



## Evaluación de amenaza por flujo de detritos por medio de simulaciones numéricas bidimensionales en las comunidades Panabaj y Tzanchaj, Santiago Atitlán Guatemala.

Evaluation of debris flow hazard by means of bidimensional numerical simulations in the communities of Panabaj and Tzanchaj, Santiago Atitlán Guatemala.

Juan Pablo Oliva Hernández<sup>1</sup>, Keila Sarai Ballesterio Laguna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID 0009-0006-1657-8343, [jp.olivah@gmail.com](mailto:jp.olivah@gmail.com)

<sup>2</sup>ORCID 0000-0003-1926-8683, [keila.ballesterio@igg.unan.edu.ni](mailto:keila.ballesterio@igg.unan.edu.ni)

<sup>1</sup>Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres, Consultor. Guatemala.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Instituto de Geología y Geofísica, CP: 663, Managua, Nicaragua.

### Resumen

En este artículo se aborda la problemática de los flujos de detritos en las comunidades de Panabaj y Tzanchaj en Guatemala. En el año 2005, la tormenta tropical Stan causó fuertes precipitaciones que desencadenaron inundaciones y movimientos de laderas, incluyendo flujos de detritos en la región. El objetivo principal de la investigación fue desarrollar un mapa de amenaza ante flujos de detritos en estas comunidades. Para lograrlo, se utilizaron modelos numéricos bidimensionales en el software FLO-2D con el fin de simular diferentes escenarios con periodos de retorno de 20, 100 y 500 años. Los resultados revelaron que más del 50% del área de estudio está bajo una alta amenaza, lo cual afecta significativamente a las comunidades, incluyendo la infraestructura básica como carreteras. Con base en estas condiciones, se concluyó que estas zonas no son aptas para la construcción de viviendas.

**Palabras clave:** FLO-2D, flujos de detritos, modelos numéricos, riesgos geológicos, amenaza por inundaciones.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales como huracanes, terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas, movimientos de laderas, etc., son parte intrínseca de la dinámica terrestre, estos fenómenos al combinarse con la vulnerabilidad de los grupos humanos se convierten en desastres. Los desastres ocasionados por fenómenos geológicos e hidrometeorológicos cada año van aumentando, esto debido al cambio climático, la sobrepoblación y el uso irracional de los recursos (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres [ISDR-ONU], 2004).

Un elevado porcentaje de la población vive en zonas afectadas por movimientos de laderas. La necesidad de vivienda ha obligado a la población a invadir zonas inadecuadas como laderas, abanicos aluviales, zonas de depósito de flujo de detritos, riberas de ríos y lagos etc. Es esta una de las razones de mayor peso para el estudio de zonas con historial de procesos de remoción en masa, en virtud de una adecuada gestión de riesgos (ISDR-ONU, 2004).

Del 4 al 6 de octubre del 2005, Guatemala fue afectada por un fenómeno meteorológico complejo iniciado como una baja presión en el Mar Caribe, desarrollándose posteriormente en una tormenta tropical que finalmente evolucionó en huracán, al fenómeno se le denominó Stan. El sistema se combinó con otros factores regionales generando altas precipitaciones en la región (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala [INSIVUMEH], 2005). Esto contribuyó a la acumulación de grandes volúmenes de agua, produciendo la licuación del terreno, y en consecuencia movimientos de laderas. Muchos de estos movimientos se presentaron principalmente en la costa sur y occidente de Guatemala, incluyendo las comunidades Panabaj y Tzanchaj.

Para la evaluación de amenazas en las comunidades estudiadas se utilizó el software FLO-2D de Flo Engineering, dada las condiciones de información y tiempo en la zona. Este software utiliza un modelo de dife-

### Abstract

This article addresses the problem of debris flows in the communities of Panabaj and Tzanchaj in Guatemala. In 2005, tropical storm Stan caused heavy rains that triggered floods and slope movements, including debris flows in the region. The main objective of the research was to develop a debris flow hazard map for these communities. For this purpose, bidimensional numerical models in FLO-2D software were used to simulate different scenarios with return periods of 20, 100 and 500 years. The results revealed that more than 50% of the study area is under high threat, which significantly affects the communities, including basic infrastructure such as roads. Based on these conditions, it was concluded that these areas are not suitable for housing construction.

