

Estimación de umbrales de precipitaciones que ocasionan fenómenos laháricos en el volcán Concepción, isla de Ometepe, Rivas, 2016

Estimation of precipitation thresholds that cause lahatic phenomena in the Concepción volcano, Ometepe island, Rivas, 2016

Cruz Rivera, Karla Hypatia; Mendoza Jara, Fernando José; Acuña Espinal, Efraín Lucrecio

 Karla Hypatia Cruz Rivera 1
karlahc01@gmail.com
Universidad Nacional Agraria, Nicaragua

 Fernando José Mendoza Jara 2
fmendozajara@gmail.com
Universidad Nacional Agraria, Nicaragua

 Efraín Lucrecio Acuña Espinal 3
lucreacunya@gmail.com
Investigador independiente, Nicaragua

La Calera
Universidad Nacional Agraria, Nicaragua
ISSN: 1998-7846
ISSN-e: 1998-8850
Periodicidad: Semestral
vol. 23, núm. 41, 2023
Edgardo.jimenez@ci.una.edu.ni

Recepción: 26 Enero 2023
Aprobación: 31 Agosto 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/306/3064360003/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/calera.v23i41.16720>



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen: Los lahares son flujos compuestos de sedimentos y agua que se desplazan en las laderas volcánicas, altamente destructivos debido a la gran velocidad que toman y a su alta densidad. Esta investigación estima las precipitaciones detonantes que han ocasionado los fenómenos laháricos en el volcán Concepción, isla de Ometepe, 2016, a fin de proveer datos que contribuyan al diseño de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de este fenómeno. Inicialmente, se instalaron estaciones meteorológicas para obtener el registro de precipitaciones durante el 2016 y a su vez se hizo un monitoreo de los eventos laháricos ocurridos durante este año; posterior, correlacionando los datos entre la fecha y hora de ocurrencia de lahares con la precipitación registrada al momento detonante, se hizo una estimación de los umbrales de precipitaciones detonantes de cada evento lahárico asociado a la precipitación acumulada de 30 días antecedentes. Los resultados indican que durante el 2016 ocurrieron ocho fenómenos laháricos, estos eventos se originaron en áreas conformadas por lavas inconsolidadas. La lava inconsolidada donde se originaron estos eventos se refiere a materiales fragmentados de diferentes diámetros (piroclastos), entre ellos material fino como ceniza, cuando este material se sobrecalienta, se incrementa su volumen y peso específico y tiende a desestabilizarse y desestabilizar materiales más gruesos, que sumado a las altas pendientes que tiene el volcán Concepción (de hasta el 100%) incrementan la susceptibilidad de que ocurran deslizamientos de tipo lahar. De los ocho fenómenos laháricos ocurridos, cuatro son los eventos de los que se tiene registro de precipitaciones mayores a cero milímetros, estos eventos ocurrieron en promedio con precipitaciones detonantes de 35.88 mm e intensidades de 19.57 mm h⁻¹, con precipitaciones acumuladas los días antecedentes de 0.76 mm (un día), 29.45 mm (10 días), y 150.03 mm (30 días).

Palabras clave: eventos laháricos, precipitaciones detonantes, precipitación acumulada, estaciones meteorológicas, deslizamientos, sistema de alerta temprana.

Abstract: Lahars are flows made up of sediments and water that move on volcanic slopes, highly destructive due to the great speed they take and their high density of materials. This research estimates the triggering precipitations that have caused the laharc phenomena in the Concepción volcano, Ometepe Island, 2016, to provide data that contribute to the design of an early warning system before the occurrence of this phenomenon. Initially, meteorological stations were installed to obtain the rainfall record during 2016 and, in turn, the laharc events that occurred during this year were monitored. Subsequently, correlating the data between the date and time of lahar occurrence with the precipitation recorded at the triggering moment, an estimate was made of the triggering precipitation thresholds for each laharc event associated with the accumulated rainfall of the previous 30 days. The results indicate that eight laharc phenomena occurred in 2016, these events originated in areas made up of unconsolidated lavas. The unconsolidated lava where these events originated refers to fragmented materials of different diameters (pyroclastic), including fine material such as ash, when this material becomes supersaturated, its volume and specific weight increase and it tends to destabilize and destabilize thicker materials, which, added to the high slopes of the Concepción volcano (up to 100%), increases the susceptibility of lahar-type landslides. Of the eight laharc phenomena that occurred, four are the events for which there is a record of rainfall greater than zero millimeters, these events occurred on average with triggering rainfall of 35.88 mm and intensities of 19.57 mm h⁻¹, with accumulated rainfall on previous days of 0.76 mm (one day), 29.45 mm (10 days), and 150.03 mm (30 days).

Keywords: laharc events, triggering rainfall, accumulated rainfall, weather stations, landslides, early warning system..

Según Delgados (2002), los lahares son mezclas de detritos rocosos movilizados por agua, que fluyen rápidamente y se originan en las pendientes de los volcanes. En Nicaragua, el lahar más destructivo tuvo lugar en el volcán Casita durante el huracán Mitch el 30 de octubre de 1998, día en que se registró una precipitación de 484 mm, causando la muerte de más de 2 000 personas [Comisión Nacional de Energía (CNE, 2001)]; en el país este evento significó la necesidad de promover estudios sobre estos fenómenos. La paradisíaca isla de Ometepe, nominada a las siete maravillas del mundo en el 2006, formada por los volcanes Concepción y Maderas en lago Cocibolca de Nicaragua, es una de las zonas más vulnerable a la ocurrencia de fenómenos laháricos. Según el Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres (SINAPRED, 2005), esto se debe a causa de eventos sísmicos, lluvias torrenciales o avanzada deforestación. Este proceso se ve favorecido por la composición y textura del suelo y por la presencia de importantes acumulaciones de

