value and its tectonic implications in North China. *Earthquake Sciences*, 27(3), 301-310. <https://doi.org/10.1007/s11589-014-0086-8>

---

Fecha de recibido: 11 de enero de 2022

Fecha de aprobado: 22 de julio de 2022

---