

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LA CAÍDA DE CENIZAS DEL VOLCÁN TURRIALBA (2010 - 2018), COSTA RICA: ISOFRECUENCIA, VOLUMEN Y AFECTACIÓN

ANALYSIS OF THE SPATIOTEMPORAL DISTRIBUTION OF THE ASH FALL OF THE TURRIALBA VOLCANO (2010 - 2018), COSTA RICA: ISOFREQUENCY, VOLUME AND EFFECTS

Daniela Campos^{1*} y Guillermo E. Alvarado²

¹Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Apdo. 86-3000, Heredia, Costa Rica

²Red Sismológica Nacional y Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica

*Autora para contacto: dcd0490@gmail.com

(Recibido 15/06/2018; aceptado: 19/07/2018)

ABSTRACT: The Turrialba volcano began its eruptive period at the beginning of 2010 (area with reports of ash: 624 km²), which has been maintained until the present (August 2018). The highest activity occurred at the end of October 2014, gradually increasing until reaching a maximum in 2016 (12,887 km²) that is, in six years the impact area due to ash fall increased by 21 times its size, and decreased from that year onward. According to the isofrequency maps of ash fall, it was determined that the Great Metropolitan Area, in the SW direction, was the area of the country most affected by ash fall (87.8 % of the reports). This area includes Coronado, Guadalupe, Moravia, San Pedro de Montes de Oca, Curridabat, Zapote, Tibás and San José. It is closely followed by sectors located in the NW direction (7.2 %), as well as SE and NE (2.9 % and 2.1 %), respectively. The months of May and October were when there were more eruptions. Regarding the effects of the ashes on air traffic, of the total number of relevant eruptions in the Turrialba, only 0.5 % merited the closure of air traffic at the Juan Santamaría International Airport, which corresponded to 53 % of the time ash was recorded in Río Segundo. The Tobías Bolaños airport, merited only 8 % of the closures with respect to the reports of ash fall. A total of 6 reports of ash fall were recorded from the period 2010-2017 for the planned location of the future Metropolitan International Airport of Costa Rica (Orotina), so it could be speculated that it will only require 1 or 2 air traffic closures. The estimated total ash volume is $8.5 \pm 0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0.008 - 0.009 km³), which, despite being a very small eruptive volume, generated considerable economic losses.

Keywords: Ashfall, isofrequency, air traffic, volume, Turrialba volcano, Costa Rica.

RESUMEN: El volcán Turrialba inició su periodo eruptivo a inicios del 2010 (área con reportes de ceniza: 624 km²) y se ha mantenido hasta el presente (agosto, 2018), aunque la mayor actividad se dio a finales de octubre del 2014, incrementándose paulatinamente hasta alcanzar un máximo en el 2016 (12 887 km²) es decir, en seis años, el área de impacto por caída de ceniza aumentó 21 veces su tamaño, para disminuir a partir de ese año. De acuerdo con los mapas de isofrecuencia de caída de cenizas, se determinó que la Gran Área Metropolitana, al SW del volcán, fue el área del país más afectada por caída de ceniza (87,8 % de los reportes), entre los que se destacan, Coronado, Guadalupe, Moravia, San Pedro de Montes de Oca, Curridabat, Zapote, Tibás y San José. Le siguen, de lejos, sectores localizados en dirección NW (7,2 %), así como SE y NE (2,9 % y 2,1 %), respectivamente. Los meses de mayo y octubre fueron donde se presentaron mayor cantidad de erupciones. Referente a los efectos de las cenizas en el tránsito aéreo, del total de erupciones relevantes en el Turrialba, solo un 0,5 % ameritaron el cierre del tránsito aéreo en el aeropuerto internacional Juan Santamaría, que correspondió a un 53 % de las veces que se registró ceniza en Río Segundo. El aeropuerto Tobías Bolaños, mereció tan solo un 8 % de los cierres con respecto a los reportes de caída de cenizas. Si se extrapola hacia donde se planea construir el futuro aeropuerto Internacional Metropolitano de Costa Rica (Orotina), se registraron un total de 6 reportes por caída de ceniza para el periodo 2010 - 2017, por lo que se podría especular que se habría necesitado tan solo 1 o 2 veces el cierre del tránsito aéreo. Una estimación cruda del volumen total de cenizas sería de $8,5 \pm 0,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0,008 - 0,009 km³), el cual, a pesar de ser un volumen eruptivo muy pequeño, sin embargo, generó pérdidas económicas cuantiosas.

Palabras clave: Caída de cenizas, isofrecuencia, tránsito aéreo, volumen, volcán Turrialba, Costa Rica

INTRODUCCIÓN

El volcán Turrialba se ubica en la provincia de Cartago a 16 km al NW de la ciudad del mismo nombre y posee una altitud de 3340 m s.n.m. (Fig. 1). Después de más de un siglo de inactividad eruptiva, el Turrialba entró en nuevo período eruptivo a inicios del 2010, la cual se mantiene hasta el presente (agosto del 2018). Las cenizas del 2010 llegaron hasta unos 40 km al SW del volcán, alcanzando un sector periférico del Gran Área Metropolitana (GAM) del país. Sin embargo, esta erupción y otras menores en el 2012 y 2013, no generaron mayores efectos, o a lo sumo quedaron restringidas a la vecindad inmediata del volcán (un radio de ≤ 3 km). Pero fue a partir de finales de octubre del 2014, cuando las erupciones se volvieron más frecuentes y vigorosas, lanzando cantidades moderadas de ceniza que se depositaron principalmente al W del volcán y en el Valle Central. La erupción del 30 de octubre al primero de noviembre del 2014 sobresalió, al ser la más grande desde 1866. Las erupciones, principalmente las del 2014 al 2017, afectaron la salud humana, la ganadería y la agricultura, e incluso obligó al cierre temporal del tráfico aéreo del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría y del Tobías Bolaños (Soto y Mora, 2013; Duarte, 2014; Alvarado et al., 2016).

Los diferentes reportes de caída de ceniza del 2010 - 2017 fue sistematizada e integrada de modo digital en una base de datos que, posteriormente, fue georreferenciada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de obtener patrones espaciales (isofrecuencia, cobertura, extensión), temporales de recurrencia (días, meses, años) y una estimación del volumen de la caída de ceniza. Del año 2018, únicamente se menciona la actividad que hasta el momento ha transcurrido, por no haber concluido el año y por ser sus efectos despreciables con respecto a la de los años previos. Todo ello ayudó, además, a identificar cuáles fueron los poblados con mayor frecuencia de caída de ceniza, que se puede reflejar en una mayor afectación, para así tener una mejor idea a futuro de los sitios con una mayor exposición y vulnerabilidad socioeconómica y ambiental.

METODOLOGÍA Y LIMITACIONES

Esta investigación se llevó a cabo mediante la consulta y sistematización de los reportes por caída de ceniza realizados por la población en la red social Facebook e informes internos del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) y la Red

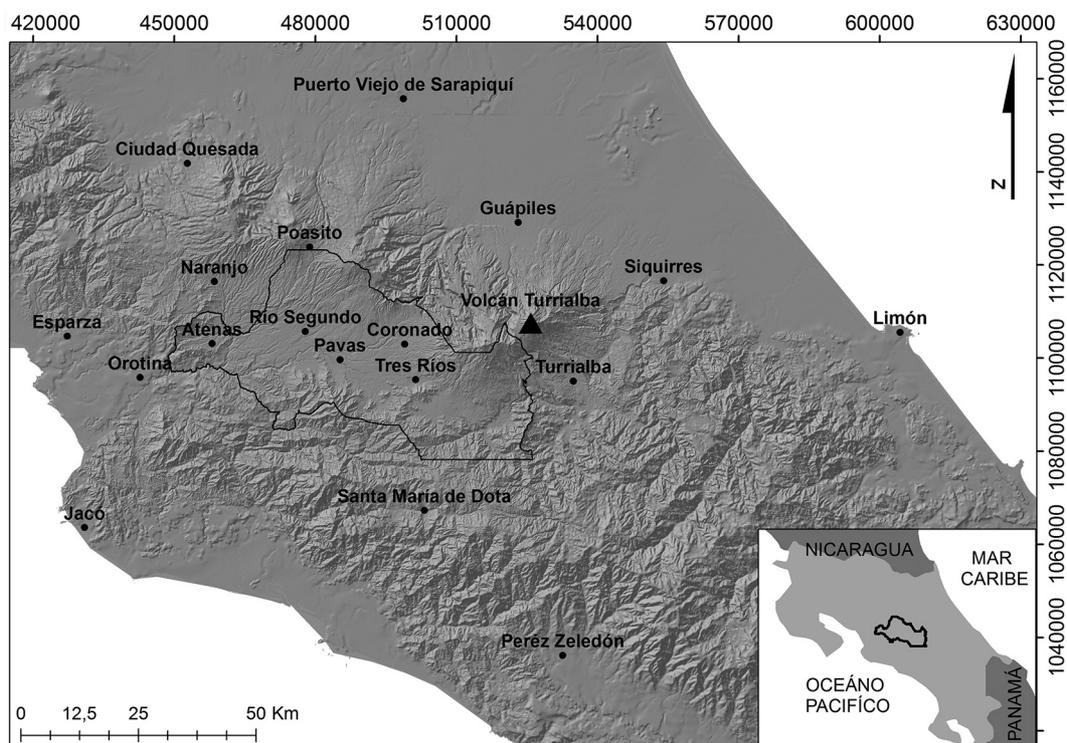


Fig. 1: Ubicación del volcán Turrialba, la Gran Área Metropolitana y las principales ciudades y poblados con reportes por caída de ceniza.