NOTAS DE AUTOR

- 1 MSc. Manejo y Conservación de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional Agraria – FARENA
- 2 PhD. Geospatial Information Sciences, Universidad Nacional Agraria – FARENA
- 3 PhD. Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Investigador independiente

rocas sin cohesión, que tienden al movimiento hacia abajo por las altas pendientes que poseen las laderas del volcán Concepción. El propósito de esta investigación ha sido estimar las precipitaciones detonantes que han ocasionado los fenómenos laháricos en el volcán Concepción durante el 2016, a fin de proveer datos para ser integrados a un Sistema de Alerta Temprana (SAT) meteorológico y que de esta manera se puedan establecer planes de respuesta con mayor efectividad, disminuyendo así los índices de pérdidas humanas, ambientales y materiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Registro de precipitaciones del 2016

Los datos de precipitaciones (en intervalos de 10 minutos), se obtuvieron de las estaciones meteorológicas instaladas en los municipios de Altagracia (Davis Vantage Vue, modelo número 6250) y Moyagalpa (Davis Vantage Pro 2, modelo número 6152) en las fincas de productores (Figura 1). Para estimar el área de influencia de cada una de las estaciones meteorológicas instaladas se aplicó la metodología de interpolación de polígonos de Thiessen, en donde se consideró una tercera estación instalada en Finca Magdalena (Figura 1). Este método de interpolación se emplea cuando la distribución de los pluviómetros no es uniforme dentro del área en consideración (Chachuana Andia y Yugar Morales, 2009), como lo es en este estudio.

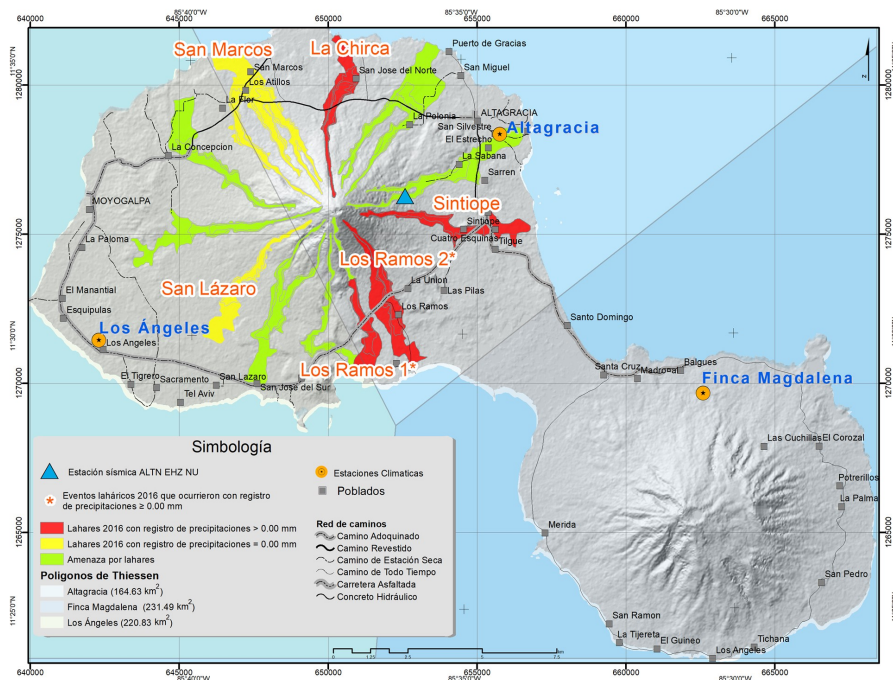


FIGURA 1.

Ubicación de estaciones meteorológicas, mapeo de lahares ocurridos durante el 2016 y áreas del estudio del mapa de amenaza de lahares establecido por SINAPRED (2005).

Monitoreo de lahares 2016

Los guías turísticos y agricultores diariamente recorren zonas del volcán Concepción, por lo que se estableció un convenio de comunicación a fin de que ellos reportaran cualquier visualización de lahar en el volcán, de igual manera se dio seguimiento a las noticias, comunicados y documentos emitidos por el Instituto

Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) en lo que se refería a la ocurrencia de lahares en el volcán Concepción. Una vez notificado cada lahar por los guías turísticos y agricultores, o bien por INETER, se procedió a realizar una visita de campo a fin de caracterizar cada evento. Durante el recorrido de campo se tomaron coordenadas y rutas de desplazamiento por cada lahar a fin de realizar el mapeo de lahares ocurridos durante el 2016, haciendo uso de un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcGIS 10.2.®v. Para elaborar el mapa de lahares 2016, además del recorrido de campo, se consideró el estudio del mapa de amenaza de lahares establecido por SINAPRED (2005) en el volcán Concepción y las curvas de nivel cada diez metros de elevación.

Umbrales de precipitaciones 2016

La determinación de los umbrales de precipitaciones que ocasionaron los lahares del 2016 en el volcán Concepción, se realizó haciendo una correlación con los datos de fecha y hora de ocurrencia de estos eventos con las precipitaciones registradas al momento detonante (tiempo en que ocurre un lahar), con esta correlación se realizaron los hietogramas y curvas de masa de las tormentas que ocasionaron estos fenómenos y se estimó los umbrales de lluvia detonante que causaron los lahares 2016. El acumulado de lluvia es fundamental para estimar las precipitaciones detonantes, ya que de la magnitud de estas depende el estado de saturación que alcance el suelo. Por tanto, una vez estimadas las precipitaciones detonantes se hizo una correlación entre las precipitaciones detonantes y las precipitaciones acumuladas antecedentes en un periodo de 30 días; de igual manera estas correlaciones se hicieron con eventos lluviosos que no ocasionaron este tipo de fenómeno a fin de establecer una comparación entre las tormentas que ocasionan lahares y tormentas que no lo ocasionan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Registro de precipitaciones del 2016

Los resultados indican que durante el 2016 en la zona de la estación climática de Altagracia (barlovento) se acumuló menor cantidad de lluvia (1 308.57 mm) que en la zona de la estación de Los Ángeles (sotavento) que se acumuló 1 523.63 mm (Figura 2). Considerando el registro de ambas estaciones, haciendo uso del promedio ponderado se estima que el acumulado de lluvia durante el 2016 en el volcán Concepción, corresponde a 1 431.78 mm, siendo octubre el mes más lluvioso y con mayor ocurrencia de lahares con un acumulado de precipitaciones en promedio (ponderado) de 354.42 mm.

