

**DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE LAHARES EN EL VOLCÁN DE COLIMA Y  
ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIÓN EN LA POBLACIÓN DE  
SAN MARCOS, JALISCO, MÉXICO**

**ANDREA PÉREZ HERNÁNDEZ  
NATALIA ANDREA PÉREZ MEJÍA**

**TRABAJO DE GRADO**

**ASESORES**

**LUCIA CAPRA PEDOL  
JOSE FERNANDO DUQUE TRUJILLO**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
MEDELLÍN, COLOMBIA  
2020**

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....  | 6  |
| Abstract.....  | 7  |
| 1. Introducción.....                                   | 8  |
| 2. Justificación.....                                  | 9  |
| 2.1. Planteamiento del problema .....                  | 9  |
| 2.2. Hipótesis .....                                   | 10 |
| 2.3. Pregunta de investigación.....                    | 10 |
| 3. Objetivos .....                                     | 10 |
| 3.1. Objetivo general.....                             | 10 |
| 3.2. Objetivos específicos .....                       | 10 |
| 4. Localización .....                                  | 11 |
| 5. Estudios anteriores.....                            | 12 |
| 6. Marco teórico .....                                 | 15 |
| 7. Marco general .....                                 | 18 |
| 7.1. Características climáticas .....                  | 18 |
| 7.2. Características topográficas.....                 | 27 |
| 7.3. Volcán de Colima.....                             | 28 |
| 7.4. Modelo FLO-2D .....                               | 30 |
| 8. Metodología .....                                   | 31 |
| 8.1. Análisis de lluvias y cuencas hidrográficas ..... | 31 |
| 8.2. Simulación de lahares con el programa FLO-2D..... | 33 |
| 8.3. Mapas de amenaza .....                            | 40 |
| 8.3.1. Mapa de amenaza por máxima profundidad .....    | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 8.3.2. Mapa de amenaza por presión de impacto..... | 41 |
| 8.3.3. Mapa de amenaza por máxima inundación ..... | 41 |
| 8.3.4. Mapa de amenaza por probabilidad .....      | 42 |
| 9. Resultados .....                                | 42 |
| 10. Discusión .....                                | 53 |
| 11. Conclusiones .....                             | 62 |
| 12. Referencias bibliográficas.....                | 64 |

## LISTADO DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Localización general del área de estudio. ....  | 11 |
| <b>Figura 2.</b> Volcán de Colima .....  | 12 |
| <b>Figura 3.</b> Distribución de precipitación anual en la República de México. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CNA. <a href="http://smm.cna.gob.mx/">http://smm.cna.gob.mx/</a> .....   | 20 |
| <b>Figura 4.</b> Mapa de estaciones climatológicas en el estado de Jalisco, México....   | 21 |
| <b>Figura 5.</b> Variedad de climas en el estado de Jalisco a escala 1:1'000.000. Tomado de Carta de climas INEGI <a href="https://www.inegi.org.mx/">https://www.inegi.org.mx/</a> .....  | 22 |
| <b>Figura 6.</b> Distribución del promedio de precipitación mensual en la estación 14129. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <a href="http://smm.cna.gob.mx/">http://smm.cna.gob.mx/</a> .....  | 22 |
| <b>Figura 7.</b> Distribución del promedio de precipitación mensual en la estación 14118. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <a href="http://smm.cna.gob.mx/">http://smm.cna.gob.mx/</a> .....  | 23 |
| <b>Figura 8.</b> Distribución del promedio de precipitación por estación del año en la estación 14129. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <a href="http://smm.cna.gob.mx/">http://smm.cna.gob.mx/</a> .....   | 24 |
| <b>Figura 9.</b> Zonas que afectan a México, en las cuales se producen huracanes, y rutas que estos, generalmente, recorren. Tomado de Atlas de Huracanes, Secretaría de Programación y Presupuesto, INEGI <a href="http://contenidos.inegi.org.mx/contenidos/">http://contenidos.inegi.org.mx/contenidos/</a> ..... | 25 |
| <b>Figura 10.</b> Se observa el flujo en una de las barrancas y la profundidad de los canales determinada por el límite del canal. ....  | 29 |
| <b>Figura 11.</b> Herramientas utilizadas para cargar el proyecto en el programa FLO-2D.....   | 34 |
| <b>Figura 12.</b> Herramientas utilizadas para seleccionar el área computacional en el programa FLO-2D. ....   | 34 |
| <b>Figura 13.</b> Herramientas utilizadas para realizar la interpolación en el programa FLO-2D.....  | 35 |
| <b>Figura 14.</b> Herramientas utilizadas para definir celdas de entrada en el programa FLO-2D.....  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 15.</b> Herramientas utilizadas para definir celdas de salida en el programa FLO-2D.....   | 37 |
| <b>Figura 16.</b> Herramientas utilizadas para definir parámetros reológicos en el programa FLO-2D. ....   | 38 |
| <b>Figura 17.</b> Herramientas utilizadas para correr la simulación en el programa FLO-2D.....   | 38 |
| <b>Figura 18.</b> Herramientas utilizadas visualizar la simulación en la extensión del programa FLO-2D .....   | 39 |
| <b>Figura 19.</b> Gráficas de curvas de descarga para una de las simulaciones del escenario intermedio. a) Descarga en la parte alta del canal. b) Descarga en la parte baja del canal. ....   | 44 |
| <b>Figura 20.</b> Gráficas de curvas de descarga para una de las simulaciones del escenario intermedio. a) Descarga en la parte alta del canal. b) Descarga en la parte baja del canal. ....   | 45 |
| <b>Figura 21. a)</b> Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario pequeño. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 3.5 m y en la parte baja (zona de infraestructura) una profundidad de 2.5 m.....   | 46 |
| <b>Figura 21. b)</b> Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario intermedio. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 4 m y en la parte baja (zona de infraestructura) de 3.5 m.....  | 46 |
| <b>Figura 21. c)</b> Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario grande. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 12.5 m y en la parte baja (zona de infraestructura) una profundidad de 9.5 m.....   | 47 |
| <b>Figura 22.</b> Mapa de amenaza por máxima profundidad, en donde los valores máximos están representados en color rojo y los mínimos en color verde oscuro. a) Mapa de amenaza por máxima profundidad en el escenario pequeño, b) en el escenario intermedio, c) en el escenario grande..... | 50 |
| <b>Figura 23.</b> Mapa de amenaza por presión de impacto para el escenario grande, en donde los valores máximos están representados en color rojo y lo mínimos en color verde oscuro.....  | 51 |

**Figura 24.** Mapa de amenaza por máxima inundación, teniendo en cuenta los tres escenarios posibles, en donde el color verde está representando el escenario pequeño, el morado el escenario intermedio y el color rosa el escenario grande....52

**Figura 25.** Mapa de amenaza por probabilidad, teniendo en cuenta los tres escenarios posibles, en donde el color rojo está representando las probabilidades más altas y el verde oscuro las más bajas..... 53

**Figura 26.** Curvas en donde se grafican las variables de lluvia acumulada vs duración. a) Se visualiza una curva poco inclinada, la cual indica mayor tiempo y poca intensidad, y no está asociada a ocurrencia de lahares. b) Se visualiza una curva inclinada, la cual indica menor tiempo y mayor intensidad, y se relaciona con ocurrencias de lahares ..... 55

**Figura 27.** Gráficas de lluvia total acumulada vs el valor máximo de intensidad de los eventos que dispararon lahares. a) Gráfica para el 2018. b) Gráfica para el 2019. .... 56