**Keywords:** FLO-2D, debris flows, numerical models, geological risks, flood hazard.

rencias finitas (O'Brien et al., 1993), permitiendo simular flujo de lodo y escombros, adaptado a zonas urbanas y no urbanas. Además, se tomó en cuenta la existencia de obstáculos al flujo (tales como construcciones, bordas, etc.), a través de factores de reducción del área, para limitar la circulación del flujo. Existe también la posibilidad de modelar por separado calles y canales, entre otros elementos (Basabe et al., 2001).

### Zona de Estudio

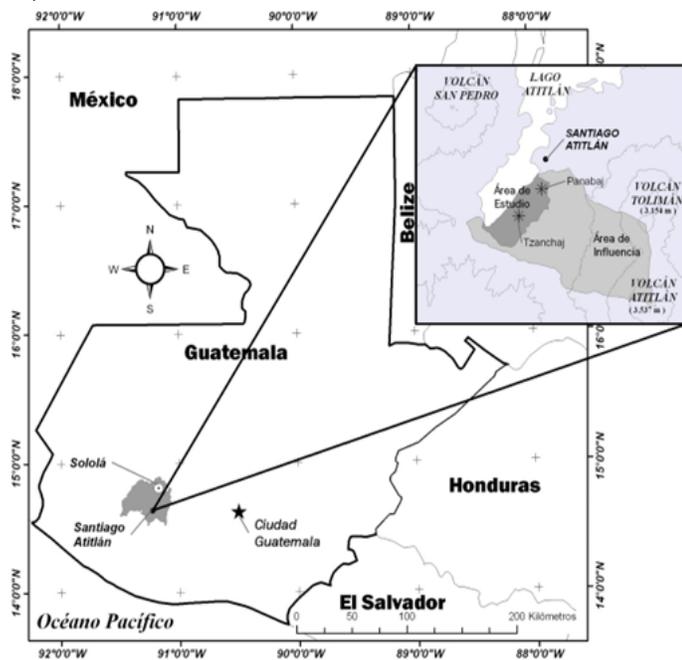
La zona de estudio está enmarcada en la cordillera volcánica guatemalteca, sobre el altiplano occidental en el municipio de Santiago Atitlán departamento de Sololá. Geográficamente la zona en estudio está ubicada entre las coordenadas 14°35'07" y 14°37'56" de latitud norte y las coordenadas 91°15'15" y 91°10'48" de longitud oeste. El sector de interés se encuentra en las laderas de los volcanes Atitlán y Tolimán dentro de la Caldera Volcánica de Atitlán, misma que formó un lago que lleva el mismo nombre.

Para este estudio la zona se dividió en área de influencia y área de estudio (Figura 1); el área de estudio correspondió a la zona del abanico fluvio-volcánico, además, es en esta área donde se concentra la actividad agrícola-urbana de los poblados estudiados, por lo cual se realizó una modelación de mayor detalle; el área de estudio posee una extensión de 3.6Km<sup>2</sup>; el área de influencia esta delimitada por las microcuencas que desembocan en el área de estudio, es aquí donde se generarán los movimientos de laderas, esta zona tiene una extensión de 19.5Km<sup>2</sup>.

El área de influencia cuenta con 14 microcuencas de las cuales la que tiene mayor extensión cuenta con 9.3Km<sup>2</sup>, y su canal principal recorre una distancia de 6.52Km. Las otras microcuencas tienen valores mucho menores, sin embargo en conjunto tienen una influencia importante. Los canales funcionan unicamente para drenar el agua de lluvia, por lo que no tienen corriente permanente.

Figura 1

Mapa de localización.



El período de lluvias en la zona es de mayo a octubre, donde los meses que reportan mayor precipitación son junio y septiembre. La media anual de precipitaciones es de 1149mm con un máximo de 1915mm y un mínimo de 701mm, según la serie de registros de 1970 al 2005 en la estación Santiago Atitlán, ubicada en el área de estudio.

Geológicamente, la zona se encuentra en el borde de la Caldera de Atitlán (Newhall et al., 1987). Como producto de la intensa actividad volcánica de la zona se puede observar las unidades geológicas siguientes: aluvión; lahares, piroclastos y flujos indiferenciados recientes; lavas de basálticas a andesíticas; rocas terciarias y cuaternarias indiferenciadas; rocas plutónicas de edad desconocida (Rose et al., 1980). En cuanto a la geomorfología, se identificaron zonas de salida de material, como escarpes y cicatrices de ruptura; zonas de transporte, como barrancos y canales; y finalmente zonas de depósito, que incluyen depósitos gravitacionales y planicies fluvio-volcánicas.