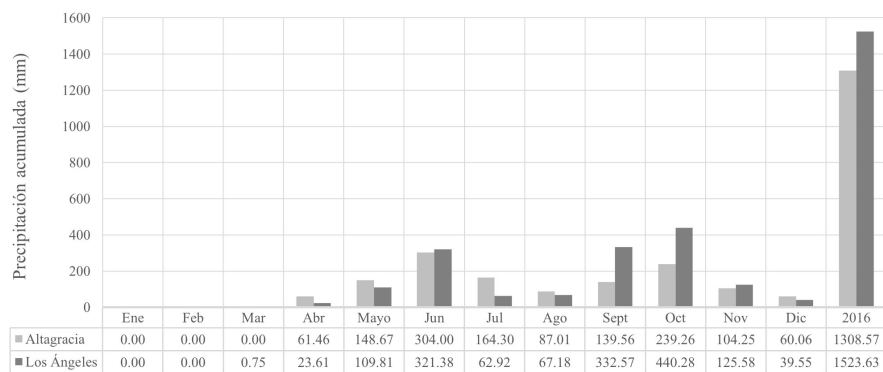


FIGURA 2.
Precipitaciones mensuales por estación instalada en el volcán Concepción en el 2016.

Monitoreo de lahares 2016

Durante el 2016 en el volcán Concepción se registraron ocho eventos laháricos; en el Cuadro 1 se presenta el inventario de estos lahares agrupados en dos categorías: (1) lahares ocurridos con registro de precipitaciones mayores a cero milímetro y (2) lahares ocurridos con registro de precipitaciones iguales a cero milímetro, de igual manera se presenta el estimado de la superficie afectada por cada lahar y la longitud de desplazamiento del mismo, así como la estación con la que deben ser analizados los datos de precipitaciones según la ubicación de estos eventos en los cuadrantes de influencia (según los polígonos de Thiessen) de las estaciones instaladas como se indicó en la Figura 1.

CUADRO 1.
Inventario de lahares en el volcán Concepción, 2016

Lahares	Fecha	Hora	Estación	Superficie (km ²)	Longitud (km)		
Lahares con registro de precipitaciones > 0 mm	Los Ramos 1	3.oct.16	03:50	Altagracia	1.42	3.23	
			06:20		2.87	5.43	
	La Chirca 2				1.88	5.48	
		Sintiope	6.oct.16	21:40	Altagracia	2.06	5.78
		02:50					
Promedios				2.06	4.98		
Lahares con registro de precipitaciones = 0 mm	San Lázaro	15.jul.16	-	Los Ángeles	2.06	5.34	
	Los Ramos 1	11.oct.16	22:25	Altagracia	1.42	3.23	
			22:55				
	Los Ramos 2					2.87	5.43
	San Marcos	18.oct.16	23:00		5.20	5.90	
		00:20					
Promedios				2.89	4.98		

Lahares con registro de precipitaciones mayores a cero milímetros

El lahar de Los Ramos 1 se localiza en la comunidad de Los Ramos en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 651123 m E y 1272099 m N, tiene una dirección preferencial sureste (Figura 1). Durante el 2016 se estima que alcanzó una extensión de 1.42 km² con una longitud de 3.23 km (Cuadro 1), se originó en un área conformada por lava inconsolidada (Ql), con pendientes que van desde 22 % a 44.5 %, su curso está compuesto por materiales piroclastos y lava (Qvl). Durante el recorrido de campo se visualizaron los diferentes depósitos de materiales que ha formado este lahar en el tiempo, así como las paredes que forman su curso y los materiales que trae consigo el flujo de escombros con presencia de rocas que van desde rocas pequeñas a grandes, no mayores a 1.5 m (Figura 3).

El lahar de Los Ramos 2 se localiza en la comunidad de Los Ramos en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 651471 m E y 1272485 m N, tiene una dirección preferencial sureste (Figura 1). Durante el 2016 alcanzó aproximadamente una superficie de 2.87 km², desplazándose alrededor de 5.43 km (Cuadro 1) en zonas con paredes que alcanzan los 2.5 m, se originó en un área conformada por lava inconsolidada (Ql) con pendientes que van desde 44.5 % a 67 %, su flujo está compuesto además de lava inconsolidada (Ql) por materiales piroclastos y lava (Qvl). En la Figura 4 se observan los depósitos de rocas con diámetros menores a 40 cm, dejados por este lahar.

El lahar de La Chirca se localiza al noreste del volcán Concepción en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 649834 m E y 1279311 m N (Figura 1). Durante el 2016 afectó una superficie de 1.88 km² y recorrió una longitud de 5.48 km (Cuadro 1), se originó en un área conformada por lava inconsolidada con pendientes que van desde 44.5 % a 67 %, su flujo está compuesto además de lava inconsolidada (Ql) por materiales piroclastos (Qv). El curso de este lahar está definido por paredes de hasta 4 m de altura y en su trayectoria ha dejado depósitos de rocas con diferentes tamaños (< 60 cm) (Figura 5).

El lahar de Sintiope se localiza en la comunidad de Sintiope en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 654555 m E y 1274954 m N, tiene una dirección preferencial sureste (Figura 1). En el 2016 alcanzó una extensión de 2.06 km² y recorrió una longitud de 5.78 km (Cuadro 1), se originó en un área conformada por lava inconsolidada con pendientes que van desde 44.5 % a 67 %, su curso está compuesto además de lava inconsolidada (Ql) por materiales piroclastos y lava (Qvl), piroclastos (Qv). En la Figura 6 se observa el depósito de rocas en su mayoría de tamaño mediano (< 20 cm) dejadas por este evento lahárico.



FIGURA 3.
Lahar Los Ramos 1 del 3.oct.16.



FIGURA 4.
Lahar Los Ramos 2 del 3.oct.16.