## LISTADO DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Ejemplo de la tabla resumen en donde se visualizan fácilmente los datos de fecha, horas de inicio y fin, lluvia acumulada, duración, intensidad promedio, R3 e intensidad máxima. ....  | 32 |
| <b>Tabla 2.</b> Muestra las fechas a las que corresponden las simulaciones que fueron tenidas en cuenta como posible afectación en la población de San Marcos, se clasificaron en tres escenarios: pequeño (azul), intermedio (rojo) y grande (naranja). .... | 43 |
| <b>Tabla 3.</b> Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario pequeño.....  | 48 |
| <b>Tabla 4.</b> Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario intermedio.....   | 48 |
| <b>Tabla 5.</b> Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario grande. ....  | 48 |
| <b>Tabla 6.</b> Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por presión de impacto.....   | 50 |
| <b>Tabla 7.</b> Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por probabilidad..  | 52 |
| <b>Tabla 8.</b> Ejemplo de tabla de eventos de lluvia correlacionados a los lahares, con sus respectivas fechas, horas y duración. Además, se resaltan los eventos que acumulan cantidades de agua mayores a 20 mm, pero no disparan lahar. ....              | 56 |
| <b>Tabla 9.</b> División de los tres escenarios planteados a partir de las simulaciones realizadas, número de eventos correspondientes a cada uno y barrancas en las que ocurrieron. ....   | 57 |

## **ANEXOS**

1. Mapa de amenaza por máxima profundidad (escenario pequeño)
2. Mapa de amenaza por máxima profundidad (escenario intermedio)
3. Mapa de amenaza por máxima profundidad (escenario grande)
4. Mapa de amenaza por presión de impacto
5. Mapa de amenaza por máxima inundación
6. Mapa de amenaza por probabilidad
7. Fotografía volcán de Colima
8. Fotografía volcán de Colima y barranca Montegrande
9. Fotografía depósitos barranca Montegrande
10. Mapa de distribución espacial de las barrancas del volcán de Colima y estaciones de monitoreo. Tomado de Capra et al., 2018.

## Resumen

Los lahares son una mezcla de agua y sedimentos asociados a procesos volcánicos, pueden generarse por diferentes factores como derretimiento de glaciares, ruptura de presas y lluvias intensas; este último factor se presenta con frecuencia en los volcanes, suelen canalizarse en drenajes y alcanzar grandes distancias desde su origen, generando daños en la infraestructura de poblaciones aledañas.

El presente trabajo muestra el análisis de susceptibilidad a inundación por lahares disparados por lluvias en San Marcos, población localizada a 14 km hacia el sureste del Volcán de Colima, México, entre los límites de los estados de Jalisco y Colima. Se utilizó el programa para modelado de lahares FLO-2D a partir de eventos de lluvia ocurridos en los años 2018 y 2019. Se realizó un análisis de lluvias y se determinaron los eventos asociados a generación de lahares; a partir de esta información, los datos se simularon en el software FLO-2D, en el cual se dividieron tres escenarios posibles de lahares (pequeño intermedio y grande) que podrían afectar a la población de San Marcos.

A partir de las simulaciones numéricas se realizaron mapas de amenaza, los cuales fueron una herramienta para estudiar y analizar la susceptibilidad del área de estudio, teniendo en cuenta que los tres escenarios generan un impacto diferencial en la infraestructura. Además, la zona de estudio puede verse afectada por eventos de gran magnitud, como lluvias producidas por eventos de huracán. Asimismo, se hizo un análisis probabilístico, en donde el escenario grande presenta baja probabilidad de ocurrencia, ya que son eventos más regionales que los correspondientes a los escenarios intermedio y pequeño (lluvias orográficas). A partir del análisis de los mapas realizados se concluye que la población de San Marcos presenta una susceptibilidad a inundación por lahares de media a baja.

**Palabras clave:** Lahar, volcán, lluvia, susceptibilidad, inundación, simulación.

## Abstract

Lahars are a mixture of water and sediments associated with volcanic processes, they can be generated by different factors such as melting glaciers, dam's ruptures and heavy rainfall; this last factor occurs frequently in volcanoes, where rainfall/runoff process enhance erosion on main channels generating lahars that can reach large distances from their source, causing damages on the infrastructure of surrounding populations.

The present work presents rain-triggered lahar susceptibility analysis along La Arena ravine and the effect on San Marcos; a village located 14 kilometers southeast of the Colima Volcano, in Mexico, between the limits of the states of Jalisco and Colima.

To define the inundation limits, the program FLO-2D was chosen to model lahars, through data of rainfall events in 2018 and 2019. Using this information, a rainfall analysis was conducted and it was possible to identify those associated with the generation of lahars and to identify different scenarios depending on the total rainfall accumulation and its maximum intensity. Three different scenarios (small, intermediate and large) were identified and simulated with the FLO-2D code to analyze the effect on the population of San Marcos.

Based on the numeric simulations hazard maps were made, which were used as a tool to study and analyze the area exposed of lahar inundation, considering that the three scenarios can generate an impact to the infrastructure. Additionally, the study zone can be affected due to events of great magnitude, such as rainfall produced by hurricane events. Likewise, a probabilistic analysis was also conducted; where the large scenario presents low probability of occurrence, since these are events with regional (hurricane) character than those for the intermediate and small scenarios (rainy season). Through the analysis of the maps here presented, the population of San Marcos presents a low-medium hazard level to floods caused by lahars.

**Key words:** Lahar, volcano, rain, hazard, flood, simulation.

## 1. Introducción

El volcán de Colima es un estratovolcán ubicado en el límite entre los estados de Jalisco y Colima, en México, es uno de los más activos del país (Capra et al., 2018) y ha estado en actividad eruptiva continua desde hace aproximadamente 500 años, su último ciclo de erupción comenzó en enero de 2013. Desde esta fecha el volcán ha presentado actividad efusiva y explosiva persistente (Arámbula et al., 2018).

En las cercanías de este volcán, a unos 14 km, se encuentra la población de San Marcos, ubicada al sureste del volcán, en el estado de Jalisco. San Marcos cuenta con 3762 habitantes y un total de 1004 viviendas habitadas (INEGI, Instituto Nacional de Geografía y Estadística). La comunidad se ha visto afectada por el emplazamiento de lahares en la barranca La Arena, que cruza el centro habitado y drena desde una cuenca hidrográfica del orden de 2 km<sup>2</sup> (Capra et al., 2010). En su porción proximal, hasta una distancia de 4 km del cráter, área principal de alimentación de los lahares, el canal se desarrolla sobre pendientes abruptas desde 35° hasta disminuir a pendientes más suaves de 10 a 8°. El ancho del canal puede ser muy variable, de algunos metros en las zonas de altas pendientes hasta formar abanicos aluviales en donde ocurre la descarga de los escombros que producen daños directos a la infraestructura (Capra et al., 2010).

En los volcanes ocurren diferentes procesos endógenos y exógenos, en estos últimos están incluidos los lahares, que son mezclas de agua y sedimentos (en donde el contenido de cada uno es variable), que fluyen en las laderas de los volcanes (Smith y Fritz, 1989). Los lahares pueden ocurrir bajo diferentes escenarios en ambientes volcánicos, en donde los mecanismos que los generan incluyen el derretimiento de los glaciares durante un evento eruptivo, la ruptura de presas y la lluvia intensa (Caballero y Capra, 2014).

El régimen de precipitación en inmediaciones del volcán de Colima es afectado por lluvias desde finales de mayo hasta finales de octubre, no solo relacionadas a huracanes que se forman sobre el Océano Pacífico (Capra et al., 2010 y 2018), sino también por eventos locales (lluvias orográficas) que pueden generar múltiples

lahares a lo largo de las diferentes barrancas que drenan desde el volcán, y pueden resultar en daños significativos para las poblaciones cercanas y su infraestructura en un radio de 15 km de distancia desde la cima del volcán.

