

# Evaluación probabilística del peligro por lahares en el flanco NE del Volcán Popocatepetl

Diana Marcela Rodríguez Espinosa, Gustavo Córdoba Guerrero, Hugo Delgado-Granados

**Diana Marcela Rodríguez Espinosa**

*drodriguez@udenar.edu.co*

**Gustavo Córdoba Guerrero**

Grupo de investigación en riesgos, amenazas y medio ambiente GRAMA, Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria, Torobajo, Pasto, Colombia.

**Hugo Delgado Granados**

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México.

## RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de la evaluación probabilística del peligro por lahares en la población de Santiago Xalitzintla, localizada en Puebla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl, México, usando el programa para el modelado de lahares TITAN2F. Con el fin de evaluar la confiabilidad de su uso sobre un modelo de elevación, se compararon los pronósticos del programa con datos de campo del evento lahárico de 2001. Los resultados obtenidos con TITAN2F son comparables con la información generada por estudios de este lahar, permitiendo concluir que el modelado con TITAN2F es confiable. Esta investigación presenta una herramienta útil en el conocimiento del peligro por lahares, en la cual, además de presentar la probabilidad del área de afectación por inundación, se muestra la distribución de probabilidades para niveles de presión dinámica, parámetro útil en la evaluación de riesgos por flujos laháricos.

Para realizar un análisis probabilístico, son necesarios un número de escenarios que sean estadísticamente representativos y abarquen todos los casos posibles. Con base en el registro de eventos históricos se definieron dos posibles fuentes para este tipo de flujos correspondientes a las barrancas Huiloac y Alseseca. En cada una de las cuencas se definieron los escenarios hipotéticos identificados por los rangos de condiciones iniciales (velocidad, concentración y volumen) que requiere TITAN2F.

Para el análisis probabilístico se realizó un muestreo estratificado mediante el método Hiper-cúbico Latino (LHS), con el cual se obtiene una muestra representativa con cientos de combinaciones de las condiciones iniciales, las cuales se modelan con TITAN2F. El análisis probabilístico se hace mediante inferencia bayesiana, a través de rutinas de programación en OCTAVE. La distribución probabilística señala que las zonas comunitarias de Santiago Xalitzintla tienen una probabilidad cercana al 80 % de ser alcanzadas por el lahar, pero con bajos niveles de presión dinámica. Se identifica como zona crítica la desembocadura de la Barranca Huiloac en donde la probabilidad de que las presiones dinámicas superen niveles destructivos es alta.

**Palabras clave:** Volcán Popocatepetl, lahar, TITAN2F, Santiago Xalitzintla, presión dinámica, software de modelado.

## ABSTRACT

*This study shows the results of a probabilistic evaluation of laharc hazard to Santiago Xalitzintla, locality in Puebla, at the NE flank of the Popocatepetl volcano in México. The TITAN2F software was used for lahars modeling. The program forecasts were compared with data obtained in the field for the laharc event of 2001 in order to evaluate the reliability of its use on a digital elevation model. The results obtained with TITAN2F are comparable with information reported previously in other studies of this lahar; coming to the conclusion that modeling with TITAN2F is reliable. This investigation provides a useful tool for the knowledge of laharc hazards. Also, it shows the probability of the affected area by inundation as well as the probability distribution of dynamic-pressure levels, which is an important parameter for assessment risk in a lahar flow.*

*To make a probabilistic analysis is required a number of statistically representative hypothetic scenarios, covering all possible cases. According to historical events recorded, two possible sources for a laharc flow were defined, and they correspond to the Huiloac and Alseseca gorges. Based on the geological information, the ranges of initial conditions that TITAN2F requires (velocity, concentration and volume) were defined for each one of the basins.*

*A stratified sampling was carried out using the Latin Hypercube method (LHS). This method generates a representative sample of hundreds of combinations from the initial conditions, in order to modeling laharc events with TITAN2F. The probabilistic analysis was made through Bayesian inference, and programming routines in OCTAVE. The probabilistic distribution indicates that there is a nearly 80 % probability to be reached by lahars at community areas of Santiago Xalitzintla. However it is characterized by low dynamic-pressure levels. The final section of the Huiloac gorge was identified as a critical zone, where the probability that dynamic-pressures surpassing destructive levels is high.*

**Keywords:** Popocatepetl volcano, lahar, TITAN2F, Santiago Xalitzintla, dynamic pressure, modeling software.

BOL. SOC. GEOL. MEX. 2017  
VOL. 69 NO. 1  
P. 243 – 260

Manuscrito recibido: Junio 13, 2016  
Manuscrito corregido: Octubre 12, 2016  
Manuscrito aceptado: Octubre 22, 2016

## 1. Introducción

Un lahar es una mezcla de detritos de diversos tamaños y agua lodosa, que se desplazan desde las laderas de un volcán y puede originarse de forma directa o indirecta por una erupción volcánica (Smith y Fritz, 1989). Los lahares se caracterizan por presentar gran movilidad, por lo que pueden recorrer grandes distancias, siendo altamente destructivos por los daños que pueden causar a los seres vivos y a la infraestructura, sea por el impacto directo, el transporte de sedimentos, el bloqueo de arroyos o el recubrimiento por transporte de escombros (Blong, 1984; Ortiz, 1996).

Se puede distinguir entre lahares primarios, aquellos relacionados directamente con un evento eruptivo, y secundarios, que no tienen relación con una erupción en particular (Vallance, 2000). Los lahares también pueden diferenciarse como: flujo de escombros (*debris flow*), flujo hiperconcentrado y flujo de arroyada de acuerdo con la proporción de agua y materiales sólidos que contengan, como se menciona más adelante (Smith y Lowe, 1991; Andrés *et al.*, 2014).

Los volcanes activos y sus lahares causan repetidamente pérdida de vidas y daños. Por ejemplo, los eventos laháricos ocurridos en el Monte Santa Helena (E.E.U.U.) en 1980 (Janda *et al.*, 1981; Pierson y Scott, 1985), los asociados a la erupción del Nevado del Ruiz (Colombia) en 1985 (Janda *et al.*, 1981; Sigurdsson y Carey, 1986; Parra y Cepeda, 1990; Pierson *et al.*, 1990) y los generados en el Volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991 (Pierson *et al.*, 1992; Rodolfo, 1989; Arboleda y Martínez, 1996) tuvieron efectos de alto impacto en la sociedad e infraestructura. El evento del Nevado del Ruiz (Colombia) fue el segundo desastre volcánico más importante del siglo XX. Para la prevención de este tipo de desastres asociados con volcanes y su actividad, muchas herramientas se han desarrollado para delimitar de forma aproximada las zonas de inundación por lahares alrededor de los volcanes y minimizar la vulnerabilidad de la población

e infraestructura ante este fenómeno (Sheridan *et al.*, 2001; Caballero y Capra, 2014; Córdoba *et al.*, 2015). Algunas herramientas computacionales han sido ampliamente utilizadas (*i.e.* LAHARZ; Sheridan *et al.*, 2001; Schilling, 2014) para mostrar de manera cualitativa y determinista el área de inundación de un lahar. Sin embargo, conforme la sociedad progresa, sus autoridades requieren de información que les permita tomar decisiones cada vez más complejas. Por ello, es fundamental utilizar herramientas que permitan, además de mostrar las áreas de inundación, evaluar probabilidades de parámetros que facilitan la toma de decisiones como son el área de inundación, espesor resultante de depósito y la presión dinámica de los flujos que revelan la vulnerabilidad y amenazan la vida e infraestructura.

Los mapas de peligro (también conocidos como de amenaza) probabilísticos tienen el objetivo de facilitar la cuantificación del riesgo, ya que combinados con la vulnerabilidad de los elementos expuestos ante una amenaza particular permiten este tipo de análisis. En este trabajo se realiza un análisis probabilístico del peligro por lahares en el flanco NE del volcán Popocatepetl, mediante el uso de TITAN2F, herramienta para elaborar modelos computacionales, diseñada para su aplicación en flujos laháricos (ver más en Córdoba *et al.*, 2010; 2015). Aquí, se verifica el pronóstico de TITAN2F con los resultados de investigaciones previas relacionadas con la velocidad del lahar de 2001 realizado por Muñoz-Salinas *et al.* (2007b). Posteriormente se realiza un muestreo representativo de todos los casos posibles, es decir se generan escenarios hipotéticos que están dentro de las magnitudes posibles registradas en eventos históricos del volcán Popocatepetl, usando la técnica de Muestreo Hiperúbico Latino (LHS por sus siglas en inglés) (Núñez *et al.*, 1999). Finalmente se llega al análisis probabilístico bayesiano (Coles y Tawn, 2005; Bulteau *et al.*, 2015) de esta amenaza en la población de Santiago Xalitintla.