## 2. METODOLOGÍA

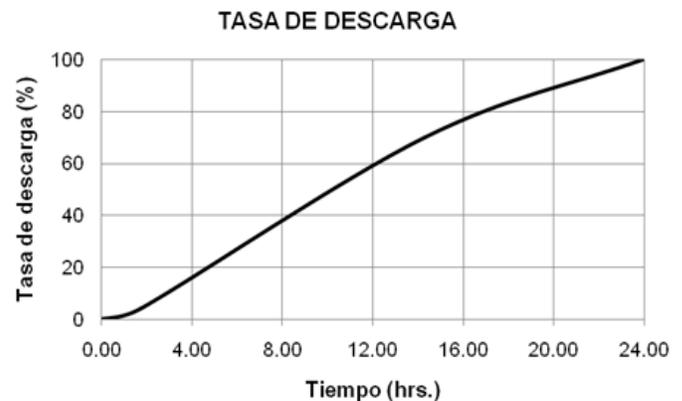
La investigación se planteó como un estudio de causa-efecto sobre los flujos de detritos del 2005, en las comunidades Panabaj y Tzanchaj. Basado en la evidencia geológica y geomorfológica se generó un modelo para estimar las áreas afectadas por los depósitos de flujos de detritos, seleccionando las variables de mayor influencia ante este tipo de fenómenos, tales como pendiente, uso del suelo, resistencia al flujo, dinámica de flujo, reología, carreteras y factores de reducción para las áreas urbanizadas. La información se obtuvo a través de consultas bibliográficas, visitas institucionales, trabajo de campo y ensayos de laboratorio.

El modelo se implementó en el software FLO-2D, el cual fue calibrado introduciendo la precipitación registrada durante el huracán Stan en octubre del 2005 (evento de referencia). Además, se compararon las áreas de afectación dejadas por el mismo suceso, respecto a las generadas con la simulación. Esto permitió validar el modelo para posteriormente realizar simulaciones de escenarios hipotéticos.

La determinación de los períodos de retorno se hizo mediante la aplicación de la función Doble-Gumbel, estimados para una recurrencia de 20, 100 y 500 años, lo que sirvió para formular los escenarios de simulación. Estos escenarios se ingresaron al software como descargas, utilizando un ritmo de descarga similar al observado en el evento de referencia. Para la determinación de la amenaza por flujo de detritos se utilizó la metodología zuisa modificada (Basabe et al., 2001). Esta metodología se basa en trasponer las variables de intensidad y frecuencia; donde la intensidad esta dada por la profundidad y la velocidad de flujo, estas variables son producto de la implementación del FLOD-2D; la frecuencia se planteó como los escenarios esperados para períodos de retorno (Tr), de 20, 100 y 500 años. Finalmente se analizaron los resultados respecto a la situación actual.

Figura 2

Tasa de descarga para la simulación de escenarios.



## Modelación y simulación

En el área de influencia se utilizó una grid de 50\*50m donde las elevaciones se obtuvieron del modelo de elevación, la rugosidad se alcanzó a partir del mapa temático de uso del suelo (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA], 2002), y utilizando los valores de n de Manning de Sotelo (2001). En el área de estudio se aplicó una grid de 25\*25m, ya que corresponde al área de mayor interés. Además, la rugosidad de Manning se obtuvo a partir del mapa de uso del suelo generado con la ortofoto a escala 1:20,000 de la zona.

La concentración volumétrica de sedimentos observada en el fenómeno de referencia varió de 20 a 45%, datos estimados del trabajo de campo; también, se recolectaron varias muestras de los distintos depósitos de flujos, posterior a evento del 2005, estimando los parámetros reológicos utilizando la técnica de Mitschka (1982).

Los escenarios se plantearon según los períodos de retorno de precipitaciones máximas en 24 horas, con base en una función de probabilidades Doble Gumbel. La serie de precipitaciones utilizada para el análisis fue de 38 años, tomada de la estación Santiago Atitlán. Las precipitaciones simuladas fueron de 202, 300 y 391 mm. Para los períodos de retorno de 20, 100 y 500 años, respectivamente. La tasa de precipitación fue la registrada por la estación meteorológica en la zona para el evento de referencia, en un tiempo de 24 horas, lo cual se detalla en la Figura 2.