Los fenómenos de lahar representan una de las principales amenazas, ya que, pueden no estar relacionados a erupciones volcánicas, lo cual hace que se deban utilizar diferentes herramientas para determinar áreas de inundación en las zonas cercanas a los volcanes (Caballero y Capra, 2014).

Actualmente, muchas comunidades en el mundo son susceptibles a experimentar procesos ligados a actividades volcánicas debido a su cercanía, lo que lleva a realizar una gestión activa del riesgo por amenazas volcánicas (Paton et al., 2008). De esta forma, la relación entre amenaza y vulnerabilidad para estas poblaciones aumenta, teniendo en cuenta el escaso conocimiento que tiene la población sobre estas amenazas y el entorno en el que habitan (Murcia, 2008).

Por lo tanto, las inundaciones generadas por lahares son fenómenos que causan efectos negativos para las poblaciones y, según Macías et al. (2006), son probablemente el peligro volcánico más frecuente en el Volcán de Colima. Por esta razón, este trabajo busca definir los escenarios de riesgo posibles para la población de San Marcos y su respectiva susceptibilidad a inundación.

## **2. Justificación**

### **2.1. Planteamiento del problema**

Los lahares son procesos volcánicos que, a lo largo de la historia, han generado importantes pérdidas humanas y daños a infraestructura en poblaciones aledañas al volcán. Por su alta frecuencia en volcanes activos o en estado de quietud, es necesario mejorar la comprensión de éstos para realizar una oportuna evaluación y mitigación del riesgo, así como la planificación del uso del suelo, incorporando las herramientas necesarias, como lo son las simulaciones mediante modelados

numéricos, las cuales tienen en cuenta ejemplos ocurridos durante el pasado y son pertinentes para determinar escenarios que puedan suceder en el futuro.

## 2.2. Hipótesis

Los eventos de lluvia en el Volcán de Colima tienen una distribución temporal similar en sus diferentes sectores, y durante la temporada de lluvias se pueden originar lahares de diferente magnitud en las barrancas. De esta manera, la población de San Marcos es susceptible a inundación por lahares disparados por lluvia que se originan en la barranca La Arena.

## 2.3. Pregunta de investigación

¿Cuál es la susceptibilidad a inundación por lahares disparados por lluvia en la población de San Marcos?

# 3. **Objetivos**

## 3.1. Objetivo general

Analizar la susceptibilidad a inundación de la población de San Marcos, con base en la definición de escenarios de lahares del Volcán de Colima que puedan afectar la misma.

## 3.2. Objetivos específicos

- Establecer, mediante los cálculos correspondientes, los datos de lluvia acumulada, duración del evento, intensidad promedio, intensidad máxima y descarga para los años 2018 y 2019.
- Determinar la relación entre los eventos de lluvia registrados y los lahares ocurridos durante los años mencionados.
- Simular, a partir de modelación numérica, los eventos representativos del periodo anteriormente mencionado.

- Con base en las simulaciones, clasificar los escenarios posibles de eventos grandes, intermedios y pequeños.
- A partir de la distribución de eventos, realizar mapas de amenaza por máxima inundación, máxima profundidad y por probabilidad para los tres escenarios, y mapa de presión de impacto para eventos grandes.

#### 4. Localización

El área de estudio se encuentra localizada hacia el oeste de México, específicamente en los estados de Jalisco y Colima, los cuales limitan al sur con el estado de Michoacán y al oeste con el Océano Pacífico; Jalisco limita con el estado de Guanajuato al este, y los estados de Aguascalientes, Zacatecas y Nayarit al norte (Figura 1). El volcán de Colima (Figura 2) se encuentra ubicado en el límite entre los estados de Jalisco y Colima, y a unos 14 km hacia el sureste, se localiza la población de San Marcos, la cual está situada en el municipio de Tonila, en el estado de Jalisco.

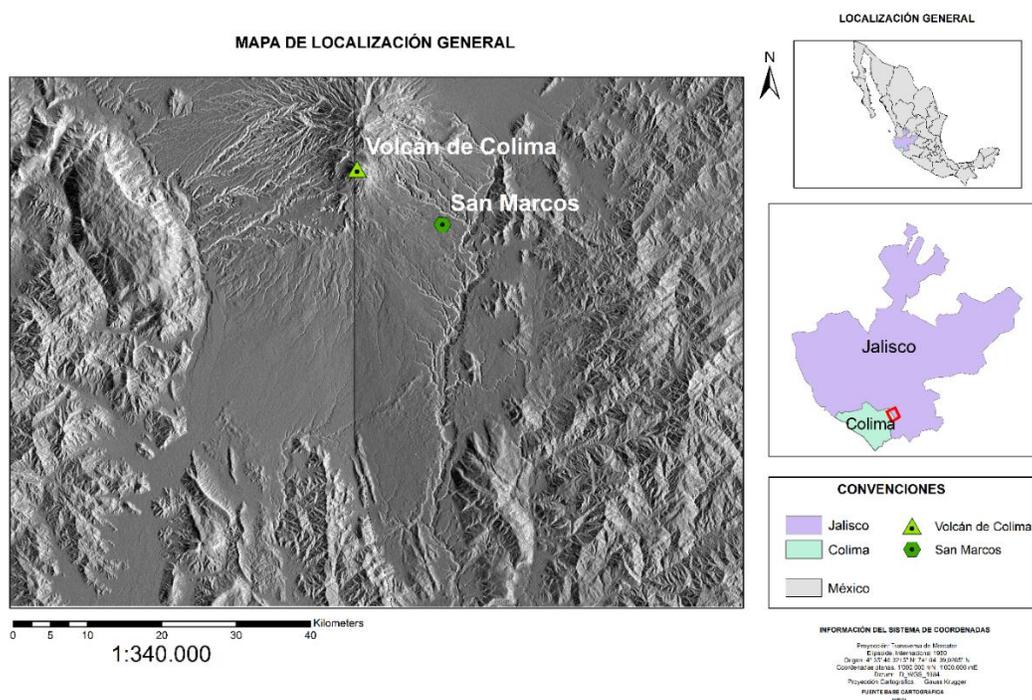


Figura 1. Localización general del área de estudio.



Figura 2. Volcán de Colima

## 5. Estudios anteriores

- Dávila et al., 2007. Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification → Durante el período reciente de actividad del Volcán de Colima, los productos piroclásticos no afectaron directamente a las aldeas alrededor del volcán, sin embargo, varios lahares sí lo hicieron. En este documento se presenta un mapa de amenaza por lahares, que muestra que varias aldeas y fincas pueden verse afectados. En contraste, debido a los cambios morfológicos producidos por los productos de la intensa actividad explosiva, otras áreas pobladas como La Yerbabuena, están fuera de la zona de alto riesgo.
- Gavilanes-Ruiz et al., 2009. Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, Mexico → El Volcán de Colima ha aumentado su actividad considerablemente desde 1998 con cuatro períodos importantes de actividad. Durante el año 2005 la magnitud de la explosividad aumentó, produciendo flujos piroclásticos, de los cuales dos alcanzaron más de 5 km. El riesgo de lahar también es significativo ya que más de 5000 personas viven cerca del volcán. Desde el año 1997, se han llevado a cabo estudios en la

región para definir la relación que existe entre la población y el volcán. Aunque las metodologías utilizadas fueron diferentes, cada estudio consideró los resultados de los anteriores e intentó aportar más datos para definir la variación geográfica en la percepción del riesgo. Los resultados de los estudios demostraron que la distancia al volcán no influye directamente en la percepción del riesgo.