Sismológica Nacional (RSN: UCR - ICE), así como la base de datos por caída de ceniza del OVSICORI-UNA, informes periodísticos y toma de datos personales de los autores. La información se sistematizó para el periodo 2010 - 2017 y permitió identificar cuáles han sido los poblados que durante este periodo presentaron mayor y menor cantidad de reportes por caída de ceniza, así como la distribución espacial y temporal (meses, años) de la caída de ceniza y, por ende, los lugares de mayor afectación. El año 2018, tan solo se menciona la actividad que hasta el momento ha transcurrido, pero no se realizaron mapas al respecto por no haber concluido el año.

Los reportes de ceniza se cuantificaron por cada día un reporte en un lugar en particular, sin cuantificar si cayó mucha ceniza en un día, si fue varias veces o tan solo casual, o si fue tan solo ceniza muy fina (lo que antes se denominaba polvo volcánico). Igualmente, el número total de reportes obtenidos para el periodo 2010 - 2017, alcanzaron un total de 2013 en 123 poblados, co-

respondientes a 163 días eruptivos relevantes, aunque se está claro que el número de erupciones es muy superior (Fig. 1). Para el caso de los reportes por caída de ceniza, puesto que algunos lugares correspondían a calles, barrios e incluso residenciales y, con el fin de uniformizar los registros, estos fueron agregados al poblado más cercano mediante un proceso de equivalencia de datos espaciales (sitios cercanos), lo cual facilitó trabajar los datos a nivel cartográfico (factor de escala) debido a que se sistematizó la información y fue más fácil mostrarla en mapas sinópticos.

Una vez sistematizada la información, se implementó el uso de un SIG (*Arc Gis*), en el que a cada poblado con reporte de caída de ceniza (desde trazas hasta caída copiosa) se le asignó como valor la cantidad de veces en que reportó la caída para el periodo 2010 - 2017. La información permitió obtener, mediante un proceso de interpolación la isofrecuencia por caída de ceniza, la estimación del volumen y la distribución espacial para el periodo de estudio.

Con el fin de solventar la parte estética de los mapas, como en el área cratérica no hay pobladores, la ausencia de reportes, se solventó con la compilación de los datos de campos de los sismólogos, vulcanólogos, geógrafos y vídeos. Del mismo modo, el área del cráter W y el sector conocido como La Picada y finca Silvia, es justamente donde con mucha frecuencia ha caído ceniza y donde los mayores espesores se han registrado, al grado que muchas veces, mientras se observaba la caída copiosa de ceniza en finca Silvia, en cambio en la finca Central no caía ceniza. Este hecho se repitió muchas veces, pero debido a que los pobladores de finca Silvia abandonaron el lugar desde el 2010, no hay reporte alguno de caída de ceniza en las redes sociales. Aunque no se tiene dicho dato, con toda seguridad superó en número el de cualquier otro poblado.

Otro problema es que no siempre los pobladores reportaban la caída de ceniza, o existen lugares donde no hay poblaciones (flancos caribeños de los volcanes Turrialba, Irazú y Barva) o los reportes son pocos, casuales y aislados. Por ello, se observarán concentraciones de caída de ceniza a modo de islas. Sin embargo, la metodología da una idea cuantitativa de la frecuencia de caída de cenizas en el país.

Referente al cálculo del volumen, los mapas de isopacas son limitados en área y tiempo. Por ello, se recurrió a hacer un estimado del volumen con base en: a) los pocos datos de isopacas (incompletos y en proceso) para erupciones o períodos particulares en la zona proximal y b) con base en los mapas de isofrecuencia de caída de cenizas. Esta última metodología tiene una serie de limitantes tales como: a) lugares y períodos sin reportes, b) los reportes pueden ser casuales y de cantidades ínfimas, o de caída copia a lo largo de casi todo el día y c) la ausencia de un espesor real, que por lo general suele ser ínfimo y no medible dentro de los estándares vulcanológicos tradicionales.

Sin embargo, ante la ausencia de una mejor manera y dado lo importante que resulta el manejar un dato de volumen, así sea crudo, se pueden aplicar una serie de artilugios para llegar a una aproximación. Si se asume que los granos de ceniza fina en la parte distal poseen un tamaño medio

de 0,01 mm (comparados con los del Irazú y con casos medidos del Turrialba), se puede entonces asumir con dicho valor posee un espesor mínimo (de 0,01 en este caso) con base en cada reporte, teniendo en cuenta que la caída de ceniza pudo ser permanente durante todo el día (lo que podría superar varias dicho valor en ese día). Utilizando los datos granulométricos (moda) aportados por Alvarado et al. (2016), así como el tamaño de los granos bajo el microscopio electrónico, grosso modo se puede decir que en el flanco SW del Turrialba los granos de cenizas poseían una media de 1 mm, mientras que, en la GAM de aproximadamente 0,17 mm, mientras que, en sectores más distantes, se puede asumir de 0,01 mm. Entonces, cada reporte se multiplica por dichos valores, para obtener un espesor mínimo; con este valor y conociendo el área, se obtiene un volumen preliminar de las cenizas en sus facies medias y distales.

SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL 2010 - 2018

La primera erupción del Turrialba se presentó el 5 de enero del 2010, registrándose otra el 8 de ese mes de importante magnitud. Para el 2011, la actividad volcánica estuvo asociada a columnas de gases que alcanzaron alturas de 1,5 km (Soto y Mora, 2013; Duarte, 2014). En el 2012, cayó ceniza los días 12 y 18 de enero, actividad que estuvo asociada a la apertura de una nueva boca, llamada Boca 2012 (Alvarado et al, 2016). El 2013 registró tres erupciones el 21, 22 y 27 de mayo, siendo el 21 de mayo, de las 8:30 a las 9:15 a. m., cuando las bocas cratéricas del 2010 y 2012 empezaron a expeler cenizas y gases, que llegaron a poblados localizados a más de 50 km SW del volcán. Entre el 2010 y 2013 se registraron en total 7 erupciones, es decir, un promedio de 2 erupciones por año.

En el 2014, se dio un incremento significativo de las erupciones, ya que se registraron 17 erupciones asociadas a reportes de caída de ceniza, en los meses de marzo-mayo y octubre-diciembre. Para este año, la erupción de mayor magnitud se registró el 29 de octubre a las 11:35 p. m., la cual destruyó la mayor parte de la pared oriental del

cráter Occidental. Entre el 29 y 30 de octubre cayó ceniza, alcanzando la erupción del 1.º de noviembre una altura de unos 2,5 km sobre el nivel del cráter; esta erupción fue, junto con la del 29 de octubre, una de las más importantes, las cuales dieron inicio a la verdadera actividad persistente que se mantiene hasta el presente (julio, 2018).

Los reportes por caída de ceniza se sostuvieron hasta el 9 de diciembre del 2014. Del 12 al 15 de noviembre de ese año, se registró caída de ceniza.

En el 2015, se registraron unas 30 erupciones relevantes; una de ellas, la del 12 de marzo, fue la primera erupción que obligó el cierre del tránsito aéreo del aeropuerto internacional Juan Santamaría, localizado en la ciudad de Alajuela.

El 2016 fue el año de más reportes, donde se destaca el periodo eruptivo que se presentó entre el 30 de abril y el 27 de mayo, con un promedio entre 3 erupciones por hora hasta fases eruptivas casi continuas. Las erupciones de mayor magnitud ocurrieron del 13 de setiembre al 16 de noviembre, sobresaliendo varias el 19 de setiembre, cuyas columnas eruptivas alcanzaron hasta 4 km sobre el cráter. Las primeras bombas volcánicas escoriáceas y corteza de pan en abundancia se hallaron el 1.º de noviembre del 2016 por personas del OVSICORI-UNA, lo que indica que se originaron por actividad estromboliana a finales de octubre y continuaron siendo abundantes particularmente a inicios del 2017. Ello refleja un cambio de fases predominantemente freatomagmáticas a fases estrombolianas.