La eficiencia en la calibración del modelo alcanzó un porcentaje mayor del 50% (Tabla 1), respecto al evento de referencia, según se constató en el trabajo de campo y la percepción remota. Se observan diferencias en cuanto al área total y los volúmenes, este hecho se da porque la tendencia del flujo en la simulación es a desplazarse sobre la planicie antes de drenar, mientras que en el evento de referencia el flujo tomó antiguos canales. Se destaca que las profundidades de flujo tienen una correspondencia alta en la simulación respecto al flujo de referencia.

## 3. RESULTADOS

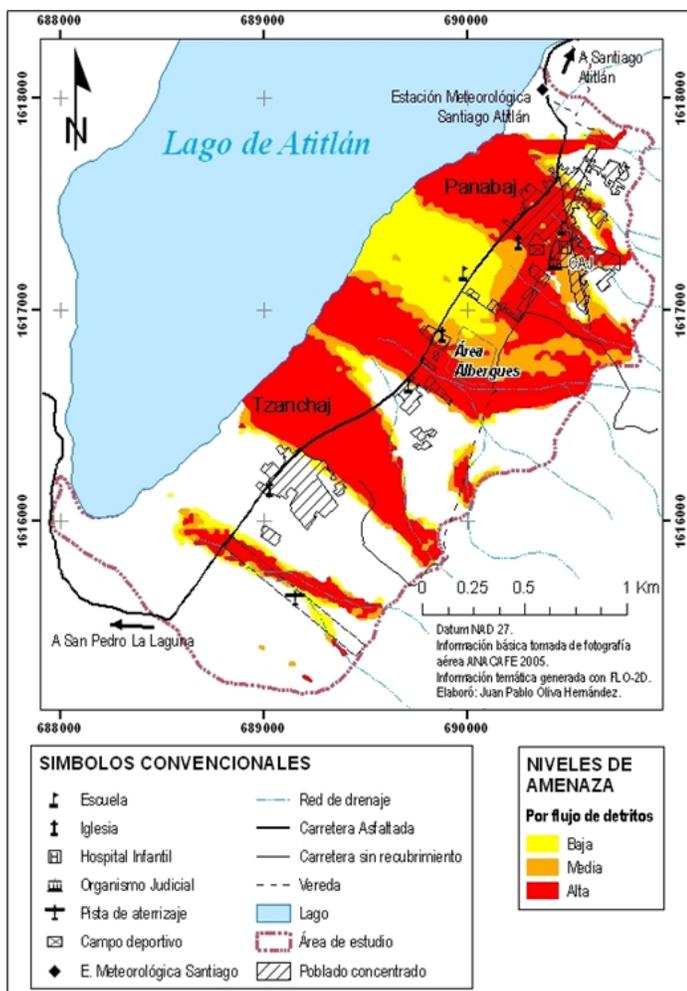
Como se aprecia en la Figura 3, en la zona predomina la amenaza alta con un 52.6% del área de estudio, encontrándose pequeñas áreas con amenaza media 6.8% y baja 4.9%. Cabe destacar que dentro de las áreas de amenaza alta se encuentra casi en su totalidad el área urbana de Panabaj, exceptuando un pequeño sector localizado al noreste del poblado, el cual como se observó en campo se encuentra asentado en una antigua colada de lava que sobresale del relieve.

Tabla 1

Evento de referencia vs simulación de calibración en los flujos.

Variables	Flujo ref.	Sim. calibración	Diferencia en %
Profundidad máxima (m)	3.50	3.25	92.8
Velocidad máxima (m/s)	---	4.15	---
Volumen estimado (m <sup>3</sup> /s)	245,651	448,718	54.7
Área de afectación (m <sup>2</sup> )	294,459	471,250	62.4

**Figura 3**  
Mapa de amenaza por flujo de detritos en los poblados Panabaj y Tzanchaj, Santiago Atitlán, Guatemala.



En la actualidad los pobladores cuyas viviendas quedaron en condiciones habitables después del evento del 2005, continúan viviendo en ellas. Debido a la falta de conciencia de pobladores, autoridades y benefactores, algunas personas han recibido ayuda para reconstruir sus viviendas y las han edificado en el lugar que ocupaban sus antiguas viviendas, permaneciendo en condición de riesgo.