- Capra et al., 2010. Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency initiation process → Los lahares inducidos por lluvia han sido muy frecuentes en el Volcán de Colima, alcanzando distancias relativamente largas, de hasta 15 km, causando daños a la infraestructura y afectando pequeñas aldeas. En el año 2007 se instalaron dos estaciones con pluviómetros en el flanco sur del volcán, registrando eventos de junio a octubre, período en que las lluvias son intensas y los lahares son frecuentes. En condiciones hidrofóbicas, se inhibe la infiltración y se facilita la escorrentía en descargas más altas que tienen más probabilidades de iniciar lahares.
- Sulpizio et al., 2010. Predicting the block-and-ash flow inundation areas at Volcán de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February 2010) status. → Se presentan mapas en áreas potencialmente afectadas por flujos de bloques y cenizas y nubes de ceniza. En programas como TITAN2D se hacen simulaciones para delimitar la posible área inundada por flujos piroclásticos. Los resultados de estas se analizan mediante dos mapas que describen el espesor total de los depósitos finales, los cuales representan herramientas útiles para manejar el peligro actual de flujo de bloques y cenizas en el Volcán de Colima.
- Franco-Ramos et al., 2013. Spatio-temporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima volcano, Mexico – A dendrogeomorphic approach → Los registros históricos de lahar son típicamente escasos en ambientes volcánicos, aún más si ocurren fuera de los asentamientos humanos. En los volcanes boscosos, los lahares pueden dañar significativamente los árboles a lo largo de sus trayectos de flujo. Este estudio se basa en alteraciones del crecimiento en árboles afectados por lahares; en él se evalúa el potencial de las técnicas dendrogeomórficas en la investigación de lahar y se analiza la

frecuencia temporal y los patrones espaciales de los lahares en las barrancas Montegrande y La Arena, dos de las más activas en el sector sur del Volcán de Colima. A pesar de los pocos datos meteorológicos en los sitios de estudio, los lahares reconstruidos apuntan a fuertes lluvias después de la actividad explosiva como el principal impulsor de los eventos.

- Vázquez et al., 2014. The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcán de Colima, Mexico. → En el Volcán de Colima los lahares son un fenómeno común; desde la reactivación volcánica en el año 1991, se ha incrementado la formación de lahares durante la temporada de lluvia de junio a octubre. En el año 2011 se construyó una estación de monitoreo a 2000 msnm. a lo largo de la barranca Montegrande, la cual transmite en tiempo real a las instalaciones de RESCO en la Universidad de Colima. Esto permitió monitorear y describir el lahar que ocurrió el 15 de septiembre de 2012 y correlacionar los datos de monitoreo con la información recopilada en campo. La calidad de los datos permitió describir la anatomía de este lahar, y así tener una mejor comprensión de las características de texturales de los depósitos.
- Caballero et al., 2016. Evaluating the Performance of FLO-2D for Simulating Past Lahar Events at the Most Active Mexican Volcanoes: Popocatepetl and Volcán de Colima → Dos eventos de lahar que ocurrieron en los volcanes Colima y Popocatepetl se modelan utilizando código FLO-2D; el Lahar Patrio en el Volcán de Colima se utilizó para evaluar el desempeño del modelo relacionado con la influencia de la forma del hidrograma de entrada y el valor de Manning en ausencia de datos reales. El lahar del Popocatepetl en el año 2001 se utilizó para evaluar la respuesta del modelo a los lahares con diferentes comportamientos reológicos. Al realizar una evaluación adecuada de las incertidumbres de los parámetros de entrada, los resultados obtenidos con FLO-2D pueden ser muy útiles para la evaluación del peligro de lahar.
- Walter et al., 2018. Localized and distributed erosion triggered by the 2015 Hurricane Patricia investigated by repeated drone surveys and time lapse cameras at Volcán de Colima, Mexico → En octubre del año 2015, Patricia, uno de los principales huracanes de categoría 5, tocó tierra en el oeste de México, lo

que resultó en una lluvia acumulada de 500 mm y la generación de lahar a lo largo de la barranca Montegrande del Volcán de Colima. En este estudio se realizó un monitoreo de la formación del lahar y la erosión usando cámaras y sobrevuelos de drones dos días antes y después del huracán. Además, este estudio muestra que el monitoreo de la cámara es muy útil para estudiar la relación entre la evolución del paisaje volcánico y los eventos hidrometeorológicos extremos para la evaluación rápida asociada con eventos de lahar.

- Capra et al., 2018. Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall-runoff modeling, seismic and video monitoring → El Volcán de Colima se ve comúnmente afectado por las lluvias tropicales relacionadas con los huracanes que se forman sobre el Océano Pacífico. En los años 2011, 2013 y 2015, los huracanes Jova, Manuel y Patricia desencadenaron tormentas tropicales que depositaron hasta 400 mm de lluvia en 36 horas. Los efectos fueron devastadores, con la formación de múltiples lahares a lo largo de las barrancas La Lumbre y Montegrande, que son los canales más activos en la entrega de sedimentos en el flanco suroeste del volcán. El resultado tiene implicaciones importantes para la evaluación de riesgos durante eventos hidrometeorológicos extremos, ya que podría ayudar a proporcionar alertas en tiempo real.

## 6. Marco teórico

- Amenaza → Según la Ley 1523 del 2012, decretada por el Congreso de Colombia, la amenaza está definida como el peligro de que un evento físico de origen natural, o causado por la acción humana de forma accidental, se presente de una magnitud suficiente para que logre causar pérdidas, lesiones u otros impactos en los seres humanos, bienes, infraestructura, medios de sustento, prestación de servicios y recursos ambientales.
- Anticiclones → Es un sistema circulatorio que se produce por grandes masas de aire que descienden y forman un centro de alta presión; el aire que desciende

se calienta y la humedad relativa disminuye, esto puede desencadenar largas temporadas calurosas, produciendo incluso sequías durante los meses del verano. Son mucho más extensos que los ciclones tropicales (Andrades y Múñez, 2012).

- Barranca → Este término hace referencia a las cárcavas formadas en las temporadas de lluvia intensa debido a la poca compactación de los suelos, estas, a su vez, se transforman en canales de varios metros de profundidad, con paredes verticales y alta susceptibilidad a ser erosionados (Torres et al., 2006); por estas barrancas fluyen los lahares hacia las partes bajas del volcán.
- Ciclón tropical → Es un sistema circulatorio organizado por nubes y tormentas que se produce sobre aguas tropicales o subtropicales, y tiene un centro de circulación cerrado en los niveles bajos de la atmósfera (NOAA, 2013). El ciclón tropical presenta varias categorías dependiendo de su intensidad, entre ellos se encuentra el huracán.
  - Huracán → Este se ubica en la categoría más severa, el cual supera vientos de más de 119 km/h. La escala de huracanes Saffir-Simpson define la fuerza del huracán por categorías, una tormenta de categoría 1 es el huracán más débil y uno de categoría 5 es el más fuerte (NOAA, 1999).
- Evento de lluvia → Los eventos de lluvia se pueden clasificar por su dimensión, la cual depende de varias características (Breugem et al., 2020), entre las cuales las principales son la cantidad de lluvia acumulada durante el evento, duración, intensidad promedio e intensidad máxima:
  - Lluvia acumulada: Este término se refiere a la cantidad de lluvia que cae durante un evento y se expresa en mm (Dunkerley, 2008).
  - Duración: Este es uno de los principales factores que controlan las inundaciones, se expresa en horas y puede tener una gran variabilidad, ya que hay eventos que duran más de un día, mientras que muchos duran menos de una hora (Dunkerley, 2008).
  - Intensidad promedio: Esta característica se considera como la más utilizada para definir un evento de lluvia. La intensidad promedio se define como la relación entre la lluvia total o lluvia acumulada y la duración del evento, y se

expresa en mm/hora. Durante un evento pueden ocurrir variaciones considerables en la intensidad, por lo que es necesario también estimar la intensidad máxima (Dunkerley, 2008).