Para febrero del 2017, el volcán comenzó a presentar un ruido particularmente fuerte, similar al de una turbina o caldera hirviente, audible a más de 2 km de distancia con erupciones pequeñas. La actividad eruptiva entró en una calma relativa durante las primeras semanas de marzo de ese año, pero nuevamente retornó a la emisión de cenizas entre el 26 y el 30 de ese mes, registrándose temperaturas dentro del cráter hasta de 780 °C, según lo relató el vulcanólogo Geoffroy Avar. El mes de abril fue un mes relativamente calmado, puesto que, desde el 22 de abril hasta el 26 de mayo del 2017 por la mañana, se mantuvo en calma la actividad eruptiva. A partir de las 2 p.

m. del 26 de mayo y hasta finales de ese mes, el Turrialba retornó a algunas erupciones pequeñas que no superaron los 300 - 500 m sobre el cráter activo, con lances de bloques balísticos. Su frecuencia eruptiva varió entre cada 7 - 10 minutos hasta unas 3 - 4 erupciones por hora, que persistieron con altibajos hasta agosto del 2017, incluyendo la desgasificación de gases y aerosoles en forma casi continua y pasiva.

Para inicios de julio de ese año, se evidenció la existencia de un pequeño lago de lava de unos 50 m de diámetro en el fondo del cráter Activo (Ruiz et al., 2017), condición que persistía hasta por lo menos mayo del 2018, aunque no tan espectacular como la del 11 de abril del 2018 (G. Avar, com. escrita, 2018), con incandescencia visible en ciertas noches (p.ej., agosto del 2017, enero y mayo del 2018).

Una nueva actividad freatomagmática relevante se presentó en setiembre del 2017, particularmente la mañana del 26 de setiembre, la cual se extendió por lo menos hasta el 1.º de octubre, con columnas de ceniza de unos 500 m hasta casi 2 km de altura (el día 30 setiembre) que se dirigieron al W. Durante todo octubre del 2017, el Turrialba mantuvo una desgasificación permanente y casuales emisiones pasivas de ceniza, como, por ejemplo, el pulso del 9 de octubre a las 10:36 a. m. o las del 30 de ese mes (10:30, 11:05 a. m. y 14:45 p. m.) con alturas de entre 200 y 500 m. Durante la mañana del 5 de noviembre del 2017, hubo varias exhalaciones de gases con cantidades pequeñas de cenizas, las cuales igualmente fueron detectadas como un pulso leve en la noche del 9 de ese mes y, algo más intensas, fueron las erupciones entre las 8:30 y 9:00 a. m. del 13 de noviembre. Según los reportes diarios del OVSICORI y algunas observaciones de los autores, la actividad eruptiva se volvió a presentar el 1.º de diciembre, seguido por el día 13 (1:30 p. m.) y el 18 de diciembre (11:33 a. m.) del 2017, para entrar en una pausa en lo que restaba del año, con incandescencia particularmente entre el 21 y el 24 de diciembre.

La actividad se reanudó en enero del 2018, en forma leve, con erupciones el 2-5, 7-9 (el 10 con incandescencia), 11 (10:35 a. m.), 12, 15, 21-23, 26 (11:01 a. m. y 2:27 p. m.), 28 y 30 de enero del

2017, continuando de modo leve pero casi persistente, del 2 al 18 de febrero (particularmente del 6 al 14). El Valle Central fue nuevamente cubierto por un leve velo de cenizas, pero particularmente, los pobladores de Coronado fueron los más afectados. A partir del 19 hasta por lo menos el 26 de febrero, la actividad fue exclusivamente exhalativa. En marzo, estuvo activo el día 2 y del 6 al 15 con altibajos (el 7 muy activo con lance de bombas por actividad estromboliana). Del 16 al 22 de marzo entró en una pausa eruptiva (ausencia de cenizas), para entrar nuevamente con erupciones casuales del 23 de marzo al 9 de abril, con altibajos (muy activo del 1 al 3, pero sin cenizas el día 4). A partir del 10 de abril hasta el 12 de mayo del 2018, la actividad fue predominantemente exhalativa, con excepción de un reporte de ceniza el 26 de abril y una notoria incandescencia el 1.º de mayo. Del 17 al 28 de mayo presentó de nuevo erupciones esporádicas, las mayores con alturas de unos 500 m. Del 29 de mayo hasta mediados de julio del 2018, no se presentaron reportes de ceniza, tan solo incandescencia y actividad exhalativa, incluyendo la salida de gases azulados, únicamente una pequeña erupción de ceniza el 18 de julio entre las 2:00 y las 4:00 de la mañana. Del 24 de julio al 2 de agosto del 2018, la actividad de ceniza fue poca.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL E ISOFRECUENCIA DE LA CAÍDA DE CENIZA PARA EL PERIODO 2010 -2017

En la primera erupción de ceniza del 5 de enero del 2010, los reportes fueron en poblados del distrito de Santa Cruz, tales como finca Central (localmente conocida como La Central), Pastora, El Retiro y La Esperanza. También, se registró caída de ceniza en poblados a más de 20 km al SW del volcán, tales como Capellades, Juan Viñas, Pacayas, Tres Ríos, Moravia, Guadalupe, San Pedro de Montes de Oca, Coronado, Escazú, Aserri y Zapote. El 8 de enero cayó ceniza en poblados cercanos como Pastora de Santa Cruz, localizada 6 km al SE del volcán y poblados a más de 38 km al SW, entre los que destacan Alajuelita, Aserri, San José centro, Coronado y Guadalupe.

Para el 2011, no se tuvieron reportes por caída de ceniza. En el 2012, se registraron dos reportes por caída de ceniza, los días 12 y 18 de enero en el poblado de Tres Ríos, actividad que estuvo asociada a la apertura de una nueva boca, llamada Boca 2012 (Alvarado et al, 2016). El año 2013 registró tan solo tres erupciones cuyas cenizas llegaron a poblados localizados a más de 50 km SW del volcán, tales como Alajuela, así como otros poblados como Capellades, Siquirres, Guadalupe, Cartago y San Gerardo de Oreamuno.

Entre el 2010 y 2013, se registraron en total 7 erupciones con 57 reportes por caída de ceniza. Durante este periodo, la ceniza alcanzó distancias aproximadas de 20 km al SW del volcán, afectando poblados como Capellades, Juan Viñas, Pacayas y Tres Ríos y otros a más de 50 km al SW del volcán, tales como Guadalupe y Alajuela, ambas localizadas en la Gran Área Metropolitana (GAM).

En el 2014, se dio un incremento significativo de las erupciones, ya que se registraron 17 erupciones asociadas a reportes de caída de ceniza, en los meses de marzo-mayo y octubre-diciembre. Para este año, la erupción de mayor magnitud se registró el 29 de octubre a las 11:35 p. m. Entre el 29 y 30 de octubre se registraron un total de 23 reportes por caída de ceniza, la cual llegó a los poblados que se encontraban hasta 50 km al SW del coloso, tal como las ciudades de Alajuela, Belén, ciudad Colón, Guácima, San Miguel de Santo Domingo, Moravia, todas ubicadas en la GAM. La erupción del 1.º de noviembre, con una altura de unos 2,5 km sobre el nivel del cráter, generó 14 reportes de afectación por caída, en poblados tales como Coronado, Guadalupe, Guácima, Pavas, Río Segundo, Sabanilla de Montes de Oca, San José centro, San Pedro de Montes de Oca, Santo Domingo de Heredia y Naranjo; este último localizado a 68 km al NW del volcán Turrialba. Los reportes por caída de ceniza se sostuvieron hasta el 9 de diciembre del 2014. Del 12 al 15 de noviembre de ese año, se registraron un total de 24 reportes, principalmente en los poblados de Moravia, San Pedro de Montes de Oca, Coronado, Heredia, Uruca, Llano Grande de Cartago, Ángeles de San Rafael, Moravia, Pavas, Sabanilla de Montes de Oca, San José, San Ramón de Tres Ríos, Tibás,

Zapote, San Isidro de Heredia, Santo Domingo de Heredia y San Ramón de Alajuela; este último localizado a 78 km al NW del volcán Turrialba. Para diciembre, los días que presentaron caída de ceniza fueron el 6, 8 y 9, cuyos poblados afectados fueron finca Central, Alajuelita, Aserri, Cartago, Coronado, Curridabat, Desamparados, Guadalupe, Higuito de Desamparados, Alegría de Siquirres, Mata de Plátano, Moravia, Patarra, San Jerónimo de Moravia, San José, San Pedro de Montes de Oca, San Ramón de Tres Ríos, Santo Domingo de Heredia, Tarbaca, Tierra Blanca de Cartago, Tres Ríos y Zapote.

En el 2015, se registraron 30 erupciones asociadas a la caída de ceniza, en donde los primeros cuatro meses del año presentaron 221 reportes, en poblados como Guadalupe, Heredia, Guácima de Alajuela, Moravia, Higuito de Desamparados, San Pedro de Montes de Oca, Ángeles de San Rafael de Heredia, Mata de Plátano, Zapote, Desamparados y Pavas. Se destaca el 12 de marzo del 2015, ya que la erupción alcanzó una columna de 2,5 km de altura y la ceniza llegó a poblados a más de 50 km al NW, tal como Atenas, San Ramón de Alajuela y Palmares. Esta erupción generó reportes en 53 poblados del país, donde el 83 % de estos pertenecen a la GAM.