## 2. Zona de estudio

El volcán Popocatepetl (5452 msnm) es uno de los estratovolcanes más activos en México, localizado en el sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) (Capra *et al.*, 2004). En 1994 inició una nueva etapa eruptiva que continúa hasta el momento de escribir este trabajo (Delgado-Granados *et al.*, 2001; Julio-Miranda *et al.*, 2008; Caballero y Capra, 2014), el volcán es considerado como uno de los más peligrosos de México y de los de más alto riesgo en el mundo, puesto que se encuentran grandes poblaciones dentro de su área de influencia, como la Ciudad de México a 65 km con ~ 9 millones de habitantes y la ciudad de Puebla con 1.5 millones de habitantes en 2010, localizada a 45 km (INEGI, 2000; Andrés *et al.*, 2014). Hasta el año 2001, el volcán tenía un glaciar por debajo de la cumbre en la cara norte, con una superficie de  $1.3 \times 10^3 \text{ m}^2$  (Delgado-Granados, 1997; Delgado-Granados *et al.*, 2007). Hoy en día permanecen bloques de hielo (*séracs*) como remanentes de ese antiguo glaciar. Topográficamente abajo de los remanentes del glaciar hay tres gargantas a 4800 msnm, sus nombres de este a oeste son: Tenenepanco, La Espinera y Tepeteloncocone (Figura 1a), según la cartografía del INEGI (2015). Los cauces asociados a estas gargantas drenan la principal barranca de este sector conocida como Huiloac (3500 – 4000 msnm). La barranca Alseseca se localiza en el norte del volcán, inicia prácticamente desde el cráter y se desplaza en sentido N-NE (Capra *et al.*, 2004). Las barrancas Huiloac y Alseseca unen su curso fluvial, tras cruzar el pueblo de Santiago Xalitzintla (Figura 1a) con una población de 2327 habitantes (Marcos *et al.*, 2006; Andrés *et al.*, 2007).

## 3. Ocurrencia de lahares

Los lahares son eventos frecuentes en el volcán Popocatepetl como lo indican los registros geológicos (Siebe *et al.*, 1995; González-Huesca *et al.*, 1997;

Andrés *et al.*, 2014; Castillo *et al.*, 2015; Tabla 1) y los comentarios de los pobladores (conocidos por ellos como “avenidas”). Las magnitudes de estos eventos han variado desde pequeños lahares generados por alta intensidad de lluvias, hasta grandes eventos que por ejemplo, han recorrido 50 km de distancia, como los asociados a la actividad pliniana que dio origen a la pómez rosa (González-Huesca *et al.*, 1997; Caballero y Capra, 2014). Éstos se movilizan a través de las gargantas de Tenenepanco, Huiloac y Alseseca y en ocasiones han sido un peligro para los habitantes de Santiago Xalitzintla (Palacios *et al.*, 2001; Capra *et al.*, 2004; Muñoz-Salinas, 2010; Tabla 1).

En diciembre de 1994 se inició el presente periodo eruptivo (Delgado-Granados *et al.*, 2001), los principales eventos laháricos han ocurrido en 1995, 1997 y 2001 (Capra *et al.*, 2004; Julio-Miranda *et al.*, 2008; Andrés *et al.*, 2014). En abril de 1995 flujos piroclásticos cubrieron aproximadamente el 50 % del glaciar, ocasionando la fusión del mismo canalizando el agua por las gargantas proglaciares (Tepeteloncocone, La Espinera y Tenenepanco) (Andrés *et al.*, 2014).

Entre junio y julio de 1997 se generó una de las mayores erupciones de la reciente actividad (Capra *et al.*, 2004; Julio-Miranda *et al.*, 2008; Andrés *et al.*, 2014). En la noche del 14 de junio se produjo un flujo de escombros que inundó el canal Alseseca (Sheridan *et al.*, 2001). Las condiciones de alta pluviosidad facilitaron el transporte de sedimentos de las gargantas proglaciares generando también un flujo de escombros. Este lahar transportó  $1.85 \times 10^5 \text{ m}^3$  de material sólido y agua que inundó Santiago Xalitzintla (Capra *et al.*, 2004; Muñoz-Salinas *et al.*, 2009a).

En la erupción del 22 de enero de 2001, se formó un flujo piroclástico que descendió 6 km a lo largo de una de las barrancas del flanco Norte desde el cráter y en un momento dado de su trayectoria, debido al emplazamiento del mismo flujo y la inclusión de agua se facilitó la formación del lahar (Julio-Miranda *et al.*, 2005; Julio-Miranda *et al.*, 2008; Caballero y Capra, 2014). No obstante esta interpretación, dado que el lahar ocurrió 4 horas



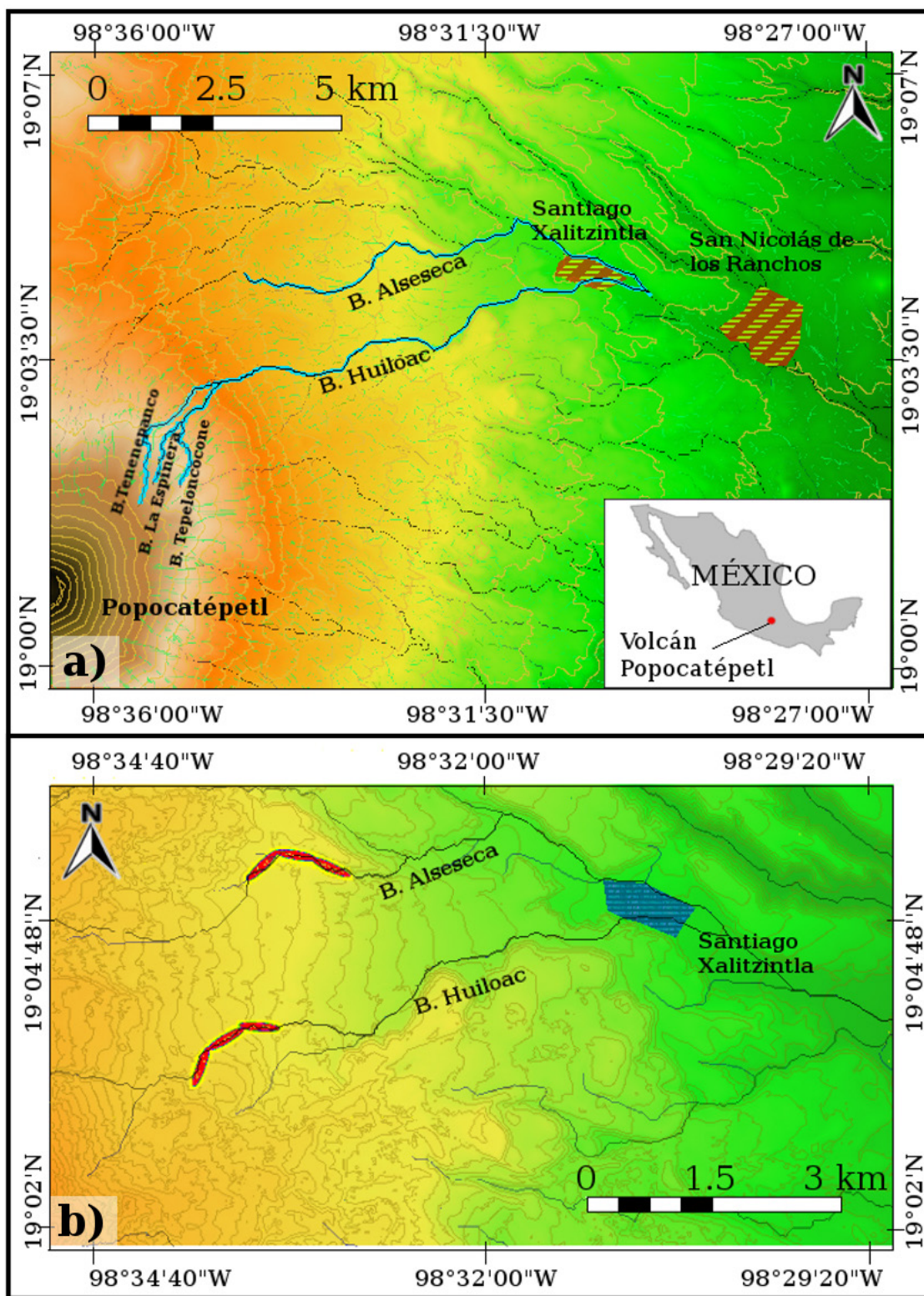


Figura 1 a) Localización del volcán Popocatepetl y la población de Santiago Xalitzintla en el flanco NE. b) Localización de las pilas de flujo en la parte media de las cuencas de las Barrancas Huiloac y Alseseca que atraviesan la población de Santiago Xalitzintla.

Tabla 1. Lahares registrados en el flanco NE, información tomada de Huggel y Delgado-Granados (2000) Sheridan *et al.* (2001), Julio-Miranda *et al.* (2005) y Capra *et al.* (2004).

Localidad	Fecha	Espesor (m)	Área planimétrica (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Xalitzintla*	2001	0.7	5.7 x 10 <sup>5</sup>	2.4 x 10 <sup>5</sup>
Xalitzintla*	1997	~1	~3.3 x 10 <sup>5</sup>	3.3 – 4.0 x 10 <sup>5</sup>
San Nicolás**	Hace 1100 – 1300 años	2	2.5 x 10 <sup>7</sup>	5.0 x 10 <sup>7</sup>
San Pedro**	Hace 1100 – 1200 años	2	5.9 x 10 <sup>7</sup>	1.2 x 10 <sup>8</sup>

\* Volumen del depósito.