- Intensidad máxima: También llamada como intensidad instantánea, es el pico de intensidad que se alcanza en un evento, teniendo en cuenta intervalos de tiempo determinado (Breugem et al., 2020), para este trabajo el rango utilizado fue de 5 minutos.
- Faja subtropical de alta presión → Es un cinturón de alta presión situado alrededor de las latitudes 25 y 35°, donde se originan vientos Alisios. En este cinturón se produce subsidencia y divergencia en superficie, y los gradientes de presión son muy débiles, razón por la cual los vientos son variables (Inzunza, 2019).
- Inundación → Son fenómenos que se generan en respuesta a entornos meteorológicos relacionados con precipitaciones, ya sea directa o indirectamente (Barclay et al., 2007). Este fenómeno tiene un fuerte impacto en el medio ambiente y en la sociedad, por esta razón es necesario comprender sus causas desde parámetros climáticos (Breugem et al., 2020).
- Lahar → Son los flujos constituidos por una mezcla de fragmentos volcánicos y agua, que fluyen a lo largo de las laderas de los volcanes. La redistribución del sedimento volcánico puede continuar durante meses o años después de una erupción, y los lahares tienen la capacidad de destruir o inundar estructuras preexistentes (Barclay et al., 2007). Dependiendo de la relación entre agua y sedimento, se clasifican en flujos hiperconcentrados (20-60% en peso de sedimento) y flujos de escombros (60-90% en peso de sedimento). Por concentraciones de sedimentos inferior al 20% se definen corrientes fluviales (streamflow) (Costa, 1984).
- Lluvia orográfica → Este tipo de precipitaciones también es conocido como lluvia local o estacionaria y están relacionadas a las partes altas de las laderas de más de 1200 m de altitud (Lavigne et al., 2000).
- Mapa de amenaza por inundación → Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estos mapas de amenaza son la

herramienta primordial para brindar información gráfica de la posible inundación ante uno o varios eventos probables en una zona determinada.

- Modelado numérico → Un modelado es una representación simplificada de la naturaleza; los modelados numéricos basan esta representación en datos matemáticos, estadísticos y ecuaciones, con el fin de simular un determinado sistema (Anderson et al., 2015). Para este trabajo, las simulaciones a partir de modelados numéricos se realizaron para definir zonas de inundación a daños a infraestructura.
- Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) → Esta zona se define como la franja en donde se manifiesta la confluencia entre vientos de los hemisferios norte y sur. En la ZCIT los vientos Alisios del noreste, originados alrededor del Atlántico Norte, se reúnen con los vientos Alisios del sureste, formados en el Pacífico sur y Atlántico sur. Debido a este flujo convergente, la ZCIT es la zona de máxima nubosidad y lluvia (CIOH, 2020).

## 7. Marco general

### 7.1. Características climáticas

La Republica de México se encuentra entre latitudes  $32^{\circ} 43' 06''$  N y  $14^{\circ} 32' 27''$  S, cuenta con una gran variedad de climas, razón por la cual presenta diversos eventos atmosféricos y meteorológicos que afectan la precipitación (Méndez et al., 2007).

La parte norte de México se encuentra ubicada en la faja subtropical de alta presión, a lo largo del cual están los anticiclones oceánicos del Atlántico y Pacífico Norte, los cuales se caracterizan por presentar un clima árido y semiárido, y hacia el sur un clima húmedo y semihúmedo, el cual está influenciado por los vientos alisios (García, 2003).

Las variaciones anuales en la precipitación del territorio mexicano se ven afectadas por el desplazamiento hacia el norte o hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT): en invierno la zona de convergencia se desplaza hacia el sur, donde solo actúan los vientos alisios, mientras que el norte tiene influencia de los

vientos del oeste. En verano la zona de convergencia se desplaza hacia el norte, por lo que domina un sistema de vientos del este o sureste que provienen del centro subtropical de alta presión del Atlántico (García, 2003).

La precipitación también se ve afectada por la influencia de los ciclones que se originan por las ondas del este y producen gran parte de la precipitación en el verano y principios del otoño, representados por los meses de septiembre y octubre (ciclones del Pacífico). En invierno, las depresiones ciclónicas están asociadas a los vientos del oeste de las latitudes medias que atraviesan la parte norte de México. La mayor parte del país presenta altas precipitaciones en la mitad del año, es decir, de mayo a octubre (García, 2003).

Generalmente, la temporada de lluvia en México inicia en mayo y termina en noviembre, esto puede variar en los diferentes Estados de la República, y puede estar asociada a los ciclones tropicales. Pero además de estos, también se encuentra asociada a los patrones estacionales de circulación atmosférica, como el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, la ubicación de sistemas de alta presión y efectos locales de contraste térmico, los cuales definen el inicio de la temporada de lluvia en cada región. Los máximos valores puntuales de lluvia a nivel nacional, de mayo a septiembre, son debido a sistemas tropicales, incluyendo ciclones tropicales, ondas tropicales, sistemas de bajas presiones, etc. En el último trimestre del año, de octubre a diciembre, los sistemas frontales son nuevamente los principales generadores de lluvias. Siendo octubre y noviembre los picos más altos de precipitación (Comisión Nacional del Agua, CNA), como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Distribución de precipitación anual en la República de México. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CNA. <http://smm.cna.gob.mx/>.

Desde un enfoque local, CONAGUA cuenta con una red de estaciones climatológicas a nivel nacional, de las cuales, para el presente trabajo, se tuvieron en cuenta la estación 14118 – Quito y la estación 14129 – San Marcos; ubicadas al suroeste del país en el estado de Jalisco, donde la estación 14129 se encuentra en en la población de San Marcos (zona de estudio), y la estación 14118 a unos 10 Km de la anterior (Figura 4).