El 2016 fue el año de más reportes, para un total de 1328, destacando el periodo eruptivo que se presentó entre el 30 de abril y el 27 de mayo, con una tasa promedio entre 3 erupciones por hora hasta fases eruptivas cuasi continuas. Entre el 30 de abril y el 27 de mayo, se dieron 337 reportes en 87 poblados. Las erupciones de mayor magnitud ocurrieron del 13 de setiembre al 16 de noviembre, sobresaliendo varias el 19 de setiembre, cuyas columnas eruptivas alcanzaron hasta 4 km sobre el cráter. Esta actividad generó un total de 52 reportes, incluso en poblados localizados a 70 km localizados al NW, tales como Zarcero, Naranjo y Orotina. Sin embargo, el 85 % de los reportes correspondieron a poblados localizados en la GAM del país, siendo una de las erupciones de mayor afectación durante el periodo 2010 - 2017 (Cuadro 1).

Los poblados que registraron entre 60 y 30 reportes de caída de ceniza fueron Sabanilla de

Montes de Oca (58), Mata de Plátano (57), Escazú y Heredia (55), Tres Ríos (48) y Desamparados (45), seguido de Santa Ana (39), Alajuela (34), La Uruca y El Alto de Guadalupe (ambos con 32), San Isidro de Heredia (31) y San Rafael y Santo Domingo de Heredia (30). Los poblados que registraron entre 28 y 30 reportes fueron Los Hatillos, Cartago, Granadilla, Belén, Alajuelita, Guácima de Alajuela, San Pablo de Heredia, Higuito de Desamparados y San Ramón de Tres Ríos. Los que presentaron menos de 20 reportes fueron Río Segundo y Cascajal con 19, Barva de Heredia y Llano Grande de Cartago con 17, Ciudad Colón, San Miguel de Santo Domingo y San Rafael de Alajuela con 16, Aserri, Calle Blancos, Guápiles y Santa Bárbara con 15. Por su parte, Santa Cruz de Turrialba, Pastora de Santa Cruz y Pacayas presentaron, cada uno de ellos, 14 reportes por caída de ceniza. Seguido de Atenas, Cot de Cartago, finca Central, Ángeles de San Rafael de Heredia, Rancho Redondo, San Gerardo de Oreamuno, Tejar del Guarco y Tierra Blanca de Cartago, poblados que registraron 13 reportes cada uno. San Joaquín de Flores contabilizó 12 reportes, San Pedro de Poás y San Jerónimo de Moravia 11 reportes cada uno y Capellades, Paraíso de Cartago y Siquirres 10, respectivamente. La cantidad de reportes menores a 10 se registraron en poblados como Cervantes, El Coyol de Alajuela, Grecia, Turrialba, Naranjo, Palmares, Santiago de Puriscal, Guadalupe de Alajuela, Jiménez de Guácimo, Juan Viñas, Garita de Alajuela, Moravia de Siquirres, Orosí, San Ignacio de Acosta y San Isidro de Alajuela. Cabe destacar que 22 poblados presentaron únicamente un reporte para el periodo de estudio, entre los que destacan Esparza, Guayabo de Santa Cruz, Horquetas de Sarapiquí, La Suiza de Turrialba, Limón, Los Cartagos, Palmichal de Acosta, Pejibaye, Poasito y Santa María de Dota.

Esta distribución de caída de ceniza, a partir de los reportes, permitió identificar de manera relativa, la isofrecuencia por caída de ceniza y, por consiguiente, las áreas de mayor impacto o exposición (Fig. 2).

Los poblados que tuvieron la mayor cantidad de reportes por caída de ceniza se localizan en

Cuadro 1

Frecuencia por caída de ceniza en poblados de la GAM, periodo 2010 - 2017.

Frecuencia de cantidad de reportes por caída de ceniza	Poblados que reportaron caída de ceniza en la GAM, periodo 2010 - 2017
1 - 3	El Yas de Paraíso, Los Cartagos, Escobal de Atenas y San Ramón de Alajuela.
4 - 7	Cachí, Guadalupe de Alajuela, Garita de Alajuela, Orosí, San Isidro de Alajuela, Patarrá, San José de La Montaña, Turrúcares, volcán Irazú y San Juan de Chicué.
8 - 12	Cervantes, El Coyol de Alajuela, Capellades, Paraíso de Cartago, San Jerónimo de Moravia, San Pedro de Póas y San Joaquín de Flores.
13 - 16	Atenas, Cot de Cartago, Ángeles de San Rafael de Heredia, Rancho Redondo, San Gerardo de Oreamuno, Tejar del Guarco, Tierra Blanca de Cartago, Pacayas, Aserri, Calle Blancos, Santa Bárbara, ciudad Colón, San Miguel de Santo Domingo y San Rafael de Alajuela.
17 - 24	Barva de Heredia, Llano Grande de Cartago, Cascajal, Río Segundo, San Ramón de Tres Ríos, Higuito de Desamparados, San Pablo de Heredia, Guácima de Alajuela, Alajuelita y Belén.
25 - 29	Granadilla, Cartago y Los Hatillos.
30 - 34	San Rafael de Heredia, Santo Domingo de Heredia, San Isidro de Heredia, Alto de Guadalupe, Uruca y Alajuela.
35 - 47	Santa Ana, Desamparados y Tres Ríos.
48 - 64	Escazú, Heredia, Mata de Plátano, Sabanilla de Montes de Oca, Pavas, San José, Tibás y Zapote.
65 - 89	Curridabat, San Pedro de Montes de Oca, Moravia, Guadalupe y Coronado.

la GAM, esto debido a la dirección de los vientos que predominan hacia el SW. Coronado fue el que mayor cantidad de reportes presentó, con un total de 89, seguido de Guadalupe con 88, Moravia con 83, San Pedro de Montes de Oca con 73, Curridabat con 68, Zapote con 64, Pavas, Tibás y San José con 61 reportes respectivamente. De acuerdo con los datos de isofrecuencia, se determinó que para el periodo 2010 - 2017, la GAM fue el área del país que más afectada por caída de ceniza, ya que de los 123 poblados que reportaron caída de ceniza, 68 se localizan en 29 cantones pertenecientes a la GAM, entre los que se destacan Alajuela, San José, Coronado, Santa Ana, Escazú y Goicoechea, entre otros (Fig. 3).

Se tiene entonces que la cantidad de reportes completos registrados durante el periodo 2010 - 2017 (se excluye el 2018) permiten establecer una aproximación del área con reporte por caída de ceniza, ya que mientras en el 2010 el área aproximada fue de 624 km², para el 2016 fue de 12 887 km², es decir en seis años el área de impacto por

caída de ceniza aumento 21 veces su tamaño (Fig. 4). El detalle de la frecuencia de registro y afectación por caída de ceniza en los poblados localizados en la GAM, cuyos reportes variaron entre 1 y 89 se puede observar en el cuadro 1.

DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA CAÍDA DE CENIZA PARA EL PERIODO 2010 - 2017

Entre el 2010 y 2017, la caída de ceniza generó reportes en distintos poblados del país, los cuales fueron desde un reporte hasta 89. De acuerdo con los datos obtenidos para el periodo 2010 - 2017, se registraron un total de 2013 reportes por caída de ceniza en 123 poblados, correspondientes a 163 erupciones relevantes registradas por esta metodología, aunque se está claro que su número es superior. Los años 2014, 2015 y 2016 son los que presentaron la mayor cantidad de erupciones, mostrándose un incremento desde

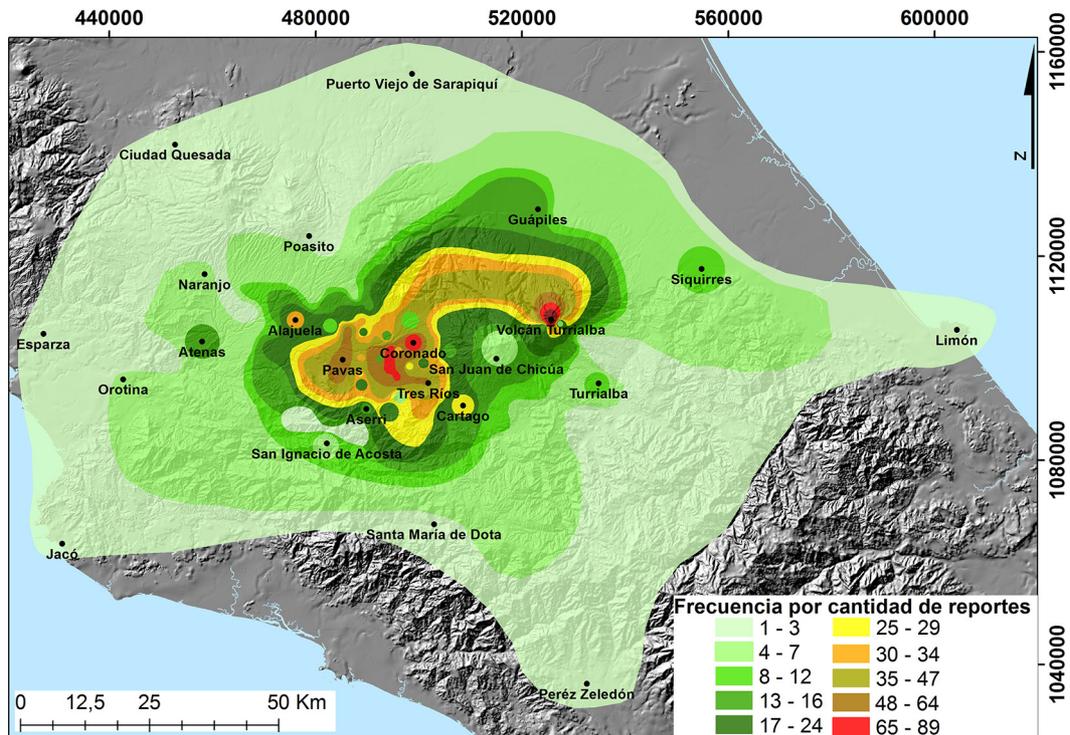


Fig. 2: Mapa de isofrecuencia por caída de ceniza según los reportes por poblado, periodo 2010 - 2017.