\*\* Volumen total del flujo.

después del evento explosivo, su origen podría estar asociado a la liberación de agua subglacial acumulada en forma de “bolsas” de acuerdo con observaciones de campo posteriores al evento. Estas bolsas de agua son comunes en el ambiente subglacial de los glaciares mexicanos tal y como se han documentado para el volcán Iztaccíhuatl (Alvarez y Delgado-Granados, 2002). El lahar resultante transportó el agua fusionada del glaciar y los materiales del flujo piroclástico por la garganta Huiloac y alcanzó los 7 m de ancho por 0.5 m de alto. Finalmente, se detuvo 2 km antes de llegar a la población de Santiago Xalitzintla (Capra *et al.*, 2004; Julio-Miranda *et al.*, 2005; Caballero y Capra, 2014). El volumen transportado se estima en 1.6 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> y desarrolló velocidades entre 1.3 y 13.8 m/s (Muñoz-Salinas *et al.*, 2007b).

El retroceso de los glaciares en el Popocatepetl ha alcanzado tasas de 40 m a<sup>-1</sup> (Delgado-Granados, 1997; Huggel y Delgado-Granados, 2000; Julio-Miranda *et al.*, 2008), lo cual disminuye la probabilidad de ocurrencia de lahares asociados a interacciones entre el glaciar y la actividad eruptiva (Delgado-Granados *et al.*, 2015).

## 4. Análisis del peligro (Amenaza)

### 4.1. TITAN DOS FASES (TITAN2F)

TITAN2F es un modelo computacional basado en las leyes de balance de masa y *momentum*, tanto para la fase líquida, como para la fase sólida.

Asume que el material granular obedece a la relación constitutiva de Coulomb, mientras que la fase fluida se asume que es no viscosa. A fin de tener en cuenta la fricción basal en la parte fluida, se usa la formulación de Darcy-Weisbach, junto con un coeficiente de arrastre semi-empírico que transfiera las fuerzas entre la fase sólida y líquida (Córdoba *et al.*, 2010; 2015).

El programa requiere como datos de ingreso la localización de la pila o fuente del flujo, el volumen total, el porcentaje en volumen de la concentración inicial de sólidos, la velocidad inicial. El programa facilita el ahorro del consumo computacional porque éste se adapta a la malla 3D sobre la cual trabaja, además permite conocer campos de velocidad, concentración y presión dinámica del flujo en cada punto a lo largo de su trayectoria, siendo ésta una información muy útil para los tomadores de decisiones y para los procesos de gestión del riesgo. Ha sido puesto a prueba en distintos escenarios como el lahar del 2005 en el Valle de Vazcún, del volcán Tungurahua, Ecuador y los lahares de Villa La Angostura, Argentina (Córdoba *et al.*, 2015).

### 4.2. MAPA PROBABILÍSTICO

La probabilidad es una herramienta que permite evaluar la confiabilidad de un estudio basado en información de muestras colectadas de una población (Mendenhall, 2008).

Para la evaluación del peligro, generalmente se propone que la probabilidad (H) dependa de la

probabilidad de ocurrencia del evento (P) y la probabilidad de que un punto de interés, sea alcanzado por un nivel determinado de intensidad (I), expresándose como el producto de estas condiciones  $H = P \times I$  (Maskrey, 1993).

En este estudio, se asume una probabilidad de ocurrencia  $P = 1$ , haciendo que el análisis probabilístico se enfoque únicamente en la determinación de los niveles de intensidad de los lahares (I), por lo cual se trata de un nivel de probabilidad condicional, es decir en caso de que ocurra el evento (Dalbey *et al.*, 2008).

Debido a la complejidad del estudio de los peligros, existen muchas variables que condicionan su proceso, requiriendo como en este caso escenarios hipotéticos con diferentes combinaciones de las condiciones que puedan presentarse en la formación de lahares. De hecho, estas combinaciones, pueden ser potencialmente infinitas, pero para hacer algo práctico es necesario un muestreo que sea representativo de todos los casos dentro de los rangos de las condiciones de inicio, esto es lo que se conoce como el “Problema del Muestreo” (Goodman, 1960). En el caso de TITAN2F se deben estimar los rangos para las condiciones de: volumen, velocidad y concentración.

#### 4.3. TITAN2F Y DEMS

TITAN2F realiza la simulación del lahar sobre un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) y la calidad del modelo tiene implicaciones en los resultados obtenidos por el programa. En consecuencia, como primer paso, es importante comprobar si TITAN2F reproduce las condiciones reales de la amenaza sobre el DEM.

Inicialmente se trabajó sobre un DEM del volcán Popocatepetl de 3 m de resolución, que aunque proporciona información a gran detalle, por otra parte, contiene diferentes elementos artificiales o ruido que generan incongruencias en el modelo del proceso lahárico y situaciones complejas que afectan los pronósticos de TITAN2F. La plataforma del Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS (Neteler *et al.*, 2012) ofrece diferentes herramientas para tratar de corregir las imperfec-

ciones de un DEM, sin embargo, la depuración del DEM de 3 m implica un trabajo más allá de los propósitos de esta investigación, por lo que se decidió usar un DEM alternativo, el DEM de 15 m de resolución, con menores elementos de ruido pero de menor resolución. Al ejecutar TITAN2F sobre este modelo, se comprobó que el flujo seguía trayectorias observadas en eventos pasados. En GRASS se procesó el modelo con el fin de disminuir imperfecciones bastante sutiles, utilizando la herramienta “*r.denoise*” que suaviza la superficie del DEM, eliminando el ruido y mejorando la claridad y calidad del modelo en cuanto a pendiente y comportamiento hidráulico (Neteler *et al.*, 2012). Para verificar los pronósticos que hace TITAN2F se compararon los resultados de velocidad del flujo modelado con los valores estimados por Muñoz-Salinas *et al.* (2007b) quien con el método de sobre-elevación (Chow, 1959) estima la velocidad a partir de las mediciones de campo realizadas para el lahar de 2001, como se verá más adelante. El volumen del lahar de 2001 fue estimado por Julio-Miranda *et al.* (2005) como  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  a partir de los depósitos de  $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ , asumiendo una concentración de sólidos del 60 %. Sin embargo, con una concentración del 50 % (que resulta en un volumen de  $4.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) se obtienen los mejores resultados del modelo.

Los resultados de velocidad obtenidos para el modelado del lahar de 2001, fueron comparados con los reportados por Muñoz-Salinas *et al.* (2007b), para 11 sitios de depósitos evaluados, como se indica en la Tabla 2.

El análisis de confiabilidad se realiza aplicando la prueba Z no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que consiste en determinar la diferencia mayor en valor absoluto entre la distribución acumulativa de una muestra  $S_n(x_i)$  (observada en campo) y la distribución acumulativa teórica  $F_0(x_i)$  que realiza el modelo numérico (Pérez-López, 2001; Arriaza-Balmón, 2006).

La diferencia es estadísticamente representativa si  $S_n(x_i) - F_0(x_i)$  supera el límite de errores aleatorios, este límite depende del número de muestras (N) y el nivel de significancia  $\epsilon$ . Este valor, conocido



Tabla 2. Velocidades en m/s calculadas por Muñoz-Salinas *et al.* (2007b) y simuladas en TITAN2F. Los coeficientes  $S_n(x_i)$  y  $F_o(x_i)$  corresponden a la distribución acumulativa de las velocidades medidas y simuladas respectivamente.  $S_n - F_o$  es la diferencia de los anteriores coeficientes usada para calcular el coeficiente de confiabilidad de Kolmogorov-Smirnov.

Punto	Velocidad Medida	Velocidad Simulada	V. Medida Acumulada	V. Simulada Acumulada	$S_n(x_i)$	$F_o(x_i)$	$S_n - F_o$
1	8.30	8.60	8.30	8.60	0.75	0.78	-0.03
2	11.40	11.49	19.70	20.09	1.79	1.83	-0.04
3	8.90	8.90	28.60	28.99	2.60	2.64	-0.04
4	4.90	4.55	33.50	33.54	3.05	3.05	0.00
5	10.10	10.17	43.60	43.71	3.96	3.97	-0.01
6	4.40	7.00	48.00	50.71	4.36	4.61	-0.25
7	8.00	8.17	56.00	58.88	5.09	5.35	-0.26
8	4.70	4.60	60.70	63.48	5.52	5.77	-0.25
9	4.90	4.86	65.60	68.34	5.96	6.21	-0.25
10	13.80	12.03	79.40	80.37	7.22	7.31	-0.09
11	4.70	4.90	84.10	85.27	7.65	7.75	-0.11

como K-S crítico, es tomado de las tablas de valores críticos sobre bondad de ajuste para el método K-S. En nuestro caso, para un número de muestras  $N = 11$  y un nivel de significancia  $\epsilon = 0.01$  corresponde a  $K-S = 0.47$  (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1939). Se puede ver en la Tabla 2 que el valor de mayor diferencia es  $|-0.26|$ , al ser este valor menor al  $K-S = 0.47$  tenemos que los resultados con TITAN2F son confiables.