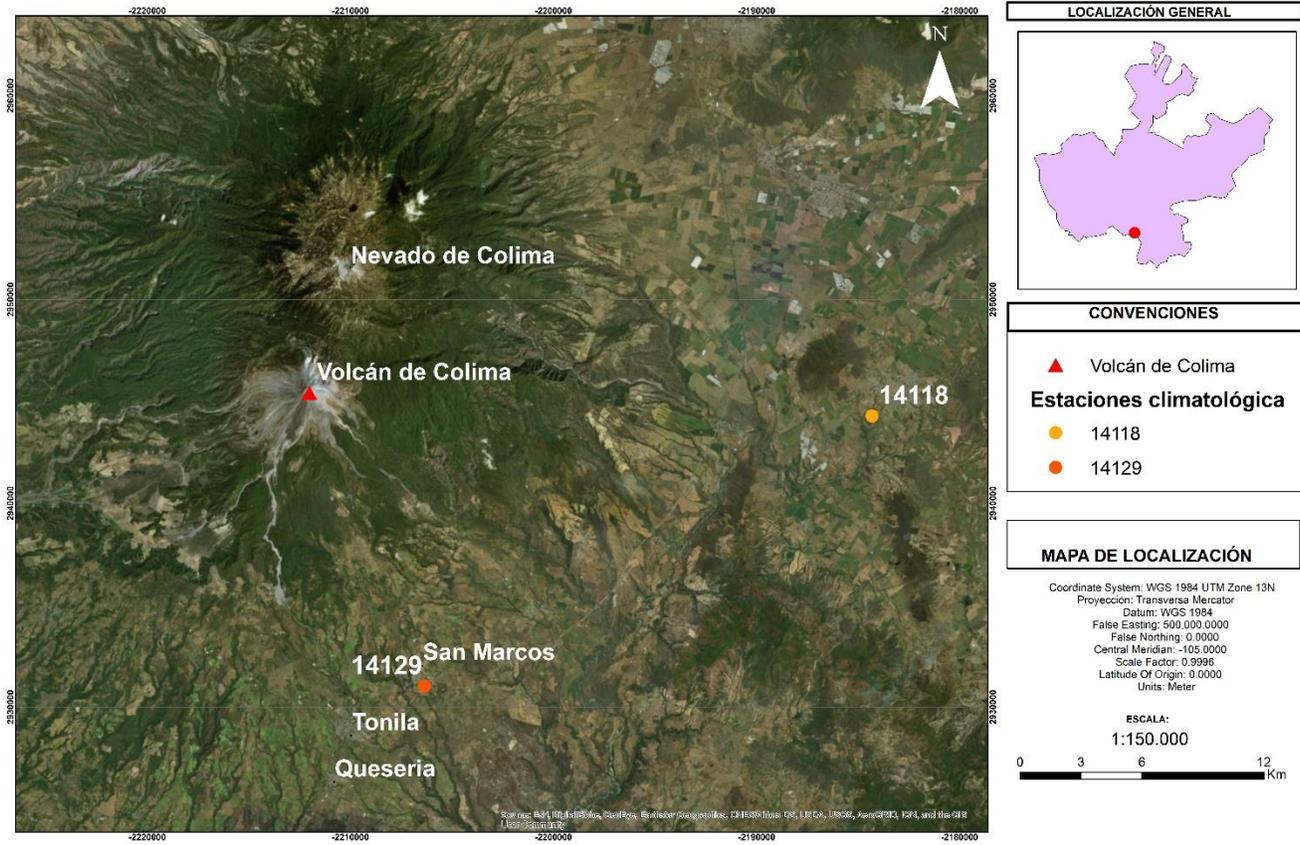


Figura 4. Mapa de estaciones climatológicas en el estado de Jalisco, México.

El estado de Jalisco posee una gran diversidad de clima debido a las variaciones de altura que presenta en distancias relativamente cortas (Cruz, 2014). El 46% de su superficie presenta un clima semicálido a subhúmedo, un 25% cálido a subhúmedo y el porcentaje restante presenta un clima seco a templado. La precipitación total anual media del Estado es alrededor de 850 a 1000 mm anuales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI) (Figura 5).

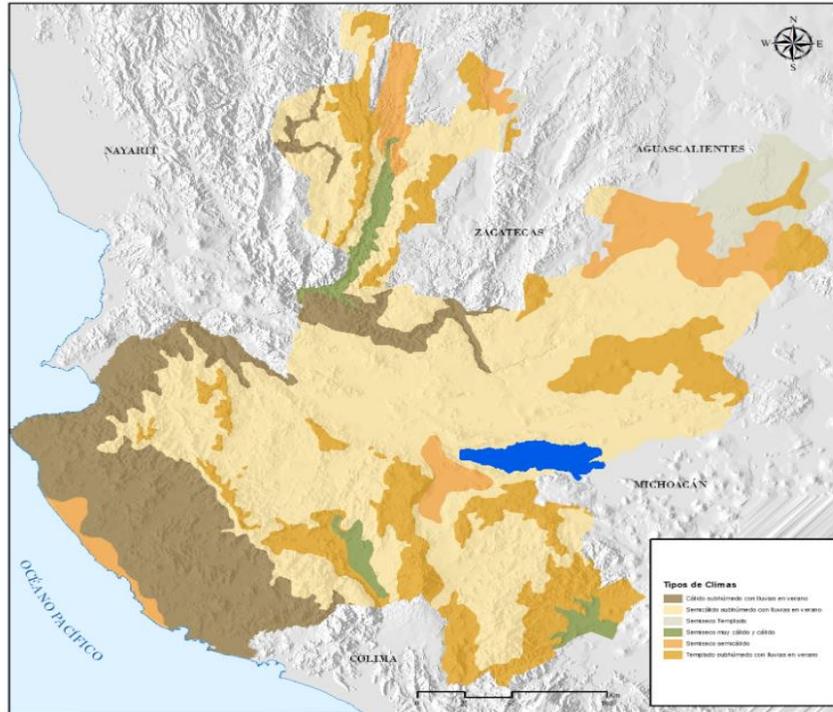


Figura 5. Variedad de climas en el estado de Jalisco a escala 1:1'000.000. Tomado de Carta de climas INEGI <https://www.inegi.org.mx/>.

Según las estadísticas presentadas por CONAGUA, las estaciones climatológicas muestran que los meses de mayor precipitación son enero, septiembre y octubre, siendo septiembre el que presenta mayor promedio de precipitación (Figuras 6 y 7).

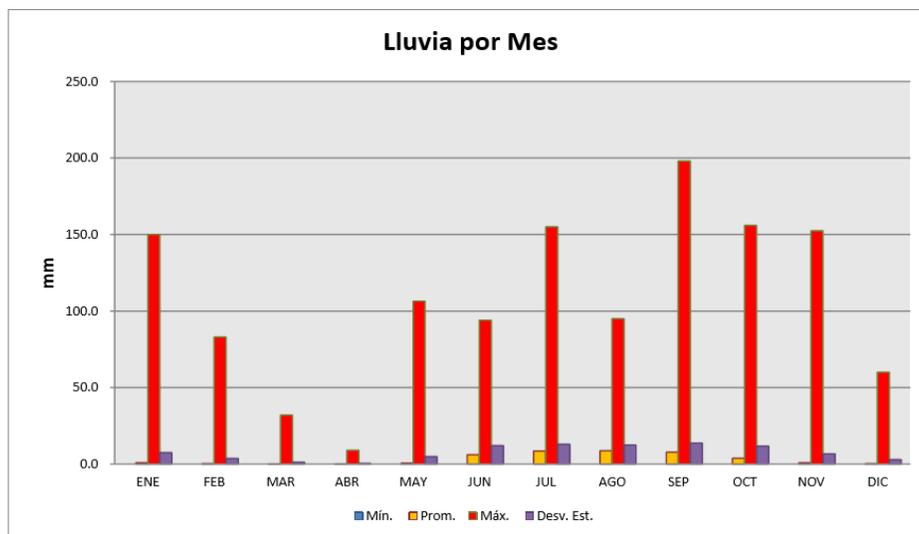


Figura 6. Distribución del promedio de precipitación mensual en la estación 14129. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <http://smm.cna.gob.mx/>.