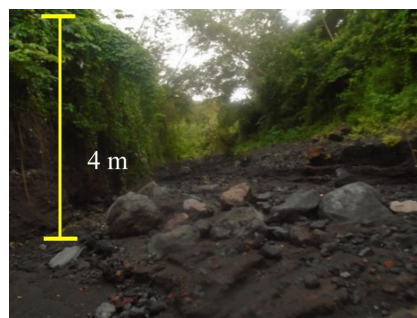


FIGURA 5.
Lahar La Chirca del 3.oct.16.



FIGURA 6.
Lahar de Sintiophe del 6.oct.16.

Lahares con registro de precipitaciones iguales a cero milímetros

Se hace importante mencionar que no existen lahares en seco o bien sin presencia de agua en el suelo (existen otros tipos de deslizamientos en seco, sin embargo, no son del tipo lahar). Cuando en este estudio se hace referencia a lahares con registro de precipitaciones iguales a cero milímetros, indica que el registro de precipitaciones obtenido de las estaciones meteorológicas instaladas para este estudio al momento de ocurrencia de estos eventos registró cero milímetros de precipitaciones. Sin embargo, esto no quiere decir que estos lahares se originaron en seco, lo planteado, únicamente se limita al hecho a que en el área en que se encontraban las estaciones meteorológicas no se registró ningún evento lluvioso al momento de ocurrencia de estos eventos, siendo probable que en la parte media o alta del volcán Concepción (área en que se originaron los lahares) sí estuviese lloviendo. La actividad lahárica de Los Ramos 1, Los Ramos 2 y San Marcos se detectó por los tremores registrados por la estación sismográfica ALTN EHZ UN instalada por INETER en el volcán

Concepción (Figura 1). La señal de tremor registrada por el sismograma de esta estación indica que el lahar de Los Ramos 1 y el lahar de Los Ramos 2, inicio a las 22:25 horas hasta las 22:55 horas (Figura 7) y el lahar de San Marcos de las 23:00 a las 00:20 (Figura 8).

El lahar de San Marcos se localiza al noroeste del volcán Concepción en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 647684 m E y 1279581 m N (Figura 1), se estima que la afectación de este evento alcanzó un área de 5.20 km² y una longitud de 5.90 km (Cuadro 1); este lahar desciende desde la parte alta del volcán en un área conformada por lava inconsolidada (Ql) con pendientes que van desde 67 % a 100 %, su curso está compuesto además de lava inconsolidada (Ql) por piroclastos (Qv).

El sismograma del lahar de San Lázaro no fue posible obtenerlo, sin embargo, este fue reportado por guías turísticos y agricultores de la zona. Este lahar se localiza en la comunidad de La Paloma en las coordenadas UTM (WGS84 Zona 16P) 646760 m E y 1269592 m N, tiene una dirección preferencial suroeste (Figura 1). Durante el 2016 se estima que alcanzó una extensión de 2.06 km² y que recorrió aproximadamente 5.34 km (Cuadro 1), se originó en un área conformada por lava inconsolidada (Ql) con pendientes que van desde 44.5 % a 67 %, su curso está compuesto además de lava inconsolidada (Ql) por materiales piroclastos (Qv).

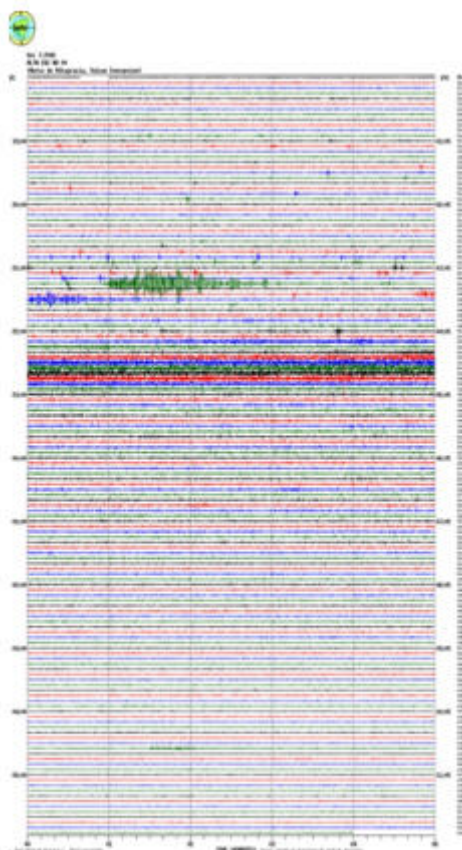


FIGURA 7.

Señales del tremor del lahar Los Ramos 1 y Los Ramos 2 del 11.oct.16 (INETER, 2016).

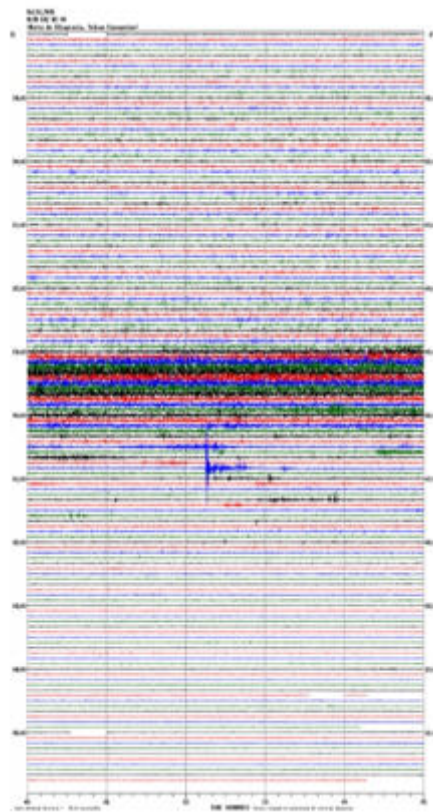


FIGURA 8.
Señales del tremor del lahar de San Marcos del 18.oct.16 (INETER, 2016).