el 2011 con un pico en el 2016 y una nueva baja en el 2017 y lo que se lleva del 2018 hasta julio de ese año. Las erupciones más importantes ocurrieron a partir del 2014 y se extendieron en orden de importancia hasta el 2016 (Fig. 5). Esto también se observa en el número de reportes, donde el 2016 fue el año más relevante.

Igualmente resulta interesante, desde el punto de vista mensual, la presencia de dos campanas gaussianas con máximos en los meses de mayo y octubre (Fig. 6), las cuales se dieron en la estación lluviosa, lo que indica que las lluvias no afectaron el número de reportes de manera significativa, sino que efectivamente fue en esos meses donde se presentaron la mayor cantidad de erupciones.

Si se delimita espacialmente, con ayuda de los reportes, las 163 erupciones relevantes que se registraron entre el 2010 y 2017 con registros por caída de ceniza, se desprende un área total de aproximadamente 109 584 km², los que se desglosan de manera anual en el cuadro 2.

IMPACTO DE LA CAÍDA DE CENIZA EN FUNCIÓN DE SU DIRECCIÓN Y EN LOS AEROPUERTOS

Si bien, para el periodo 2010 - 2017, existen estudios como el de Alvarado et al. (2016) y Abarca & Alvarado (2017), donde se comentan aspectos sobre las pérdidas económicas que han generado las erupciones del volcán Turrialba, principalmente en sectores como la ganadería y la agricultura, es importante de igual manera realizar un análisis adicional, desde la presente perspectiva de estudio, sobre el impacto que han tenido las erupciones volcánicas en el tránsito aéreo, ya que este ha sido evidentemente afectado por la caída de ceniza.

Se destaca, una vez más, que la GAM ha sido el área más afectada por caída de ceniza y es además donde se localizan dos de los aeropuertos principales del país, correspondientes al aeropuerto Internacional Juan Santamaría y el ae-

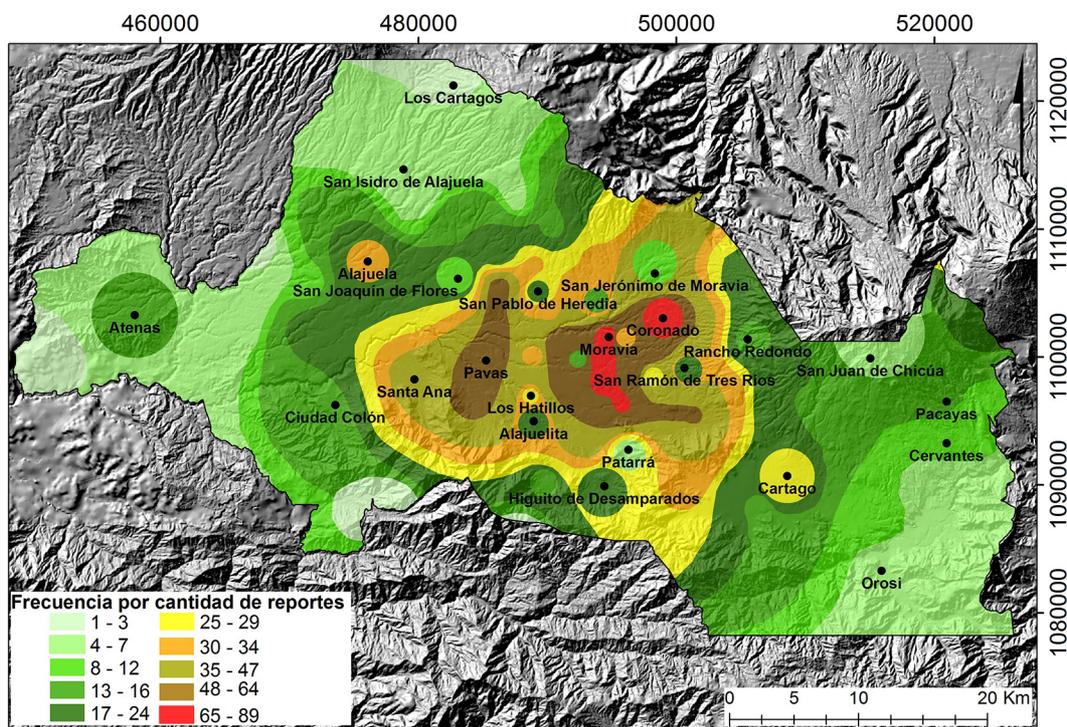


Fig. 3: Mapa de isofrecuencia por caída de ceniza según los reportes por poblados localizados en la GAM, periodo 2010 - 2017.

ropuerto Internacional Tobías Bolaños. Incluso, se puede señalar algunos comentarios sobre la construcción del futuro Aeropuerto Internacional Metropolitano de Costa Rica, el cual se tiene planeado construir en Orotina. Tanto Pavas como Río Segundo y Orotina fueron sitios donde se reportó la caída de ceniza, por lo que a continuación se expone un análisis sobre el impacto que dichos eventos tuvieron en el tránsito aéreo. Hasta lo que se lleva del 2018 (julio) no ha sido necesario el cierre de ninguno de estos aeropuertos por causa volcánica.

La rosa de vientos es un diagrama valioso, dado que ayuda a visualizar la tendencia de transporte y depositación de las cenizas durante el período de estudio. La rosa indica que, la mayor cantidad de reportes que se generaron entre el 2010 y 2017, fueron direccionados hacia el SW con distancias de hasta 105 km, donde se localiza la ciudad de Jacó (Fig. 7). La cantidad de reportes hacia dicha dirección fue de 1767 (87,8 %), seguido del NW con 144 reportes (7,2 %), así como el SE y NE con 59 y 43 (2,9 % y 2,1 %), respectivamente.

Si se realiza un análisis mensual de caída de cenizas por cuadrantes, asociado a la dirección de los vientos, se obtiene que los meses que presentaron la mayor cantidad de reportes por caída de ceniza direccionados hacia el sector SW fueron en orden descendente mayo (384 o 21 % de los reportes), octubre (362, 20 %), diciembre (252, 14 %), mientras que el resto de los meses contabilizan entre 177 y 102 reportes o un 45 % del total en dicha dirección (Fig. 8). En cuanto al sector NW, los meses que registraron mayor cantidad de reportes fueron similar en lo que corresponde a mayo (38, 26 %) y octubre (21, 14%), pero sobresalieron, en cierta medida relativa, abril (22, 15%), setiembre (18, 12%) y marzo (17, 11%). Por su parte, agosto y febrero no obtuvieron ningún reporte hacia la dirección NW. Por otro lado, el sector SE no presentó ningún reporte en los meses de febrero, julio, agosto, setiembre y diciembre, mientras que octubre y mayo son los meses con más reportes en sentido SE, con un total de 28 y 14, respectivamente.