Los albergues provisionales están localizados en una zona de amenaza alta, lo que expone a los sobrevivientes a otro desastre similar al ya ocurrido en el 2005. En junio del 2006, los albergues fueron evacuados debido a una pequeña inundación, poniendo de manifiesto la propensión a los flujos. Como consecuencia se colocó una borda de protección con material de los mismos depósitos y sin consolidar, este elemento aún se encuentra y provoca una falsa sensación de seguridad para los pobladores ya que este es susceptible a ser erosionado.

La infraestructura de comunicaciones tiene una amenaza alta en varios tramos en un porcentaje significativo. La carretera tiene una importancia primordial ya que de ocurrir un evento esta arteria quedaría bloqueada en varios tramos equivalentes al 56% respecto al total del tramo que atraviesa el Área de Estudio. Dado esto, los sobrevivientes de este evento hipotético se encontrarían atrapados, situación que ocurrió en el evento del 2005.

#### 4. CONCLUSIONES

Los factores antrópicos, tales como la ubicación de los poblados, el bloqueo de los cauces y la falta de políticas de prevención se combinó con la alta susceptibilidad a flujos de detritos en la zona, ocasionando el desastre del 5 de octubre en las comunidades Panabaj y Tzanchaj.

Según la precipitación registrada en la estación Santiago Atitlán y haciendo una relación estadística por medio de la función de probabilidad Doble Gumbel, los flujos de detritos que afectaron a Panabaj y Tzanchaj el 5 de octubre del 2005 tienen una recurrencia de 62.5 años.

La utilización de modelos matemáticos bidimensionales es una herramienta para la determinación de amenazas por flujos de detritos. El software FLO-2D se adaptó a los requerimientos de la metodología utilizada en esta investigación. Asimismo, es factible obtener otros productos como la estimación de profundidad y velocidades de flujo. También, la estimación de los parámetros reológicos permite conocer el comportamiento de los flujos de detritos en el área de estudio, lo cual constituye un parámetro indispensable en la simulación numérica de este tipo de fenómenos.

Se determina que el área en estudio no es apta para asentamiento humano permanente, debido a que la zona tiene una alta amenaza ante flujos de detritos, con profundidades de flujo superiores a los 2 metros y un alto grado destructivo. Por ello, se recomienda que las autoridades correspondientes implementen políticas de reubicación para los pobladores que viven en estas zonas de alto riesgo. Se necesita fortalecer la planificación territorial para asegurar que los asentamientos humanos se ubiquen en áreas menos propensas a sufrir los efectos de las amenazas. Además de un monitoreo continuo y la implementación de Sistemas de Alerta Temprana Multiamenazas para mitigar el impacto de estos eventos.

#### 5. REFERENCIAS

Basabe, P., Neumann, A. y Singer, A. (2001). Proyecto PREVENE, aporte a la prevención de desastres naturales en Venezuela. Caracas, Venezuela: Cooperación COSUDE-ONU/PNUD.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala. (2005). Resumen del impacto provocado por el Huracán Stan en Guatemala.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2002). Atlas temático de la República de Guatemala. Mapa 10 Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra por departamento.

Mitschka, P. (1982). Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *Rheological Acta* (21), 207-209.

Newhall, G. (1987). Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala. *Journal of volcanology and geothermal research*, 33, 23-55.

Newhall, C. G., Paull, C. K., Bradbury, J. P., Higuera-Gundy, A., Joppe, L. J., Self, S., Bonar Sharpless, N. & Ziagos, J. (1987). Recent geologic history of lake Atitlán, a caldera lake in western Guatemala. *Journal of volcanology and geothermal research*, 33, 81-107.

O'Brien, J.S., Julien, Y. & Fullerton, W.T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Hyd. Eng.*, 119(2), 244-259.

Organización de las Naciones Unidas. (2004). Vivir con el riesgo, informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres: International Strategy for Disaster Reduction. Ginebra, Suiza.

Rose, W. I., Penfield, G.T., Drexler, J. W. & Larson, P. B. (1980). Geochemistry of the andesite flank lavas of three composite cones within the Atitlán Cauldron, Guatemala. *Bulletin Volcanologic*, 43 (1), 131-153.

Sotelo, G. (2001). Ingeniería hidráulica. Facultad de Ingeniería, UNAM: México, 836.