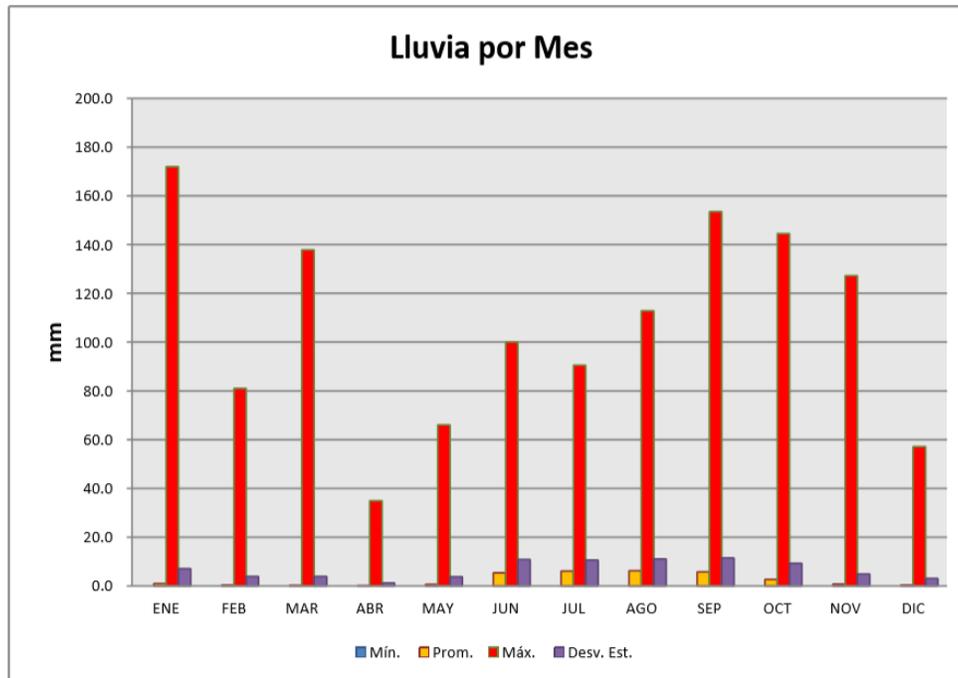


Figura 7. Distribución del promedio de precipitación mensual en la estación 14118. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <http://smm.cna.gob.mx/>.

Según Salazar et al. (2010), las fuertes lluvias en estos meses pueden ser ocasionadas por los vientos alisios que dominan durante el verano, lo cual se puede evidenciar en la estación climatológica 14129, como se muestra en la figura 8, en donde se graficaron las precipitaciones promedio y máxima por estación del año, basadas en un promedio mensual entre los años 1960 y 2019 (CONAGUA, 2020); los datos máximos que se registran a partir de este promedio son durante el verano, con 8.6 mm de precipitación promedio y 198 mm como valor máximo. Esto se debe a que los vientos alisios introducen una gran cantidad de humedad al pasar por las cálidas aguas del Golfo de México; además, el aumento de lluvia en el verano puede estar asociado a los ciclones tropicales que, por la influencia monzónica proveniente de los océanos Pacífico y Atlántico, invaden el territorio de México, produciendo vientos destructivos y lluvias torrenciales (Salazar et al., 2010).

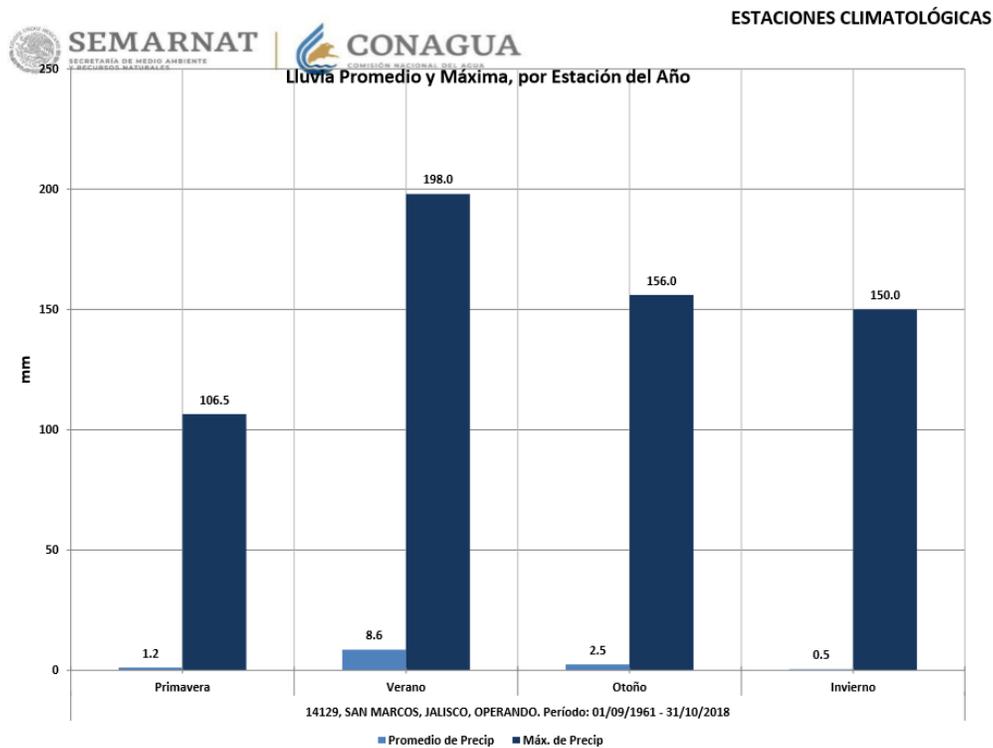


Figura 8. Distribución del promedio de precipitación por estación del año en la estación 14129. Tomado de Comisión Nacional del Agua, CONAGUA <http://smm.cna.gob.mx/>.

Los ciclones tropicales que se mencionaron anteriormente son sistemas de circulación que se desarrollan sobre aguas tropicales y subtropicales (Anthes, 1982), mismo. En México, la temporada de ciclones en el Océano Pacífico comienza en el mes de mayo, mientras que, en el Océano Atlántico, comienza en junio. Para ambos océanos la actividad concluye a finales de noviembre (CENAPRED, 2019).

De manera directa o indirecta los huracanes que afectan a México se dividen en cuatro zonas, identificadas y descritas por Luna (1979), teniendo en cuenta el lugar de origen e intensidad, la cual va aumentando a lo largo de la temporada. La primera zona es la del Golfo de Tehuantepec, esta se activa en la última semana de mayo, marcando el inicio de la temporada de lluvias en México, los primeros fenómenos viajan hacia el oeste, alejándose de las costas nacionales, mientras que los fenómenos formados de julio en adelante presentan mayor potencia, estos viajan

paralelos a la costa, llegando a tierra y afectando estados con lluvias torrenciales, como las costas de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco.

La segunda zona surge en el suroeste del Golfo de México, en la Sonda de Campeche, que se caracteriza por sus cálidas aguas. Esta se activa en la primera semana de junio, produciendo lluvias que van paralelas al litoral Veracruzano, las cuales se van intensificando gradualmente hasta que, en julio, alcanzan un desarrollo definitivo.

La tercera zona se encuentra en el Caribe Oriental, se activa en el mes de julio, donde se forman huracanes de gran recorrido y potencia, estos alcanzan su máxima fuerza en los meses de agosto, septiembre y octubre, llegando a cruzar la península de Yucatán y afectando los estados de Tamaulipas y Veracruz.

Finalmente, la cuarta zona se activa en una porción atlántica, al sur de la isla de Cabo Verde y ocurre a finales de julio, más comúnmente en agosto. En esta zona se forman huracanes de mayor recorrido y potencia, logrando atravesar el caribe y penetrando en el Golfo de México, donde se comportan de manera parecida a los originados en la tercera zona.

En la figura 9 se evidencian estas cuatro regiones, en donde se originan huracanes y pueden afectar, de manera directa o indirecta, a México.