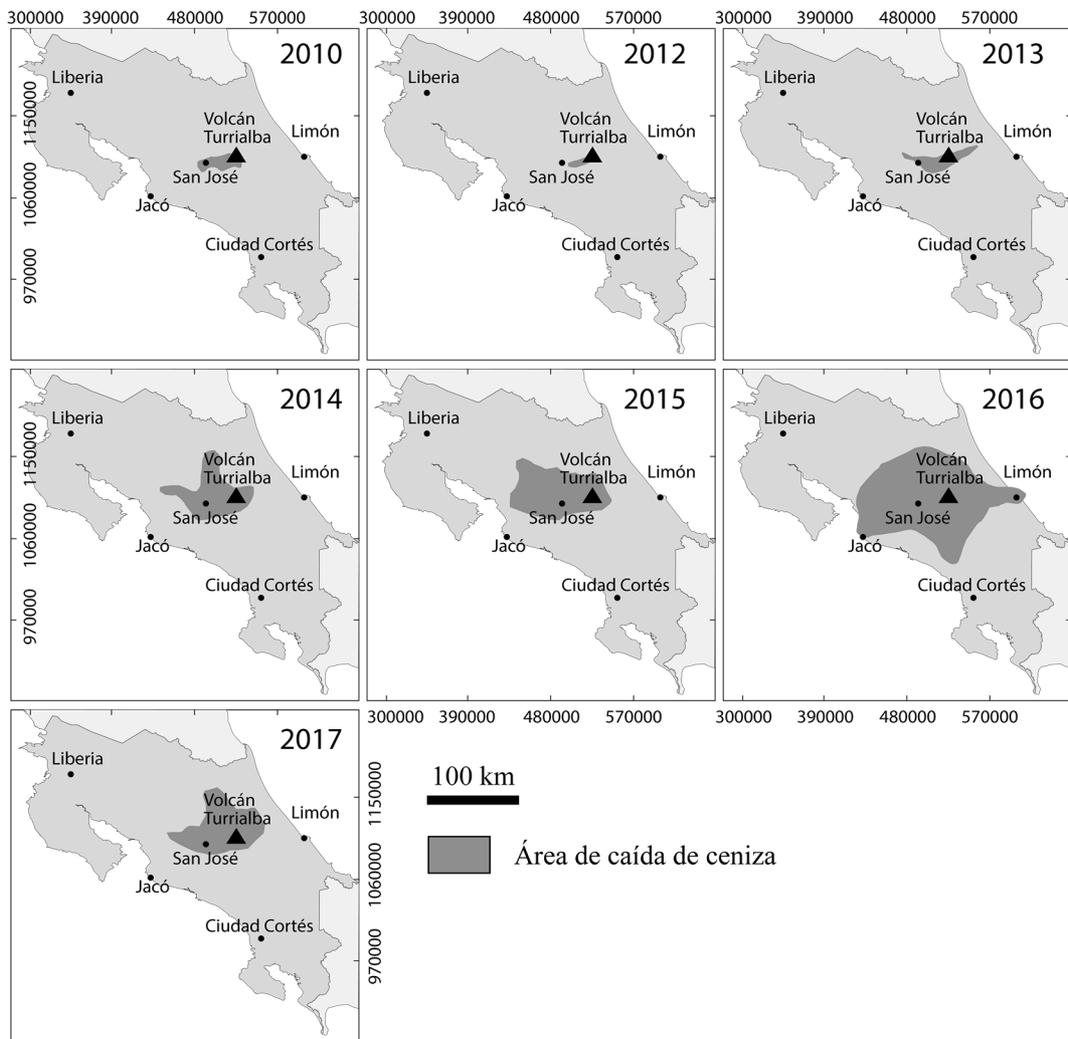


Fig. 4: Distribución espacial de caída de ceniza para el periodo 2010 - 2017 según reportes.

Aeropuerto Internacional Juan Santamaría:

El aeropuerto Internacional Juan Santamaría, se localiza en el distrito de Río Segundo, del cantón de Alajuela, donde se registraron 19 reportes por caída de ceniza entre el 2010 y el 2017. Sin embargo, el número de veces en que el tránsito aéreo fue suspendido correspondió a 10 (Fig. 10, Cuadro 3), es decir, cerca de un 53 % de las veces en que se dio reporte allí, pero con respecto al número total de erupciones relevantes con reporte de cenizas entre el 2010 y el 2017, corresponde a un porcentaje muy bajo de 0,5 % o menos. Dicho de otra manera, del total de erupciones en el Turrialba, solo

un $\leq 0,5\%$ ameritaron el cierre del tránsito aéreo, que correspondió a un 53 % de las veces que se registró ceniza en Río Segundo.

Durante el 2015 el tránsito aéreo se suspendió 5 veces, correspondiente a los días 12 de marzo, 23 y 24 de abril, 4 y 18 de mayo. Para el 2016, los cierres se dieron los días del 20 al 23 de mayo, 19 de setiembre y 10 de noviembre. Por su parte el 2017 registró 2 cierres los días 4 de enero y primero de abril. Lo que señala que únicamente el 57 % de las veces fue necesario cerrar el tráfico aéreo. La cancelación de vuelos para cada una de las erupciones mencionadas se detalla en el cuadro 3,

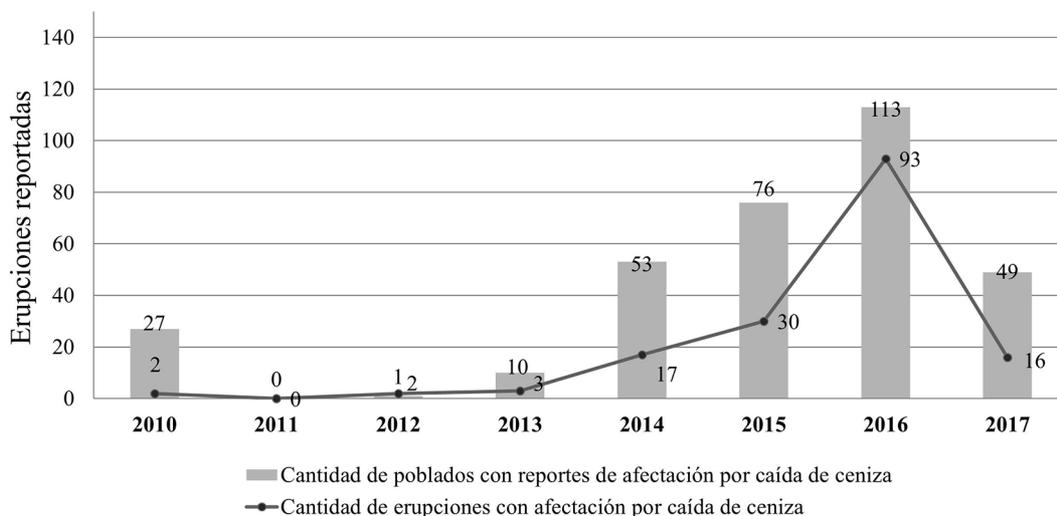


Fig. 5: Cantidad de erupciones reportadas por poblado por caída de ceniza, periodo 2010-2017.

elaborado con base en diversos informes periodísticos, la cual a su vez expone datos brindados por la empresa Aeris Holding Costa Rica, S.A., quien es la concesionaria de la terminal aérea.

Aeropuerto Tobías Bolaños: El aeropuerto Tobías Bolaños, localizado en el distrito de Pavas, cantón de San José, se contabilizaron, entre el 2010 y 2017, un total de 61 reportes por caída de ceniza. Sin embargo, el número de veces en que el tránsito aéreo fue cerrado correspondió a 5 veces (Fig. 9). Esto nos indica que tan solo un 8 % de las veces fue necesario cerrar el tráfico aéreo. Los cierres se dieron en el 2015, específicamente los días 12 de marzo, 21-22 y 24 de abril, por su parte en el 2016 se registraron 2 cierres los días 7 de julio y 19 de setiembre.

Futuro Aeropuerto internacional Metropolitano de Costa Rica: El futuro aeropuerto Internacional Metropolitano de Costa Rica, se construirá en el cantón de Orotina, sitio donde se registraron un total de 6 reportes por caída de ceniza para el periodo 2010 - 2017. Si se toma en comparación los cierres de los aeropuertos presentes en la GAM, se puede especular que el número de cierres hipotético, ante el pasado escenario, habría sido a lo sumo o como máximo, de 1 ó 2 cierres.

Cuadro 2

Área donde se registró la caída de ceniza por año.

Año	Cantidad de erupciones	km ² afectados
2010	2	1073
2012	2	356
2013	3	2587
2014	17	8928
2015	30	19 567
2016	93	69 056
2017	16	8017
Total	163	109 584

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE CENIZAS

Cuando las erupciones volcánicas son relativamente pequeñas (VEI entre 0 y 3; la mayoría con un valor de 0), como las del Turrialba a lo largo de 8 años de actividad eruptiva, no siempre resulta fácil el estimar el volumen eruptado debido a: a) los mayores espesores se presentan en sectores de difícil acceso y alta peligrosidad, b) áreas de selva virgen sin accesos, c) la lluvia y el viento

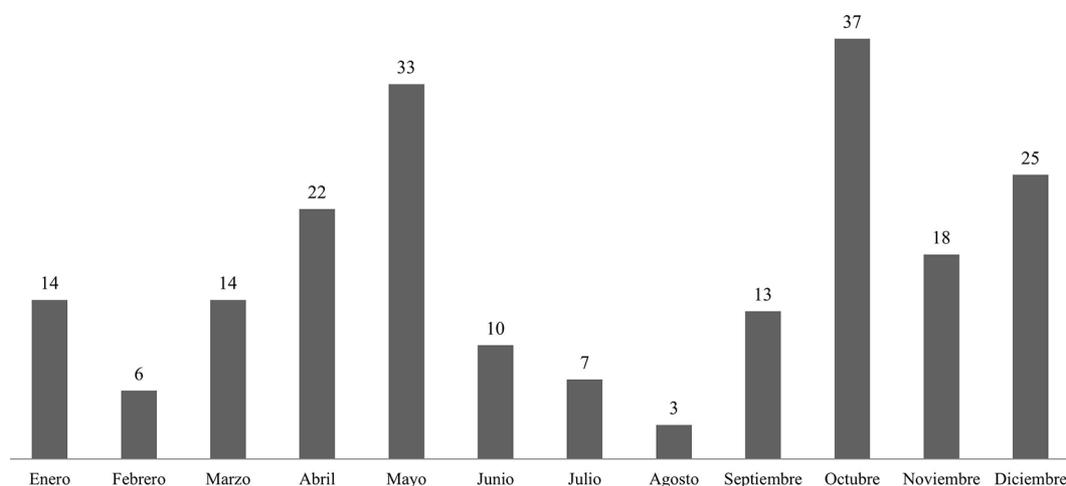


Fig. 6: Cantidad de erupciones reportadas por mes por caída de ceniza, periodo 2010-2017.