Eventos lluviosos que ocasionaron los lahares del 2016

De la Figura 9 a la Figura 12, se presenta gráficamente el comportamiento de la tormenta que ocasionó los lahares de Los Ramos 1, Los Ramos 2 y La Chirca. Esta tormenta tuvo una duración de 150 minutos y un acumulado de lluvia de 46.74 mm (Figura 9). En el hietograma de la Figura 10 se visualiza la lluvia caída durante esta tormenta en intervalos de 10 minutos y en la Figura 11 se muestran las intensidades de esta tormenta en el mismo intervalo, observándose que la precipitación e intensidad máxima en 10 minutos fue de 7.87 mm y 47.22 mm h⁻¹ registrada a los 80 minutos. Se estima que la lluvia detonante de los fenómenos laháricos ocurridos se dio a los 110 minutos de duración (según reporte de ocurrencia de guías turísticos y agricultores) con una lluvia acumulada de 36.07 mm (Figura 9) y con una intensidad de 19.67 mm h⁻¹(Figura 12).

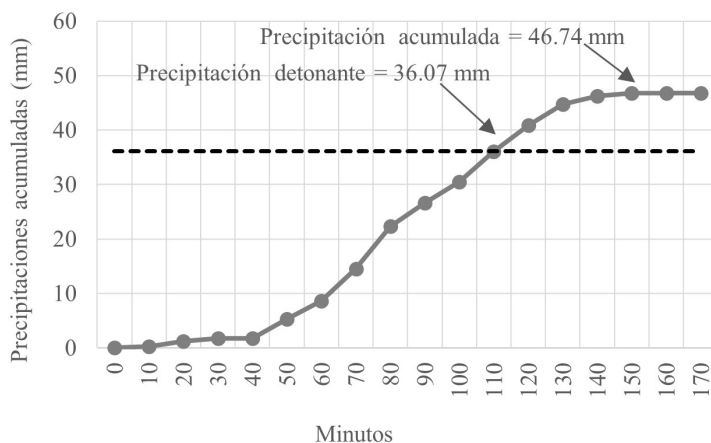


FIGURA 9.
Curva de masa de precipitaciones del evento lluvioso del 03/10/2016.

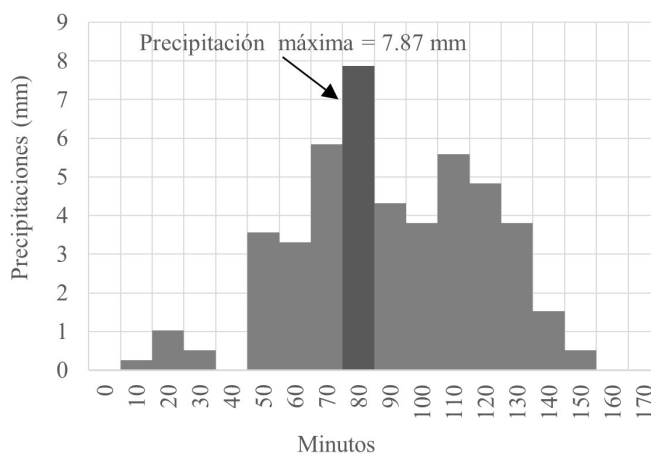


FIGURA 10.
Hietograma de precipitaciones en intervalos de 10 minutos del evento lluvioso del 03/10/2016.

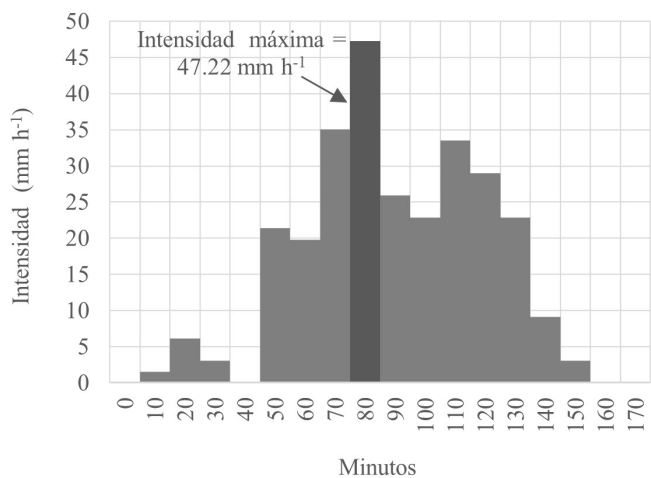


FIGURA 11.
Hietograma de intensidad en intervalos de 10 minutos del evento lluvioso del 3.oct.16.

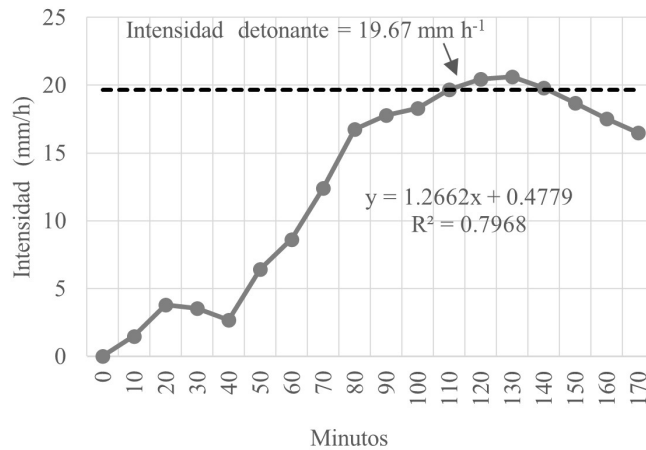


FIGURA 12.
Curva de masa de intensidad del evento lluvioso del 3.oct.16.

De la Figura 13 a la Figura 16, se presenta la descripción gráfica de la tormenta que ocasionó el lahar de Sintiope. Esta tormenta tuvo una duración de 310 minutos y una magnitud de lluvia de 44.96 mm (Figura 13). En la Figura 14 se visualiza el comportamiento de esta tormenta en intervalos de 10 minutos, siendo la precipitación máxima alcanzada de 8.13 mm, el hietograma de intensidad (Figura 15) muestra que la intensidad máxima alcanzada en este mismo intervalo es de 48.78 mm h⁻¹ registrada a los 20 minutos. Se estima que la lluvia detonante del lahar de Sintiope se dio al igual que en los lahares de Los Ramos y La Chirca a los 110 minutos de duración (según reporte de ocurrencia de guías turísticos y agricultores) con una lluvia acumulada de 35.32 mm y con una intensidad de 19.27 mm h⁻¹ (Figura 13 y Figura 16).