#### 4.4. CONDICIONES DE INICIO

##### 4.4.1. LOCALIZACIÓN DE LAS PILAS

En la Figura 1b se observa que las barrancas Hui-loac y Alseseca, cruzan y confluyen después de la población de Santiago Xalitzintla. Debido a que por cualquiera de ellas pudieran descender lahares, se decide localizar las pilas de material inicial en cada una de las gargantas.

##### 4.4.2. RANGOS DE CONDICIONES DE INICIO

En la Tabla 1 se presentan algunos de los registros geológicos de depósitos asociados a la ocurrencia de lahares en el volcán Popocatepetl, observándose que en él, se han generado flujos de lahares hasta del orden de  $10^8 \text{ m}^3$  (Sheridan *et al.*, 2001) de acuerdo al glaciar existente entre 1919 – 1927. Sheridan *et al.* (2001) modelaron lahares entre  $10^7$

$\text{m}^3$  y  $10^8 \text{ m}^3$ . Por su parte, Huggel y Delgado-Granados (2000) consideran que volúmenes de este orden tienen una baja probabilidad de ocurrencia. El volumen de los lahares asociados a una erupción más grande (pliniana) es de  $7 \times 10^7 \text{ m}^3$  (González-Huesca *et al.*, 1997; Julio-Miranda y Delgado-Granados, 2003).

En investigaciones anteriores se han elaborado modelos con el *software* LAHARZ para diferentes escenarios de acuerdo al porcentaje de fusión del glaciar en la formación de lahares (Huggel *et al.*, 2000) y también de acuerdo a las mediciones de los depósitos de lahares desde 1997 y 2001 los cuales han generado volúmenes que están en el orden de  $10^5 \text{ m}^3$  (González-Huesca *et al.*, 1997; Huggel y Delgado-Granados 2000; Julio-Miranda y Delgado-Granados, 2003; Julio-Miranda *et al.*, 2008; Muñoz-Salinas *et al.*, 2009a, 2009b, 2010).

Huggel *et al.* (2000) indican que el volumen de sedimentos para el lahar de 1997 está entre  $3.3 \times 10^5$  a  $4 \times 10^5 \text{ m}^3$  y Julio-Miranda *et al.* (2005) establecen que el lahar de 2001 tuvo un volumen de  $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ . Estos volúmenes se refieren al depósito, por lo cual asumiendo en el caso de mayor volumen de depósito ( $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; Huggel *et al.*, 2000) y una concentración del 50 % de sólidos, el rango de volúmenes de los flujos que pudieran presentarse

estaría entre  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  y  $8 \times 10^5 \text{ m}^3$ .

Con el fin de disminuir el costo computacional que representa modelar el flujo desde la cima con una velocidad inicial igual a cero (0), se decide ubicar la fuente del material en una parte intermedia, con un volumen distribuido en 3 pilas continuas (Figura 1b). Al no saber la velocidad que lleva el flujo en ese punto, se genera como incertidumbre adicional el valor de este parámetro, para determinar los rangos de velocidades mínima y máxima se hace necesario realizar simulaciones de prueba para los volúmenes mínimo y máximo. Resultando así que para los puntos de localización finalmente establecidos en este estudio, el rango de velocidades corresponde entre 1.8 – 10.2 m/s (Figura 2), las velocidades estimadas se encuentran dentro del rango del lahar de 2001 de 1.3 a 13.8 m/s (Muñoz-Salinas *et al.*, 2007b).

El rango de concentración de sólidos en los lahars gobierna su naturaleza. En el caso de flujos hiperconcentrados, se tiene una concentración que varía de 35 % a 40 % en volumen (Fei, 1983; Major y Pierson, 1992) y en los flujos de escombros se tiene entre un 55 % y 60 % de sólidos (Pierson

y Scott, 1985; Pierson, 1986). La concentración de sólidos en los flujos reportados por Julio-Miranda *et al.* (2005) y Muñoz-Salinas (2007a) en sus estudios de los lahars de 1997, 2001 y 2002 permiten considerar una concentración de sólidos entre 30 % y 50 % en volumen, cubriendo un espectro de flujos que van de hiperconcentrados a flujos de escombros (Pierson *et al.*, 1985), los cuales reproducen los eventos mencionados. Concentraciones mayores no se consideran porque el modelado con concentraciones mayores no permiten alcanzar las condiciones observadas.

#### 4.5. MUESTREO PROBABILÍSTICO

Existen diferentes métodos de muestreo para generar los parámetros de entrada y éstos reflejan diferentes incertidumbres en los resultados del modelo computacional de los flujos de peligros naturales (Dalbey *et al.*, 2008). Uno de ellos es el método de Monte Carlo (MC), que consiste en un muestreo aleatorio de los parámetros de entrada, lo cual hace fácil su implementación en cualquier problema sin importar cuán complejo sea. Sin em-

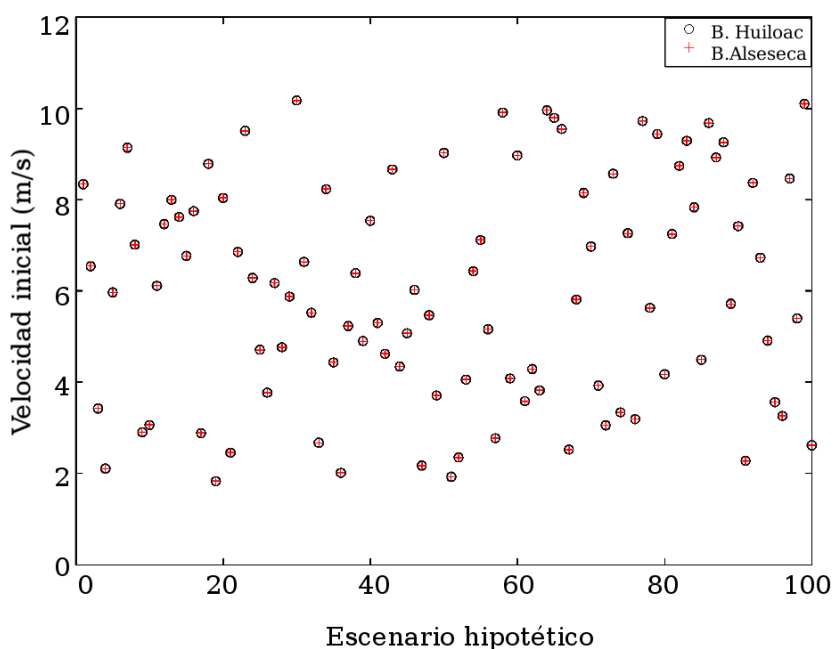


Figura 2 Velocidad inicial de la pila del material en cada una de las barrancas, para cada uno de los 100 escenarios hipotéticos generados mediante el muestreo LHS.



bargo, MC necesita muchas combinaciones para tener validez estadística, lo cual implica que para la solución de problemas complejos se necesitan ordenadores de alta gama, por su costo computacional elevado (Dalbey *et al.*, 2008) que haría intratable el problema. Por lo anterior, buscamos otro modelo que sea más eficiente computacionalmente, pero que tenga la misma precisión que MC. LHS es un muestreo estratificado desarrollado por McKay (1992). LHS implementa mejores propiedades de llenado de espacio mejorando la eficiencia en comparación con MC, sobretodo en la aplicación de modelos que requieren gran capacidad de almacenamiento, donde se necesita un número pequeño de muestras con un diseño óptimo (Núñez *et al.*, 1999; Dalbey *et al.*, 2008; Balousha, 2009).

En la Figura 3 se indica una comparación de la distribución que hacen los dos métodos de muestreo anteriormente citados, para 16 muestras. Se identifica en la Figura 3a que MC hace una distribución no uniforme de las muestras, dejando ciertos vacíos en el espacio de muestreo, que son evidentes en los segmentos 0.2 – 0.4 y 0.6 – 0.8. También puede sobrevalorar ciertas zonas como en la última sección (0.8 – 1) en donde está cerca del 30 % del tamaño total de la muestra, razón por

la cual serían necesarias más combinaciones para llenar estos espacios y tener una muestra que sea representativa.

El método LHS desarrolla una mejor distribución (Figura 3b) que MC, se observa que en cada división del espacio de muestreo se tienen igual número de combinaciones. Por lo anterior en este estudio usamos LHS y se realiza el muestreo mediante un *script* del *software* de libre distribución GNU OCTAVE que está diseñado para cálculos numéricos (Eaton, 1997).