Cuadro 3

Cancelación del tránsito aéreo en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría por caída de ceniza para el periodo 2010 - 2017 y la altura de la columna eruptiva sobre el cráter (basado en Alvarado et al., 2016; Alvarado J., 2017; Avendaño, 2016; Láscarez, 2015; Madrigal, 2016, 2017; Noguera, 2015; Recio, 2015 y Solano, 2016).

Fecha de cancelación de tránsito aéreo	Altura de la columna eruptiva en metros	Total de vuelos cancelados, desviados o reprogramados	Aerolíneas con suspensión de vuelos
12 de marzo de 2015	2500	111	Air Canadá, Copa, Iberia, United Airlines, American Airlines y Delta
23 - 24 de abril de 2015	2000	18	Avianca, United Airlines, Aeroméxico, American Airlines, Delta y Copa.
4 de mayo de 2015	2500	13	Copa Airlines, Delta, American Airlines, Avianca, Aeroméxico, United Airlines y Laca.
18 de mayo de 2015	?	14	Avianca y otras aerolíneas sin detallar.
20 - 23 de mayo de 2016	3000	35	Southwest, Air Canada, Spirit, Aeroméxico, United Airlines, American Airlines y Alaska Airlines.
19 de septiembre de 2016	4000	120	Sansa, Nature Air, Avianca, Copa, Iberia, Veca, Jet Blue y Air Canadá.
10 de noviembre de 2016	?	11	Southwest Airlines, British Airways, American Airlines, Jet Blue y Cubana de Aviación
4 de enero de 2017	500	42	United Airlines, American Airlines, Jet Blue, Spirit Airlines, Alaska Airlines, Interjet y Volaris.
1.º de abril de 2017	500	9	American Airlines y United Airlines

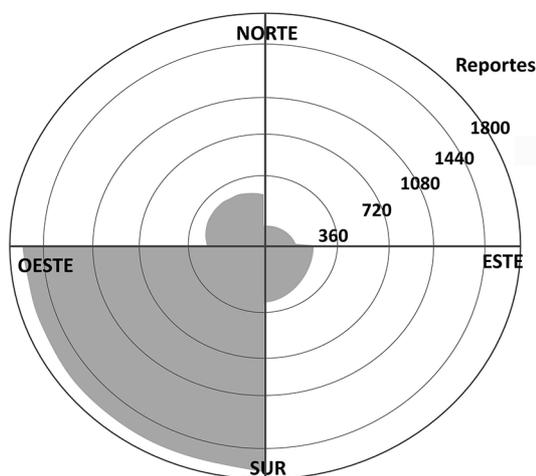


Fig. 7: Distribución de reportes por cada de ceniza según dirección de los vientos, periodo 2010 – 2017.

suelen erosionar rápidamente las cenizas y d) falta de recolectores uniformemente distribuidos.

Ante la falta de estos elementos o la existencia de datos aislados, se recurrió a hacer un estimado del volumen con base en: a) los pocos datos de isopacas (incompletos y en proceso por varios grupos de científicos) para erupciones o períodos particulares en la zona proximal y b) con base en los mapas de isofrecuencia de caída de cenizas,

asumiendo un espesor mínimo, por lo que cada reporte se multiplica por el factor granulométrico mínimo para obtener un espesor mínimo y, en función del área cubierta, un rango de volumen.

La fórmula sería: $N.$ reportes (mínimo y máximo) \times área $m^2 \times 1000\ 000\ m \times$ valor del espesor en $m =$ volumen en m^3 .

Una estimación cruda del espesor en el área circundante al cráter (1 km) se puede hacer con algunos datos de isopacas, que indican un volumen mínimo de $1 \times 10^6\ m^3$ de cenizas. Si se agrega este dato al total obtenido en el Cuadro 4, se obtiene un volumen total mínimo de entre unos 8 y 9 millones de metros cúbicos de cenizas.

DISCUSIÓN

El volcán Turrialba se ha mantenido eruptivamente activo por más de 8 años, aunque su periodo más importante se inició en el 30 octubre del 2014 y se ha mantenido hasta la fecha (agosto, 2018). La cantidad de erupciones aumentó de manera paulatina a partir de finales del 2014, lo cual se correlacionó con el número de reportes, pasando de 41 reportes en el 2010 a 1318 en el 2016, pero bajó en el 2017 a 148. En la actualidad, en lo que se lleva del 2018, la caída de cenizas en la

Cuadro 4

Estimación del volumen de ceniza.

Valores	Área en km^2	Factor a multiplicar mm (m)	Volumen estimado m^3	
1 - 3	6800	0,01 (0,00001)	68 000	204 000
4 - 7	3694	0,01 (0,00001)	147 760	258 580
8 - 12	589	0,01 (0,00001)	47 120	70680
13 - 16	671	0,1 (0,0001)	786 500	1 073 600
17 - 24	605	0,1 (0,0001)	1 028 500	1 452 000
25 - 29	261	0,17 (0,00017)	1 109 250	1 286 730
30 - 34	237	0,17 (0,00017)	1 208 700	1369 860
35 - 47	321	0,17 (0,00017)	1 909 950	2 564 790
48 - 64	106	0,17 (0,00017)	864 960	1 153 280
65 - 89	24	0,17 (0,00017)	265 200	363 120
90 - 163	5	1 (0,001)	450 000	815 000
Total			7 885 940	6 893 570

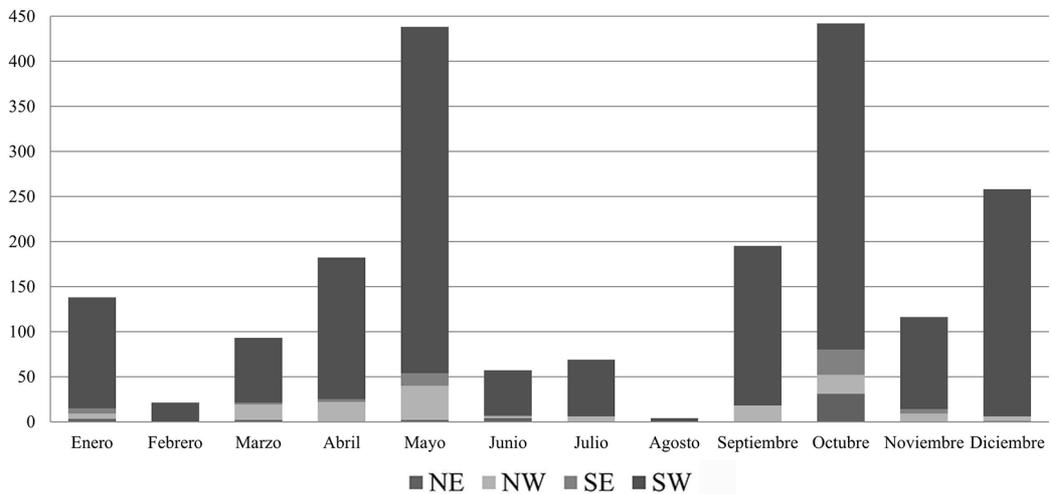


Fig. 8: Distribución de reportes por caída de ceniza según dirección de los vientos por mes, periodo 2010-2017.

GAM ha sido muy poca y sus efectos igualmente mínimos.

Los primeros sectores habitados en ser afectados consuetudinariamente por la caída de ceniza, fueron fincas en las inmediaciones del volcán Turrialba, tales como Silvia y La Picada. En los alrededores del Turrialba, sin embargo, en el 2010 se inició un proceso de emigración de los finqueros y trabajadores, lo que ha dado como resultado que en la actualidad (agosto de 2018) sean sitios deshabitados. Resulta importante destacar que, los procesos de emigración y la afectación de los medios de vida por la actividad volcánica, aún carecen de estudios científicos por parte de expertos en las ciencias sociales.