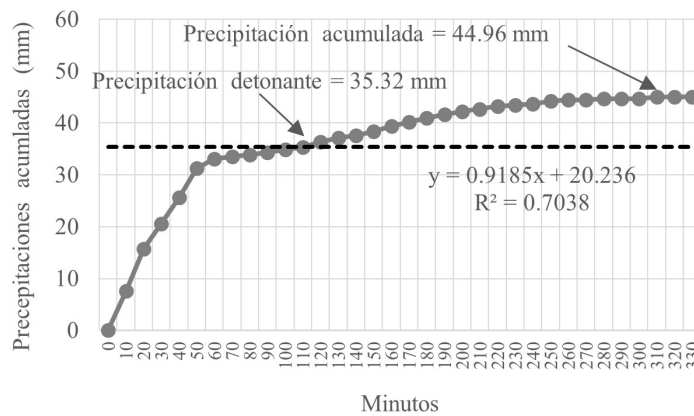


FIGURA 13.
Curva de masa de precipitaciones del evento lluvioso del 6.oct.16.

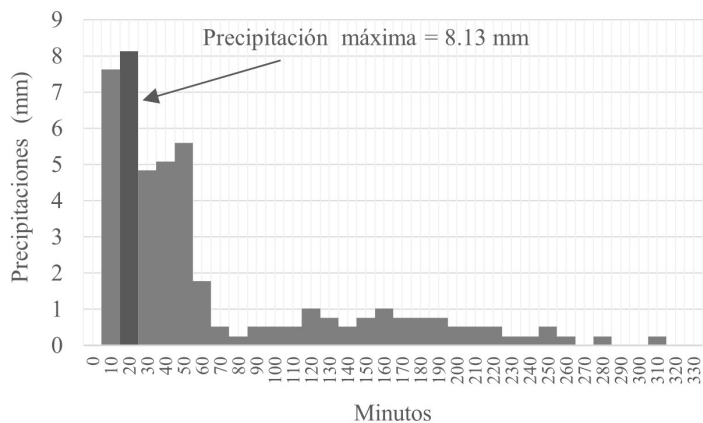


FIGURA 14.

Hietograma de precipitaciones en intervalos de 10 minutos del evento lluvioso del 6.oct.16.

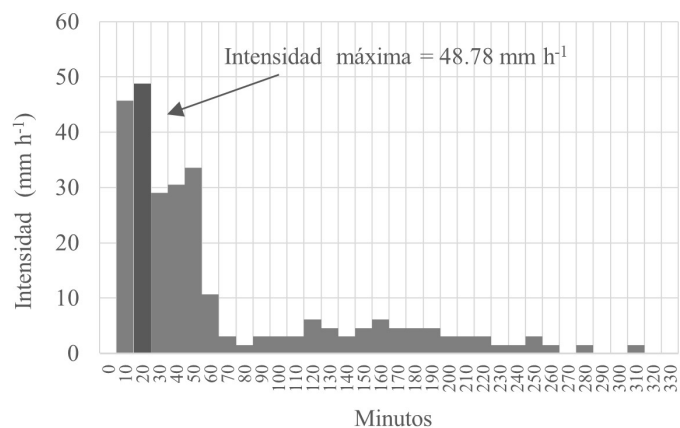


FIGURA 15.

Hietograma de intensidad en intervalos de 10 minutos del evento lluvioso del 6.oct.16.

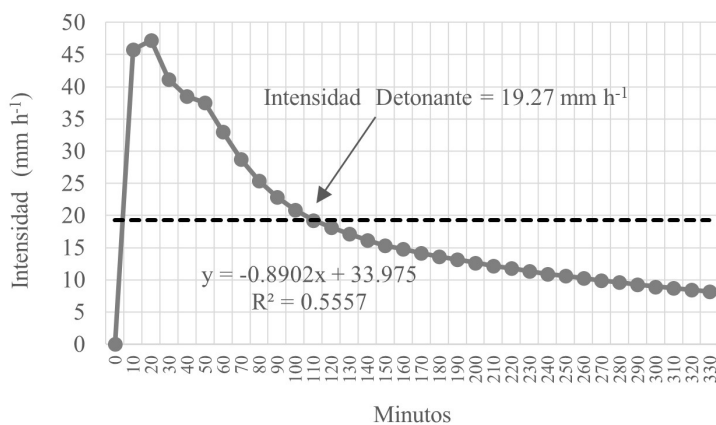


FIGURA 16.

Curva de masa de intensidad del evento lluvioso del 6.oct.16.

Umbrales de precipitaciones 2016

En el Cuadro 2 se indica que en promedio los eventos lluviosos con fenómenos laháricos presentan menores precipitaciones al momento detonante de 35.88 mm y los días acumulados antecedentes en un período de uno a 30 días de 0.76 mm (D1) a 150.03 mm (D30) que los eventos lluviosos que no ocasionaron fenómenos laháricos, con precipitaciones promedio durante toda la tormenta de 41.38 mm y con lluvias acumuladas antecedentes de uno a 30 días en promedio de 1.76 mm (D1) a 228.82 mm (D30).

En la Figura 17 se observa que aunque los eventos lluviosos sin fenómenos laháricos tienen un mayor acumulado de lluvia durante la tormenta, estos tienen mayor tiempo de duración que los eventos lluviosos que si ocasionaron fenómenos laháricos. Basándose en estos resultados, la ocurrencia y no ocurrencia de estos fenómenos, esta vinculada al comportamiento en cuanto a la duración e intensidad de estas tormentas y no unicamente al acumulado de lluvia. Según Aleotti (2004), cuando la intensidad de la lluvia aumenta, existe una disminución en la cohesión aparente que, a su vez, disminuye la resistencia al cortante, debilitando el factor de seguridad y llegando a producir deslizamientos superficiales. Por su parte Rahardjo *et al.* (2007) hacen referencia a que las lluvias de larga duración aumentan el nivel de agua freática, e inmediatamente la presión de poros aumenta, llegando a producir deslizamientos profundos.