#### 4.6. DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

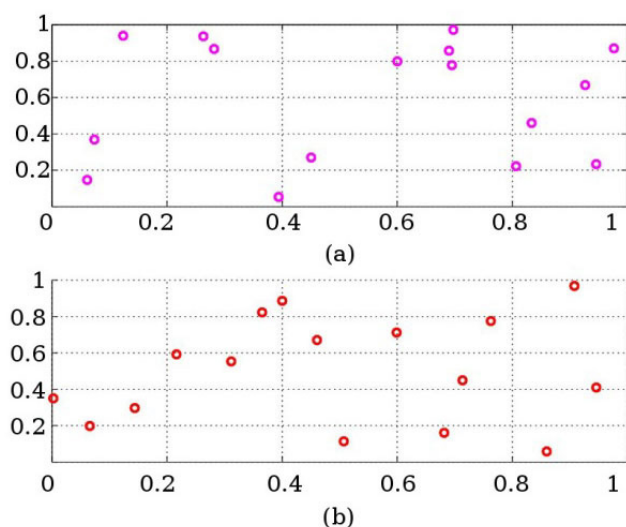
El método geocronológico consiste en el reconocimiento y datación de los lahares a partir de sus depósitos, proporcionando conocimiento de algunos escenarios de eventos pasados (Muñoz-Salinas *et al.*, 2010). Sin embargo, la cantidad de escenarios contemplados siguiendo este método (Tabla 2) no son una muestra representativa que permita llegar al cálculo de probabilidades, por lo cual se recurre a la opción de modelar escenarios hipotéticos a partir de distintas combinaciones de las condiciones de inicio, que estén dentro de los rangos factibles reconocidos a partir de la información geológica y observaciones sobre el volcán, pero asegurando su validez estadística.

En este trabajo se simularon 100 escenarios con las distintas combinaciones de condiciones iniciales para cada una de las fuentes de flujo, equivalentes a 10000 combinaciones de MC (Giner-Rubio, 1997). El error esperado se puede estimar con varias aproximaciones de diferente complejidad (Matala, 2008; Tang, 1993), siendo la más simple y más útil en nuestro caso, la expresada de la siguiente forma (Stein, 1987)

$$\epsilon_{LHS} = \left(\frac{1}{N}\right) \quad (1)$$

Dónde:  $\epsilon_{LHS}$  = Error de LHS; N= Tamaño de la muestra.

Para este número de simulaciones y usando la Ecuación 1, el error en el muestreo LHS es de  $10^{-2}$ . Bajo el concepto de nivel de peligro aceptable, Connor (2011) estima que se deberían tomar



**Figura 3** Distribución de 16 muestras generadas por los métodos a) MC y b) LHS, distribuidas en dos dimensiones con valores entre 0 y 1. La unidades de los ejes “x” y “y” son adimensionales.

medidas de mitigación para las estructuras vulnerables a partir de un nivel de probabilidad de ocurrencia de  $10^{-1}$ , bajo este parámetro el error asumido en este estudio es aceptable.

Por medio de un *script* en OCTAVE se generaron las distintas combinaciones de las condiciones de inicio (volumen, velocidad y concentración) para cada una de las pilas. La sistematización del ingreso de datos en cada una de las simulaciones se realizó con ayuda de rutinas adicionales de programación en OCTAVE, en las cuales el *software* se encarga de llamar a TITAN2F, proveer los datos de ingreso para cada simulación y a su vez organizar los resultados en diferentes directorios para facilitar su procesamiento posterior.

TITAN2F genera resultados agrupados en diferentes archivos de texto simple (.txt), en los cuales está contenida la información de los campos de velocidades, presión dinámica, concentración, así como altura de inundación en cada uno de los puntos de la malla computacional. La visualización de estos datos se hace utilizando los archivos de salida dentro de la plataforma GRASS GIS.

El procesamiento posterior de los resultados para el cálculo de probabilidad se hace mediante rutinas de OCTAVE, que tienen como base los principios del análisis de la probabilidad bayesiana descritos a continuación.

#### 4.7. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL MODELADO

La determinación de la probabilidad depende del enfoque que se le dé al estudio, generalmente se hace una evaluación clásica que consiste en el cálculo de la frecuencia relativa que depende únicamente del número de ensayos y sus resultados repetidos. Sin embargo el hecho de tener dos fuentes del flujo con localizaciones distintas antes de confluir en la población, representa una partición del espacio de muestreo en dos subconjuntos independientes, generando las condiciones para que su análisis probabilístico apropiado sea el de tipo bayesiano (Walpole *et al.*, 2007).

La probabilidad Bayesiana consiste en utilizar datos históricos como información previa para estimar una distribución *a priori* para los parámetros

de distribución de probabilidad (Bulteau *et al.*, 2015). Esta técnica proporciona un marco adecuado debido a su capacidad natural para el manejo de las incertidumbres, conduciendo a la representación probabilística de las estimaciones dadas por los modelos; además, permite la construcción modular en modelos complejos facilitando la inferencia en estos sistemas (Coles y Tawn, 2005; Bulteau *et al.*, 2015).

El cálculo de la probabilidad se hace a partir de la inferencia bayesiana la cual se basa en la Regla de Bayes y permite actualizar o inferir la probabilidad de que una hipótesis pueda ser cierta según las evidencias u observaciones, que en este caso son los resultados de las simulaciones realizadas en TITAN2F (Bretthorst, 2013). Adaptando la Regla de Bayes (Mendenhall, 2008) a este estudio, el análisis probabilístico realizado se explica a continuación. Se asume inicialmente que todas las fuentes tienen igual probabilidad de llegada a Santiago Xalit-zintla puesto que el análisis se hace para cualquiera de las barrancas Huiloac o Alseseca y que en un primer momento no se cuenta con evidencias en datos simulados, expresamos su probabilidad como:

$$P(F_i) = \frac{1}{j} \quad (2)$$

Dónde:  $P(F_i)$  = Probabilidad *a priori* (hipótesis) de que un flujo provenga de la fuente  $F_i$ ;  $j$  = Número de fuentes de simulación.

Una vez que se realiza el modelado de las simulaciones requeridas para cada fuente, se calcula la probabilidad frecuencial:

$$P(L|F_i) = \frac{nf}{ne} \quad (3)$$

Dónde:  $P(L|F_i)$  = Probabilidad frecuencial de la llegada del flujo al lugar  $L$  desde la fuente  $F_i$ ;  $nf$  = Número de veces que llega el flujo al lugar  $L$ ;  $ne$  = Número de ensayos de la fuente  $F_i$ .

Con lo anterior es posible tener una primera aproximación de la probabilidad total, que se calcula como la sumatoria de las probabilidades de las distintas fuentes desde  $i$  a  $j$ .

$$P(L_i) = \sum_{i=1}^j P(F_i) \times P(L|F_i) \quad (4)$$

Dónde:  $P(L_i)$  = Probabilidad total inicial de la llegada del flujo al lugar de estudio L.

Por inferencia bayesiana tenemos la probabilidad *a posteriori* que permite conocer la probabilidad de la hipótesis o primera distribución  $P(F_i)$  con la evidencia dada por  $P(L|F_i)$ , así:

$$P(F_i|L) = \frac{P(F_i) \times P(L|F_i)}{P(L_i)} \quad (5)$$

Dónde:  $P(F_i|L)$  = Probabilidad *a posteriori* de llegada desde la fuente  $F_i$  dado el flujo en el lugar L. El valor de  $P(F_i|L)$  indica verdaderamente la probabilidad de la fuente  $F_i$ , por lo cual es necesario realizar ese ajuste y volver a calcular la probabilidad total  $P(L)$  con la probabilidad de cada fuente  $P(F_i|L)$ :

$$P(L) = \sum_{i=1}^j P(F_i|L) \times P(L|F_i) \quad (6)$$

Dónde:  $P(L)$  es la probabilidad total ajustada por llegada de flujos laháricos para la población de Santiago Xalitzintla.

## 5. Resultados

### 5.1. MODELADO DEL PELIGRO

Las rutinas OCTAVE utilizadas para el análisis probabilístico generan un resumen de resultados en un archivo de tipo .txt que puede procesarse visualmente en la plataforma GRASS GIS facilitando la interpretación de esta información.

El *script* permite extraer los resultados de probabilidad para diferentes niveles o valores necesarios para las diferentes características del flujo (velocidad, presión dinámica, concentración, altura de inundación). Por ejemplo, para observar la probabilidad bayesiana de llegada de un flujo con una altura mayor a un valor particular o con un límite de presión dinámica que se considere importante y así, para cualquiera de las características que se requiera analizar.

Una vez procesados los resultados en el *software* GRASS GIS, se exportan estos datos para ser mostrados en un archivo de tipo Keyhole Markup Language (KML) que puede observarse sobre la plataforma Google Earth.

La Figura 4 presenta la distribución de probabilidad bayesiana para la llegada de un flujo con altura de inundación mayor a 0.2 m. Se observa que hay una probabilidad mayor del 80 % de que gran parte de la población de Santiago Xalitzintla sea inundada con esta profundidad.

Una herramienta muy útil en la gestión del riesgo es la información sobre la presión dinámica, que es la relación entre densidad del flujo y su velocidad al cuadrado. La presión dinámica o sobrepresión es la que produce daños en humanos y estructuras (Valentine, 1998; Spence *et al.*, 2004; Zanchetta *et al.*, 2004; Jenkins *et al.*, 2015). En este trabajo, extraemos los datos de presión dinámica que arroja TITAN2F a fin de que puedan ser usados en conjunto con estudios de vulnerabilidad estructural como el realizado por Rodríguez *et al.* (2015).