Mediante la confección de mapas de isofrecuencias de caída de cenizas, se obtuvieron algunas conclusiones que pueden colaborar para una mejor planificación territorial y gestión del riesgo. Mediante dicha técnica, se determinó el impacto que la actividad eruptiva del periodo 2010 - 2017 tuvo sobre poblados de la GAM (87,8 % de los reportes), sector que corresponde con la mayor área urbana del país. La GAM se ubica en la dirección predominante de los vientos hacia el SW, sobresaliendo, entre los poblados más afectados, Coronado, Moravia, Guadalupe, Curridabat, Pavas, San José, Alajuela y Santa Ana. Le sigue de lejos en grado de afectación, por su lejanía en

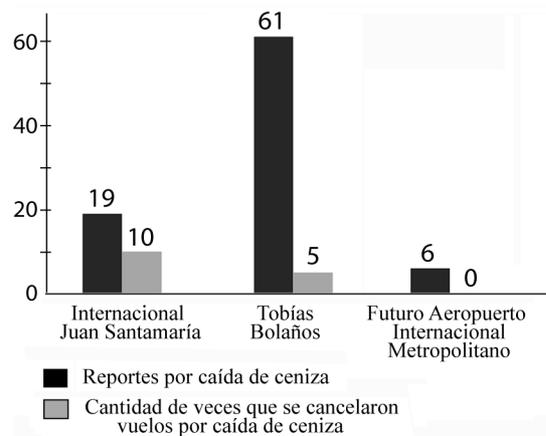


Fig. 9: Frecuencia de caída de ceniza en los aeropuertos y cancelación del tránsito aéreo en los aeropuertos de la GAM, periodo 2010 - 2017.

dirección NW (7,2 % de los reportes), los poblados muy levemente afectados tales como ciudad Quesada, Grecia, Palmares, Naranjo, Guápiles y Zarcero, así como al SE del volcán (2,9 % de los reportes en poblados como Turrialba, Pastora, Limón y Pérez Zeledón) y al NE (2,1 % de reportes en poblados como Guácimo y Siquirres). De ellos, el GAM fue la más afectada y Pastora.

Los meses de mayo y octubre fue donde se presentaron mayor cantidad de reportes de caída de ceniza, para un total de 880 reportes (43 %),

por lo que la temporada lluviosa no afectó significativamente. Cabe resaltar que los meses de mayo, octubre y diciembre presentaron la mayor cantidad de reportes hacia el SW con un total de 384, 362 y 252, respectivamente, es decir, estos meses representan el 55 % de los reportes. La dirección que registró menor cantidad de reportes fue el NE (43 reportes en total), los cuales se dieron en los meses de enero, marzo, mayo, junio, octubre y diciembre.

Referente a los aeropuertos, del total de erupciones relevantes en el Turrialba con reportes de caída de cenizas, solo un 0,5 % requirieron el cierre del tránsito aéreo en el aeropuerto internacional Juan Santamaría, lo cual correspondió a un 53 % de las veces que se registró ceniza en Río Segundo. El aeropuerto Tobías Bolaños, por su parte, ameritó tan solo un 8 % de los cierres con respecto a los reportes de caída de cenizas. Resulta interesante establecer que, en donde se planea construir el futuro aeropuerto internacional Metropolitano de Costa Rica (Orotina), se registraron un total de tan solo 6 reportes por caída de ceniza para el periodo 2010 - 2017, por lo que se podría especular que habría ameritado únicamente 1 o 2 veces el cierre del tránsito aéreo, cifra significativamente baja. Claramente, en el caso de reactivarse el volcán Irazú, si presentara una actividad eruptiva similar a varias que ocurrieron durante la primera mitad del siglo XX, sus efectos sobre los aeropuertos serían mínimos, pero si fuese igual que la de 1963 -1965, al estar más cerca y debido a su actividad más notoria con respecto a la del Turrialba (2010 - 2018), los cierres del tránsito aéreo serían mayores, tanto en el Juan Santamaría como el propuesto aeropuerto en Orotina.

Se trató de aplicar una técnica novedosa para la estimación del volumen de erupciones pequeñas pero persistentes. Una estimación cruda del volumen total de cenizas sería de $8,5 \pm 0,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0,008 - 0,009 km^3), lo cual representa un volumen eruptivo muy pequeño, el cual, sin embargo, generó pérdidas económicas cuantiosas a la agricultura, ganadería y, sobre todo, al tránsito aéreo, por la cancelación de vuelos con las consiguientes pérdidas al turismo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE), Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Costa Rica (OVSI-CORI), la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), así como al personal del parque nacional volcán Turrialba. Las discusiones con Geoffroy Avar, Maarten de Moor y José Brenes, siempre fueron muy provechosas. A todas aquellas personas que contribuyeron con información vía las redes sociales por hacer los valiosos reportes, base de la presente contribución. A Mariya Galochkina por revisar el resumen en inglés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, T. y Alvarado, G. E. (2016). Pérdidas económicas en valor presente al año 2016 causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2017. *Revista Geológica de América Central*, 56, 37-50.
- Alvarado, G. E., Brenes, J. Barrantes, M. Vega, E. Maarten De Moor, J. Avar, G. Dellino, P. Mele, D. Devitre, C. Di Piazza, A. Rizzo, A. y Carapezza, M. (2016). The explosive activity of Turrialba volcano (Costa Rica) in 2010 - 2016. *Revista Geológica de América Central*, 55, 7-60.
- Alvarado, J. (2017). *Estos son los vuelos cancelados/reprogramados por la ceniza del Turrialba*. Periódico crhoy.com. Recuperado de <https://www.crhoy.com/nacionales/estos-son-los-vuelos-cancelados-reprogramados-por-la-ceniza-del-turrialba/>
- Avendaño, M. (2016). *Aerolíneas cancelan y desvían vuelos por caída de ceniza en la GAM*. La Nación. Recuperado de <https://www.nacion.com/sucesos/desastres/aerolineas-cancelan-y-desvian-vuelos-por-caida-de-ceniza-en-la-gam/AHAATYVQFFGBBVRUC56Y5FO74/story/>

- Duarte, E. (2014). Las cuatro erupciones freáticas recientes del volcán Turrialba (2010-2013) una por año. *Revista Geográfica de América Central*, 52, 139-161.
- Láscarez, C. (2015). *Cenizas del volcán Turrialba obligan a cerrar el aeropuerto Juan Santamaría*. La Nación. Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/salud/cenizas-del-volcan-turrialba-obligan-a-cerrar-el-aeropuerto-juan-santamaria/IKHCR46BCCNAN6OZKNONMZPM/story/>
- Madrigal, L. (2016). *Aeropuerto Juan Santamaría reinicia operaciones tras 18 horas de cierre por ceniza del volcán Turrialba*. El Mundo. Recuperado de <https://www.el-mundo.cr/aeropuerto-juan-santamaria-reinicia-operaciones-tras-18-horas-de-cierre-por-ceniza-del-volcan-turrialba/>
- Madrigal, R. (2017). *Aerolíneas cancelan vuelos en aeropuerto Juan Santamaría por ceniza del volcán Turrialba*. La Prensa Libre. Recuperado de <https://www.nacion.com/economia/aerolineas-cancelan-vuelos-en-aeropuerto-juan-santamaria-por-ceniza-del-volcan-turrialba/5HJFDM3GAFCX5MLUQLFC3KTI7Y/story/>
- Noguera, J. (2015). *Aeropuerto cerrado por tres horas y cancelación de seis vuelos por erupciones del Turrialba*. La Prensa Libre. Recuperado de <http://www.laprensalibre.cr/Noticias/detalle/24902/267/aeropuerto-cerrado-por-tres-horas-y-cancelacion-de-seis-vuelos-por-erupciones-del-turrialba>
- Recio, P. (2015). *Aeropuerto Juan Santamaría permanecerá cerrado hasta este viernes a las 8 a.m.* La Nación. Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/aeropuerto-juan-santamaria-permanera-cerrado-hasta-este-viernes-a-las-8-a-m/32LX2RV6FFEY5HVOA77ZZONKGI/story/>
- Ruiz, P., Mora, M., Soto, G., Vega, P. y Barrantes, R. (2017). Geomorphological mapping using drones into the eruptive summit of Turrialba volcano, Costa Rica. Presentado en *AGU Fall Meeting*, New Orleans.
- Solano, H. (2016). *Casi 30 vuelos se han visto afectados por caída de ceniza en las últimas 48 horas*. La Nación. Recuperado de <https://www.nacion.com/sucesos/seguridad/casi-30-vuelos-se-han-visto-afectados-por-caida-de-ceniza-en-las-ultimas-48-horas/5ZFVT77E6RHW5DSTBX4GBTQ4IE/story/>
- Soto, G. J. y Mora, M. M. (2013). Actividad del volcán Turrialba en el periodo 2007-2011 y perspectivas de su amenaza. En M. Adamson y F. Castillo (eds), *Desastres. Costa Rica en el tercer milenio: Desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad* (pp. 287-310). San José: Universidad de Costa Rica.