CUADRO 2.

Registro de precipitaciones evento y acumuladas antecedentes a eventos y no eventos de lahares, 2016

Lahares / eventos lluviosos	Fecha	Estación	Precipitaciones evento (mm)	Precipitaciones acumuladas los días antecedentes						
				D1 (mm)	D3 (mm)	D10 (mm)	D15 (mm)	D20 (mm)	D25 (mm)	D30 (mm)
Los Ramos 1	3.oct.16	Altagracia	36.07*	1.01	1.01	17.26	48.22	51.76	86.78	140.57
Los Ramos 2			36.07*	1.01	1.01	17.26	48.22	51.76	86.78	140.57
La Chirca			36.07*	1.01	1.01	17.26	48.22	51.76	86.78	140.57
Sintiope	6.oct.16		35.32*	0.00	48.76	66.02	91.90	97.74	131.48	178.41
Promedios			35.88	0.76	12.95	29.45	59.14	63.26	97.96	150.03
Eventos lluviosos sin fenómenos laháricos	11.jun.16	Altagracia	35.31	0.25	33.51	192.39	211.38	211.38	227.83	241.53
	21.jun.16		48.71	0.00	0.00	37.34	71.86	212.70	249.73	249.73
Promedios	19.jul.16		40.12	5.03	5.03	39.98	65.09	131.04	143.20	195.20
Promedios			41.38	1.76	12.85	89.90	116.11	185.04	206.92	228.82

*Precipitación detonante, D: día.

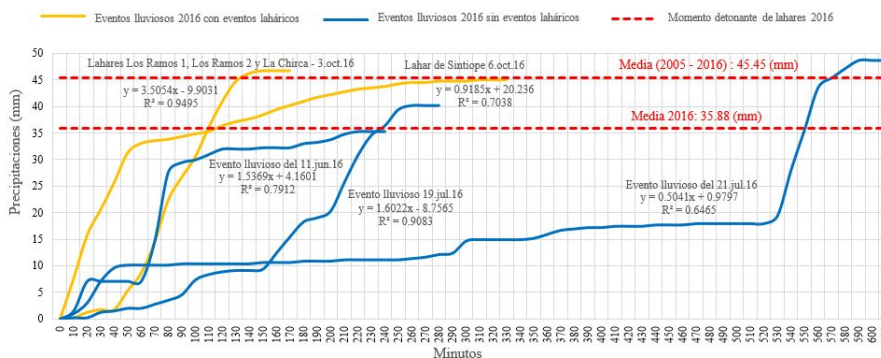


FIGURA 17.

Eventos lluviosos con lahares y eventos lluviosos sin lahares, 2016.

En promedio se tiene que los lahares del 2016 en el volcán Concepción ocurrieron con eventos lluviosos con acumulados durante toda la tormenta de 46.30 mm en 190 minutos de duración con una intensidad de 16.20 mm h⁻¹, siendo el momento detonante que originó los lahares a los 110 minutos de duración en promedio cuando las tormentas alcanzaban los 35.88 mm con una intensidad de 19.57 mm h⁻¹ (Cuadro 3). Por otro lado, se tienen eventos lluviosos con mayores precipitaciones que no ocasionaron fenómenos laháricos (48.71 mm y 40.12 mm con intensidades de 4.95 mm h⁻¹ y 9.26 mm h⁻¹). Sin embargo, si estos eventos lluviosos se analizan a los 110 minutos de duración (momento detonante de los eventos lluviosos que si ocasionaron lahares) se tienen magnitudes de lluvias en este tiempo de 10.41 mm y 8.38 mm con intensidades de 5.68 mm h⁻¹ y 4.57 mm h⁻¹; valores por debajo de los eventos lluviosos que si ocasionaron lahares (Cuadro 3). Según Cruz (2018), el umbral histórico promedio en el periodo 2005-2016 que ha ocasionado lahares en el volcán Concepción corresponde a 45.45 mm. En la Figura 17 se observa que el evento lluvioso del 3.oct.16 de los lahares Los Ramos 1, Los Ramos 2 y La Chirca, superan a este promedio con un acumulado de lluvia durante toda la tormenta igual a 46.74 mm; en cuanto al evento lluvioso del 6.oct.16 del lahar de Sintiopo, se aproxima al umbral histórico con 44.96 mm acumulados durante toda la tormenta.

CUADRO 3.
Precipitaciones e intensidad de lluvia de eventos laháricos y no laháricos

Lahares / eventos lluviosos	Fecha	Estación	Precipitación detonante (mm)*	Tiempo de lluvia para alcanzar precipitación detonante (minutos)	Intensidad de lluvia de lluvia detonante (mm h ⁻¹)**	Lluvia acumulada durante todo el evento lluvioso (mm)	Duración de todo el evento lluvioso (minutos)	Intensidad total durante el evento lluvioso (mm h ⁻¹)
Los Ramos 1	3.oct.16	Altagracia	36.07	110	19.67	46.74	150	18.70
Los Ramos 2			36.07	110	19.67	46.74	150	18.70
La Chirca			36.07	110	19.67	46.74	150	18.70
Sintiopo	6.oct.16		35.32	110	19.27	44.96	310	8.70
Promedios			35.88	110	19.57	46.30	190	16.20
Eventos lluviosos sin fenómenos laháricos	11.jun.16 21.jun.16 19.jul.16	Altagracia	30.99 10.41 8.38	110 110 110	16.90 5.68 4.57	35.31 48.71 40.12	220 590 260	9.63 4.95 9.26
Promedios			16.59	110	9.05	41.38	356.67	7.95

*Precipitación con 110 minutos de duración, **Intensidad de lluvia con 110 minutos de duración.

Anteriormente, se ha señalado que la mayor causa de ocurrencia de lahares en el volcán Concepción durante el 2016 recae en la intensidad de lluvia con que se da una tormenta. La litología, la morfología y el régimen climático son factores que permiten comprender porque la intensidad de lluvia es el factor determinante en la ocurrencia de estos fenómenos.