En la Figura 5 se indican los resultados de la distribución de la probabilidad bayesiana para diferentes niveles de presión dinámica. Gráficamente se representa una gama de colores equivalentes a valores de probabilidad desde 0 a 1, en donde 0 corresponde a una probabilidad nula y 1 es el 100 % de probabilidad de llegada de un lahar con el valor de presión dinámica indicado en cada imagen.

En la Figura 5a se muestra la distribución de probabilidad para una presión dinámica mayor a 10 kPa, se observa que las barrancas que atraviesan tienen una probabilidad alrededor del 80 %. Sin embargo, esta área representa aproximadamente el 50 % del área de afectación por inundación mostrada en la Figura 4, lo cual indica que un área de inundación grande no significa que el flujo lleve necesariamente una presión dinámica considerable.

La Figura 5b muestra la distribución de probabilidades para un lahar con una presión dinámica mayor a 20 kPa, mostrando predominancia de una probabilidad con valores cercanos al 50 %. En las Figuras 5c y 5d, se muestran probabilidades

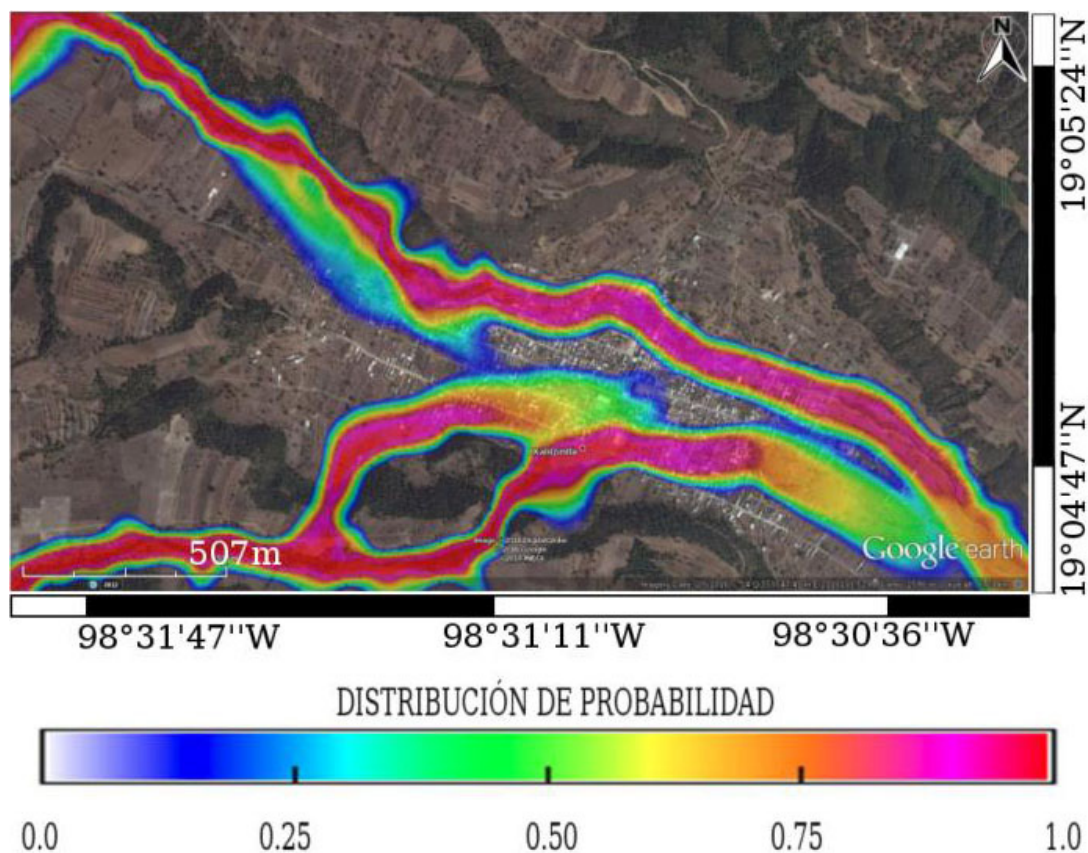


Figura 4 Distribución de la probabilidad bayesiana para un nivel de inundación mayor a 0.2 metros.

des para presiones dinámicas mayores a 30 kPa y 35 kPa respectivamente, para estas condiciones las probabilidades son menores estando entre 10 % a 20 %.

A medida que se incrementan los niveles de presión dinámica, el área afectada con altos valores de probabilidad disminuye, sin embargo la zona correspondiente a la barranca Huiloac presenta una alta probabilidad de llegada de lahares con presiones dinámicas superiores a los 35 kPa (Figura 5d). Con este nivel de presión dinámica las estructuras se verían altamente afectadas (Valentine, 1998; Spence *et al.*, 2004; Jenkins *et al.*, 2015) haciendo que en esta zona se deba tener especial consideración ante este peligro.

## 5.2. CONSIDERACIONES PELIGRO-RIESGO

Los resultados de probabilidad bayesiana para niveles de presión dinámica bajos como 10 kPa y 20

kPa, indican que las zonas comunes localizadas en el centro de la población se encuentran altamente amenazadas (Figura 5). Pese a que son niveles bajos, con esta presión dinámica hay mayor susceptibilidad de arrastre de seres humanos y una leve afectación en las edificaciones.

Para una presión dinámica que sobrepase los 35 kPa, gran parte de la población presenta una probabilidad por debajo del 25 %, sin embargo encontramos una zona crítica localizada en la desembocadura de la barranca Huiloac, en ella, la probabilidad de sobrepasar una presión dinámica de 35 kPa es cercana al 80 %. En esta zona se encuentra un campo deportivo y algunas viviendas, teniendo en cuenta que este nivel de presión dinámica genera daños severos en edificaciones (Valentine, 1998; Spence *et al.*, 2004; Jenkins *et al.*, 2015), este estudio otorga información de utilidad para que los tomadores de decisiones puedan considerar medidas al respecto.



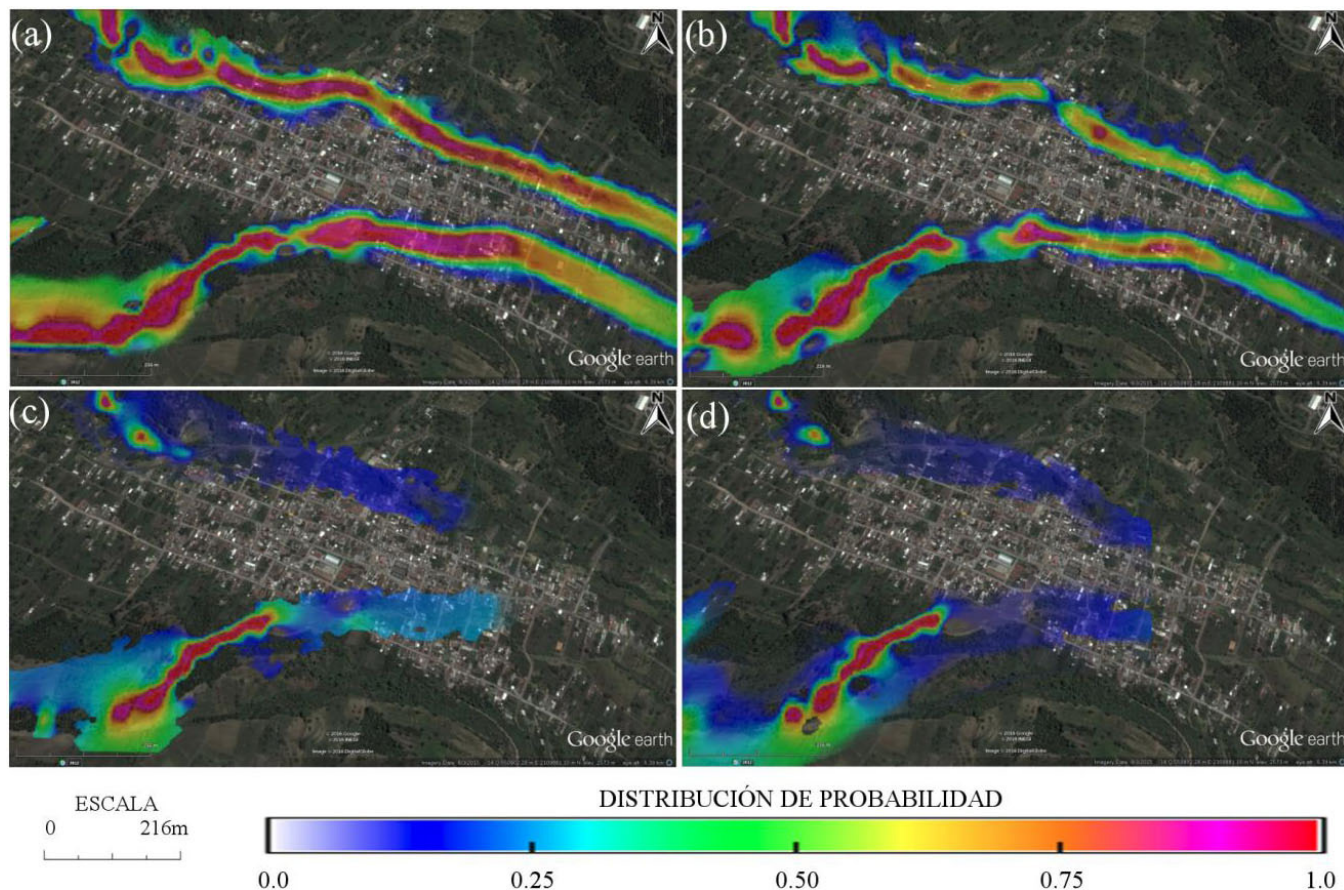


Figura 5 Distribución de la probabilidad bayesiana para los niveles de presión dinámica: a) 10kPa, b) 15kPa, c) 30kPa y d) 35kPa.