Los lahares del 2016 en Los Ramos 2, La Chirca y Sintiopo, tienen su origen en la parte alta del volcán Concepción, donde se identifica la serie de suelos de afloramientos rocosos y suelos miscelaneos varios. Según Aguirre y Acuña (2009), los suelos miscelaneos varios, son suelos franco-arenosos en la superficie, francos a francos arenosos en el subsuelo, bien drenados, tienen permeabilidad alta y baja capacidad de retención de humedad. Suárez (2009), indica que en los perfiles de suelos permeables poco profundos, los deslizamientos pueden activarse por un evento de gran intensidad, sin que exista lluvia antecedente o acumulada.

En el caso del lahar de Los Ramos 1, tuvo su origen en la parte media del volcán donde se identifican suelos vérticos, los cuales por ser de textura franco arcillosa en la superficie y textura arcillosa en el subsuelo, tienen

una capacidad de infiltración moderadamente lenta (Aguirre y Acuña, 2009). Alonso *et al.* (1995) señalan que el tiempo que se requiere para que una lluvia produzca un deslizamiento es mayor en los suelos arcillosos que en los suelos arenosos, así mismo hace referencia a que en suelos arcillosos, la lluvia acumulada de varias semanas es determinante para la activación de deslizamientos.

En cuanto a la pendiente, los lahares de Los Ramos 2, La Chirca y Sintiope tienen pendientes muy fuertes a moderadamente escarpadas que oscilan de 44.5 % a 67 %, en el lahar de Los Ramos 1 también se tienen pendientes fuertes en su ladera que van desde 22 % a 44.5 %; por lo que al momento de lluvias de gran intensidad los taludes más altos fallan con más frecuencia que los de pendiente moderada, factor que se atribuye a la disminución de las tensiones negativas, aunque en los taludes de menor altura y pendiente, el ascenso del nivel freático es mayor (Rahardjo *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

En el 2016 se registraron ocho eventos laháricos, agrupados en dos categorías: (1) lahares ocurridos con registro de precipitaciones mayores a cero milímetros (2) lahares ocurridos con registro de precipitaciones iguales a cero milímetros. A partir de los lahares ocurridos con registro de precipitaciones mayores a 0.00 mm se estimó que los umbrales de precipitaciones que ocasionaron los fenómenos laháricos en el volcán Concepción durante el 2016 corresponden en promedio a precipitaciones detonantes de 35.88 mm con una intensidad de 19.57 mm h⁻¹ y con precipitaciones acumuladas los días antecedentes de 0.76mm (un día), 29.45mm (10 días), y 150.03mm (30 días). Estos resultados sugieren que la tendencia de ocurrencia de fenómenos laháricos en el volcán Concepción se debe más a la intensidad de los eventos lluviosos que los producen que a las lluvias de baja intensidad y larga duración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Michigan (MTU por sus siglas en inglés) por financiar las estaciones meteorológicas y demás equipos requeridos en este estudio, Fauna y Flora Internacional (FFI) y Fundación entre Volcanes (FEV) por sus diversos aportes en esta investigación. A Lindsay Ellingson, estudiante de la maestría de Geología de la Universidad Tecnológica de Michigan, por todos sus esfuerzos, gestiones y acompañamiento para desarrollar esta investigación. Angélica Valdivia, coordinadora del programa de Ometepe de Fauna y Flora Internacional, por sus gestiones. A los guías turísticos y agricultores de la isla de Ometepe por la retroalimentación de información en cuanto a la ocurrencia de lahares. A los señores Luis Alemán, Rodolfo Juárez y colaboradores de Finca Magdalena por sus aportes y cuidado de las estaciones meteorológicas instaladas para este estudio. A los colaboradores de la Dirección de Geología y Geofísica y de la Dirección de Meteorología de INETER, por atender consultas y compartir información relevante para este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, C. y Acuña, E. (2009). *Suelos, capacidad de uso de la tierra y conflictos de uso en el municipio Moyogalpa*. AMUR. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENP30A284s.pdf>
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow. *Engineering Geology*, 73, 247–265.
- Alonso, E., Gens, A., Lloret, A. & Delahaye, C. (1995). Effect of rain infiltration on the stability of slope. En A. A. Balkema (ed.), *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils* (pp. 241–249).
- Cahuana, A. A. y Yugar, M. W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV- 233*. <https://civilmbh.files.wordpress.com/2013/11/hidrology-san-simon.pdf>

- Comisión Nacional de Energía. (2001). *Plan maestro geotérmico de Nicaragua: evaluación del área de volcán Casita - San Cristóbal*. <https://www.mem.gob.ni/wp-content/uploads/2017/03/vol-III-Volcan-Casita-San-Cristobal.pdf>
- Cruz Rivera, K. H. (2018). *Estimación de umbrales de precipitaciones que ocasionan fenómenos laháricos para la activación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en el volcán Concepción, Isla de Ometepe, Rivas, 2016* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/3772/1/tnp40c957.pdf>
- Delgados Granados, H. (2002). *Lahares*. https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/vol/concepcion/mapas_amenaza/05-Texto%20lahares.pdf
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. (2016). *Monitoreo Volcán Concepción, Isla de Ometepe Rivas*.
- Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. & Leong, E. C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, 1532–1543. https://www.researchgate.net/profile/E-Leong/publication/228371881_Factors_Controlling_Instability_of_Homogeneous_Soil_Slopes_under_Rainfall/links/00b7d523a46f2a96eb000000/Factors-Controlling-Instability-of-Homogeneous-Soil-Slopes-under-Rainfall.pdf
- Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres. (2005). *Reporte sobre las amenazas, vulnerabilidad y riesgos ante inundaciones, deslizamientos, actividad volcánica y sismos*. <https://webserver2.ineter.gob.ni/proyectos/30municipios/moyogalpa/informes/NiR%20B%20RA%20Moyogalpa%2020051114%20MG.pdf>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos: análisis geotécnico*. Universidad Industrial de Santander.