## 6. Conclusiones

En este trabajo desarrollamos una metodología para el análisis probabilístico del peligro por lahares en la población de Santiago Xalitzintla. Mediante la utilización de las condiciones iniciales (físicas y geológicas) presentadas en diferentes estudios acerca de eventos anteriores, se logró hacer la verificación del *software* TITAN2F y determinar los rangos de condiciones iniciales. El *software* TITAN2F generó resultados aceptables que permitieron hacer un uso confiable del programa en un ambiente más amplio como lo es el análisis probabilístico del peligro.

Gracias al muestreo de tipo estratificado con propiedades adecuadas de llenado se generaron esce-

narios hipotéticos que abarcaron todos los casos posibles con un error en el muestreo del orden de  $10^{-2}$  a partir del cual se deberían tomar medidas de mitigación para las estructuras. Cabe mencionar que una muestra diseñada para un nivel en el que se consideren las comunidades, implicaba un costo computacional mayor debido al incremento en la muestra requerida. Sin embargo, para las características mencionadas los escenarios modelados (100 por cada Barranca) fueron representativos de las condiciones de inicio y estaban dentro de los rangos físicos y condiciones geológicas posibles del volcán Popocatepetl.

El uso de herramientas computacionales permite realizar cálculos de gran complejidad y a su vez conocer características físicas de los lahares con mayor nivel de precisión, puesto que además de mostrar la zona de afectación, se puede conocer la intensidad del fenómeno en cada punto de ella.

En este estudio se presenta una primera aproximación, teniendo en cuenta que el DEM usado no tenía implementada la configuración urbanística de Santiago Xalitzintla, sin embargo la información resultante es un primer insumo de gran utilidad para el posterior análisis de la vulnerabilidad y gestión del riesgo de estos fenómenos.

TITAN2F respondió adecuadamente sobre el Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizado, representando situaciones complejas como la que ocurre en la Barranca Huiloac cuando comienza a cruzar la población de Santiago Xalitzintla, en donde se observa que debido a la intervención humana, la topografía ha cambiado de tal forma que facilita el direccionamiento de los flujos hacia zonas comunes de la población.

El presente trabajo se constituye como una herramienta en el conocimiento de la amenaza por lahares en la población de Santiago Xalitzintla, y proyecta una metodología que puede ser aplicada en otros escenarios y poblaciones que se vean afectados por amenazas geológicas de este tipo.

## 7. Agradecimientos

Este proyecto se realizó gracias a la financiación de la Vicerrectoría de Investigaciones, Postgrados y Relaciones Internacionales (VIPRI), la oficina de Bienestar Universitario de la Universidad de Nariño (UDENAR) y el Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se agradece en especial las gestiones del Dr. Arturo Iglesias director del IGF para apoyar financieramente este trabajo. De igual manera, agradecemos a Diana Alejandra Guerrero, perteneciente al equipo de trabajo del Grupo de investigación en Riesgos, Amenazas y Medio Ambiente (GRAMA) de la Universidad de Nariño, por su colaboración bajo la dirección del Dr. Gustavo Córdoba en la programación de las diferentes rutinas de OCTAVE usadas en este trabajo, las cuales fueron construidas en base a las ideas de Ramona Stefanescu y K Dalbey. Agradecemos también a Carlos Andrés Laverde del

Servicio Geológico Colombiano, Lucía Capra y a un revisor anónimo quienes con sus importantes apreciaciones y sugerencias ayudaron a mejorar la versión final de este trabajo. Parte de los resultados que se presentan aquí, han sido integrados al nuevo mapa de peligros del volcán Popocatepetl encargado al IGF por el Sistema Nacional de Protección Civil.

## 8. Referencias

- Alvarez, R., Delgado-Granados, H., 2002, Characterization of a tropical ice body on Iztaccíhuatl volcano, Mexico (resumen), *en* Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar: Santa Barbara, California, USA, Proceeding of SPIE, 438–442.
- Andrés, N., Zamorano, J.J., Sanjosé, J.J., Atkinson, A., Palacios, D., 2007, Glacier retreat during the recent eruptive period of Popocatepetl volcano, México: *Annals of Glaciology* 45, 73–82.
- Andrés, N., Zamorano, J., de Sanjosé, J., Tanarro, L., Palacios, D., 2014, Evolución post-lahárica de un canal proglaciar: garganta de Huiloac (México): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66, 305–328.
- Arboleda, R.A., Martínez M, 1996, Lahars in the Pasig-Potrero River System, *en* Newhall, C.G., Punongbayan, R.S. (eds.), *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines: United States, University of Washington Press, 1045–1052.
- Arriaza-Balmón, M., 2006, Guía práctica de análisis de datos: Sevilla, Junta de Andalucía, 200 p.
- Baalousha, H., 2009, Using orthogonal array sampling to cope with uncertainty in ground water problems: *Ground water* 47, 709–713.
- Blong, R., 1984, *Volcanic hazards, a sourcebook on the effects of eruptions*: Australia, Academic Press, 424 p.

- Bretthorst, G. L., 2013, Bayesian spectrum analysis and parameter estimation: USA, Springer Science & Business Media, 220 p.
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., Garcin, M., 2015, How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the xynthia event at La Rochelle (France): *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15, 1135–1147.
- Caballero, L., Capra, L., 2014, The use of flo2d numerical code in lahar hazard evaluation at Popocatépetl volcano: a 2001 lahar scenario: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (12), 3345–3355.
- Capra, L., Poblete, M., Alvarado, R., 2004, The 1997 and 2001 lahars of Popocatépetl volcano (central México): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131 (3), 351–369.
- Castillo, M., Muñoz-Salinas, E., Arce, J.L., 2015, Evaluación del sistema erosivo fluvial en el volcán Popocatépetl (México) mediante análisis morfométricos: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 67 (2), 167–183.
- Chow, V.T., 1959, *Open-Channel Hydraulic*: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- Coles, S., Tawn, J., 2005, Bayesian modeling of extreme surges on the UK east coast. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363 (1831), 1387–1406.
- Connor, C., 2011, A quantitative literacy view of natural disasters and nuclear facilities: *Numeracy*, 4 (2), 1-6.
- Córdoba, G., Sheridan, M.F., Pitman, B., 2010, A two-phase, depth-averaged model for geophysical mass flows in the TITAN code framework (resumen), *en* 28th IUGG Conference on Mathematical Geophysics: Pissa, Italy, CMG-IUGG, 1.
- Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M.F., Viramonte, J.G., Beigt, D., Salmuni, G., 2015, Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption: *Natural Hazards Earth System Sciences*, 15, 757–766.
- Dalbey, K., Patra, A., Pitman, E., Bursik, M., Sheridan, M., 2008, Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows: *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 113, 2156–2202.
- Delgado-Granados, H., 1997, The glaciers of Popocatépetl volcano (México): Changes and causes: *Quaternary International*, 43, 53–60.
- Delgado-Granados, H., Piedad-Sánchez N., Cárdenas-González, L., 2001, Sulfur dioxide emissions from Popocatépetl volcano (Mexico): case study of a high-flux passively-degassing erupting volcano: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108, 107–120.
- Delgado-Granados, H., Julio-Miranda, P., Huggel, C., Ortega del Valle, S., Alatorre Igarüengoitia, M.A., 2007, Chronicle of a death foretold: Extinction of the small-size tropical glaciers of Popocatépetl volcano (México): *Global and Planetary Change*, 56, 13–22.
- Delgado-Granados, H., Julio, G., Ontiveros, J., Cortés, G., Carrasco, B., Pulgarín, P., Mothes, H., Moreno, B., Cáceres, E., Correa, B., 2015, Hazards at Ice-clad volcanoes, *en* Haerberli, W. (ed.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*: Amsterdam, Elsevier Book Series on Natural Hazard, 607–636.
- Eaton, J.W., 1997, *Gnu octave*: Boston, USA, Free Software Foundation, 422 p.
- Fei, X., 1983, Grain composition and flow properties of heavily concentrated suspensions (resumen), *en* *Proceeding of the Second International Symposium on River Sedimentation*, China, Water Resources and Electrical Power Press, 307–309.



- Giner-Rubio, J., 1997, Aplicación del método de Monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas en salas: Santa Cruz de Tenerife, España, Universidad de La Laguna, Tesis doctoral, 210 p.
- Goodman, R., 1960, Teach yourself statistics, London: English Univ. 238 p.
- González-Huesca, A.E., Delgado-Granados, H., Urrutia Fucugauchi, J., 1997, The San Nicolas Lahar at Popocatepetl volcano (Mexico): A Case study of a glacier-ice-melt-related debris flow, triggered by a blast at the onset of a Plinian eruption (resumen), *en* International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, 1997: Puerto Vallarta Jal., Mexico, 94 p.
- Huggel, C., Delgado-Granados, H., 2000, Glacier monitoring at Popocatepetl volcano, Mexico: Glacier shrinkage and possible causes, *en* Hegg, C., Vonder-Muehl, D. (eds.), Beitrage zur Geomorphologie, Proceedings der Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft vom 8.-10. Juli 1999 in Bramois (Kt. Wallis), Birmensdorf, Eidgenoessische Forschungsanstalt WSL, 97–106.
- Huggel, C., Schneider, D., Julio-Miranda, P., Delgado-Granados, H., Käab, A., 2000, Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatepetl volcano, Mexico, *JVGR*, 170, 99–110.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000, México: XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Tabulados de la muestra censal, Cuestionario ampliado.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2015, Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. E14B42 (Huejotzingo) (en línea): Sistema Nacional de Información Geográfica y Estadística, publicado en 2015, disponible en <<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825267872>>, consultado 05 de junio de 2016.
- Janda, R.J., Scott, Kevin, M., Nolan, K., Michael, Martinson, HA, 1981, Lahar movement, effects, and deposits, *en* Lipman, P.W., Mullineaux, D.R. (eds.), The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, US Geological Survey, 461–478.
- Jenkins, F., Phillips, C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P., Hadmoko, D., Bélizal, E., 2015, Developing building-damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia: *Bulletin of Volcanology*, 77(9), 1–17.
- Julio-Miranda, P., Delgado-Granados, H., 2003, Fast hazard evaluation employing digital photogrammetry: Popocatepetl glaciers, Mexico: *Geofísica Internacional*, 42(2), 275–283.
- Julio-Miranda, P., González-Huesca, A.E., Delgado-Granados, H., Käab, A., 2005, Glacier melting and lahar formation during January 22, 2001, eruption, Popocatepetl volcano (Mexico), *Zeitschrift für Geomorphologie*, 140, 95–102.
- Julio-Miranda, P., Delgado-Granados, H., Huggel, C., Käab, A., 2008, Impact of the eruptive activity on glacier evolution at Popocatepetl volcano (México) during 1994-2001, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 86–98.
- Kolmogorov, A.N., 1933, Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione probabilistica, *Giorn. Ist. Ital. Attuari*, 4, 1–11.
- Major J.J., Pierson T.C., 1992, Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries: *Water resources research*, 28, 841–857.
- Marcos, F., Muñoz, J., Palacios, D., 2006, Aportación de la universidad a la prevención de riesgos: el caso del volcán Popocatepetl (México) (resumen), *en* II Congreso Internacional de Educación y formación para la prevención de riesgos catastróficos: Madrid España, Dirección General de



- Protección Civil y Emergencias, publicación en CD.
- Maskrey, A., 1993, Los desastres no son naturales, La Red Lima, 140 p.
- Matala, A., 2008, Sample size requirement for Monte Carlo simulations using Latin hypercube sampling: Finlandia, Helsinki University of Technology, 24 p.
- McKay, M.D., 1992, Latin hypercube sampling as a tool in uncertainty analysis of computer models, *en* New York, USA, Proceedings of the 24th Conference on Winter Simulation. ACM, 557–564.
- Mendenhall, W., 2008, Introducción a la Probabilidad y Estadística, Cengage Learning Latin America, 780 p.
- Muñoz-Salinas, E., 2007a, Los Lahares del Popocatepetl: Obtención y Tratamiento de la Información para la Prevención de Riesgos: Madrid, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia, tesis doctoral, 239 p.
- Muñoz-Salinas, E., Manea, V.C., Palacios, D., Castillo Rodríguez, M., 2007b, Estimation of lahar flow velocity on Popocatepetl volcano, México. *Geomorphology* 92, 91–99.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez M., Manea, V., Manea, M., Palacios, D., 2009a, Lahar flow simulations using laharz program: Application for the Popocatepetl volcano, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182, 13–22.
- Muñoz-Salinas, E., Renschler, C., Palacios, D., 2009b, A GIS-based method to determine the volume of lahars: Popocatepetl volcano, México: *Geomorphology* 111 (1), 61–69.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez M., Manea, V., Manea, M., Palacios, D., 2010, On the geochronological method versus flow simulation software application for lahar risk mapping: a case study of Popocatepetl volcano, México: *Geografiska Annaler* 92 (3), 311–328.
- Neteler, M., Bowman, M.H., Landa, M., Metz, M., 2012, GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS: *Environmental Modelling & Software* 31, 124–130.
- Núñez, MC., Leod, J., Baron, J., 1999, Técnicas estadísticas avanzadas en el análisis de grandes modelos computacionales (resumen), *en* Congreso latinoamericano de métodos computacionales para Ingeniería: Argentina, MECOM, 1–7.
- Ortiz, R., 1996, Riesgo volcánico: España, Servicio de publicaciones del Excmo, Cabildo Insular de Lanzarote, 329 p.
- Palacios, D., Zamorano, J.J., Gómez, A., 2001, The impact of present lahars on the geomorphologic evolution of proglacial gorges: Popocatepetl, México: *Geomorphology*, 37, 15–42.
- Parra, E., Cepeda, H., 1990, Volcanic hazard maps of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 42, 117–127.
- Pérez-López, C., 2001, Técnicas estadísticas con SPSS Versión 10: Barcelona, España Pearson Educación. 592 p.
- Pierson, T.C., Scott, K.M., 1985, Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow: *Water Resource Research* 21, 1211–1524.
- Pierson, T. C., 1986, Flow behavior of channelized debris- flows, Mount St. Helens, Washington: Boston, *en* Abrahams, A.D. (ed), *Hillslope Processes*: Boston, Allen and Unwin, 269–296.
- Pierson, T., Janda, R.J., Thouret, J.-C., Borrero, C.A., 1990, Perturbation and melting of snow and ice by the 13 november 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17–66.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Umbal, J.V., Daag, A.S., 1992, Immediate and Long-Term Hazards from Lahars and Excess Sedimentation in Rivers Draining Mt. Pinatubo, Philippines: Washington usa, U.S. Geol. Surv. Water-Resources Investigations Report, 35 p.

- Rodolfo, K.S., 1989, Origin and early evolution of lahar channel at Mabinet, Mayon volcano, Philippines: *Geological Society of American Bulletin*, 101, 414–426.
- Rodríguez, D., Moriano, D., Paredes, P., Córdoba, G., Delgado-Granados, H., 2015, Evaluación del Riesgo por lahares provenientes del volcán Popocatepetl, en la población de Xalitintla, Puebla, México (resumen), *en Foro Internacional sobre Gestión del Riesgo Geológico*, Arequipa, Perú: Arequipa, Jersy Mariño y Sandra Villacorta (eds.), 295 p.
- Sheridan, M.F., Hubbard, B., Bursik, M.I., Abrams, M., Siebe, C., Macías, Jo.L., Delgado-Granados, H., 2001, Gauging short-term volcanic hazards at Popocatepetl: EOS, *Transactions American Geophysical Union* 82 (16), 185–189.
- Schilling, S.P., 2014, Laharz\_py—GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones: U.S.: Virginia USA, *Geological Survey*, 78 p.
- Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M., Rodríguez, S., Castro, R., Delgado-Granados, H., 1995, Quaternary explosive volcanism and pyroclastic deposits in east Central Mexico: implications for future hazards: USA, *Geological Society of America*, 48 p.
- Sigurdsson, H., Carey, S., 1986, Volcanic disasters in Latin America and the 13th November 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano in Colombia: *Disasters* 10 (3), 205–216.
- Smirnov, N.V., 1939, Estimate of deviation between empirical distribution functions in two independent samples: *Bulletin Moscow University*, 2 (2), 3–16.
- Smith, G.A., Fritz, W.J., 1989, Volcanic influences on terrestrial sedimentation: *Geology*, 17, 375–376.
- Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991, Lahars: Volcano-Hydrologic Events and Deposition in the Debris Flow-Hyperconcentrated Flow Continuum: Sedimentation in Volcanic Settings: SEPM Special Publication, 45, 59–69.
- Spence, R.J., Baxter, P. J., Zuccaro, G., 2004, Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133 (1), 321–343.
- Stein, M., 1987, Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling: *Technometrics* 29 (2), 143–151.
- Tang, B., 1993, Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes: *Journal of the American statistical association*, 88 (424), 1392–1397.
- Valentine, G.A., 1998, Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87 (1), 117–140.
- Vallance, J.W., 2000, *Encyclopedia of Volcanoes*: San Diego, California, Academia Press, 601–616.
- Walpole, R., Myers, R.H., Myers, S.L., Devore, J.L., Navidi, W., 2007, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*: México, Norma, 157 p.
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M., Leoni, F., Santacroce, R., 2004, Characteristics of may 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the sarno area (campania, southern italy): relationships to structural damage and hazard zonation: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133 (1), 377–393.