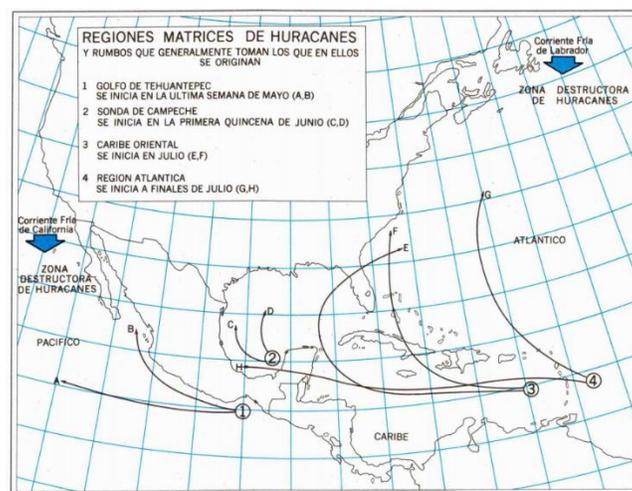


Figura 9. Zonas que afectan a México, en las cuales se producen huracanes, y rutas que estos, generalmente, recorren. Tomado de Atlas de Huracanes, Secretaría de Programación y Presupuesto, INEGI <http://contenidos.inegi.org.mx/contenidos/>.

Los asentamientos humanos cercanos a las costas se encuentran altamente expuestos a las perturbaciones de ciclones tropicales. Se ha determinado que, en México, entre mayo y noviembre, se presenta un promedio de 25 ciclones anuales con vientos mayores a 63 Km/h, de los cuales 15 ocurren en el Océano Pacífico y 10 en el Atlántico; cada año cuatro ciclones, dos del Pacífico y dos del Atlántico, llegan a menos de 100 km del territorio nacional (Patiño et al., 2009).

En los estados de Colima y Jalisco, por su ubicación geográfica, anualmente el 51% de la población puede verse afectada por la presencia de un ciclón (CENAPRED, 2001). Recientemente, estos estados fueron golpeado por varios eventos ciclónicos de gran importancia: Jova se desarrolló del 6 al 12 de septiembre del 2011, su máxima intensidad fue categoría 3, se presentó sobre el Pacífico nororiental y el sur de México, fue un huracán cuya trayectoria inició a más de 1000 km al sur de la costa de Colima, de ahí se desplazó hacia el noroeste y cambió de dirección con rumbo a la costa occidental de México, impactó al sur de la población de La Fortuna, Jalisco, donde presentó vientos sostenidos de 160 km/h y rachas de 195 km/h (Pérez et al., 2016).

El huracán Manuel se desarrolló del 13 al 19 de septiembre del 2013, este huracán no fue muy intenso (categoría 1), pero aportó gran cantidad de humedad al país (Pérez et al., 2016). Manuel tocó tierra en las cercanías del puerto de Manzanillo, Colima, con vientos sostenidos de 100 km/h y rachas de 130 km/h. A pesar de que iba perdiendo fuerza a medida que entraba al continente, la tormenta tropical provocó lluvias intensas en los estados de Jalisco (Rodríguez, 2017).

El huracán Patricia se desarrolló del 22 al 24 de octubre del 2015. Es el huracán más reciente que impactó a Jalisco, con categoría 5. Impactó cerca de la Bahía Tenacatita, Cuestecomate y Barra de Navidad, Jalisco. Ocasionó actividad convectiva intensa en la costa de Colima y Jalisco, y produjo lluvias torrenciales con tormentas eléctricas severas (Pérez et al., 2016).

## 7.2. Características topográficas

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México presenta una gran variedad de formas de relieve, que lo convierte en uno de los países con mayores características y diversidad topográfica. Este es el resultado de la compleja historia geológica que ha ido conformando un variado relieve continental, el cual, a la fecha, sigue modificándose (SEMARNAT, 2010).

Existen también cordilleras que corresponden a levantamientos y plegamientos de diversas orogenias; en la península de Baja California, el principal sistema montañoso es la Sierra de Juárez, prolongación de las sierras Nevada y Cascada de California. Otro de los rasgos más distintivos de la orografía de México es el Cinturón Volcánico Transmexicano, el cual está compuesto por volcanes que siguen un sistema de fallas en dirección W-E; en él se encuentran más de 3000 volcanes, algunos de esto formados recientemente como el Parícutín, y otros más antiguos pero que se mantienen activos, como el Volcán de Colima, en Jalisco (Gómez et al., 2005; Ferrari et al., 2005).

El estado de Jalisco presenta una topografía caracterizada por el predominio de montañas y la ausencia de extensas llanuras. Jalisco es la zona de contacto entre la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana. La elevación máxima que presenta el estado es la del Volcán Nevado de Colima con una altura de 4255 msnm, seguido del Volcán de Colima con 3860 msnm (Norini et al., 2010).

A nivel local, la zona de estudio de este trabajo hace parte del denominado Bloque Jalisco (Suárez et al., 1994; Cortés, 2005), delimitado al este por el Rift de Colima o Graben de Colima que esta seccionado por otros pequeños grabens o fosas tectónicas menores, y al norte, por la trinchera mesoamericana, que se caracteriza por presentar una topografía irregular con muchas ondulaciones, sin una configuración bien definida (SEMADET, 2020). La geomorfología de esta área está compuesta por el Volcán de Colima, que presenta la forma de cono con pendientes que varían entre 40 y 35° en la parte superior y presentan sistemas fluviales que drenan las laderas del volcán, atraviesan gran parte del municipio de Tonila y

desembocan en las márgenes del río Tuxpan. En las laderas inferiores del volcán se presentan pendientes menores a 25°, dando como resultado una red hidrológica radial subdendrítica en barrancos someros y con un ancho aproximado de 6 a 15 m, los cuales descienden del volcán y, algunas veces, se encuentran interrumpidos por antiguos flujos de lava que forman pequeñas rampas o escaleras de hasta 30 m de altura (Capra et al., 2010).

### 7.3. Volcán de Colima

El Volcán de Colima, uno de los más activos del país (Cortés et al., 2005; Capra et al., 2018), es un estratovolcán de composición andesítica ubicado en el límite entre los estados de Jalisco (municipios de Tuxpan, Zapotitlán y Tonila) y Colima (municipios de Comala y Cuauhtémoc), en México. Sus coordenadas geográficas son 19° 30' 44" N y 103° 37' 02" W, y se encuentra a 3860 msnm; hace parte del Complejo Volcánico de Colima (CVC), junto con el volcán el Cántaro y el Nevado de Colima. Este complejo está ubicado en el sector occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) (Macías, 2005).

A lo largo de los últimos 500 años, el Volcán de Colima ha presentado actividad explosiva con más de 30 erupciones, de las cuales las más estudiadas en la actualidad han sido las de 1991, 1994, 1997 – 1999, 2001 – 2003, 2004 – 2005, 2007 – 2011 y 2013 – 2014, las cuales se han caracterizado por el crecimiento de domos de lava, que generan flujos de lava, desprendimiento de rocas y flujos piroclásticos; estos períodos han sido seguidos por la ocurrencia de explosiones vulcanianas que destruyen los domo previamente formados (Arámbula et al., 2018). Eso demuestra que el volcán ha mantenido su proceso eruptivo a lo largo de los últimos siglos y, debido también a su actividad actual, es necesario seguir realizando estudios sobre su peligrosidad y el riesgo que representa en las poblaciones aledañas.

Actualmente, existen varias poblaciones vulnerables, tanto en el estado de Jalisco como de Colima, ante una posible erupción del volcán, en donde los flujos

piroclásticos, la caída de cenizas y los lahares podrían afectar en primera instancia las poblaciones de Tonila, San Marcos y El Fresnal, entre otros (Capra et al., 2015).

Según el Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos de la Universidad de Colima (CUEIV), el monitoreo de este volcán es llevado a cabo por diferentes entidades, en las que se encuentra la Red Sísmica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO), la Facultad de Ciencias de la Universidad de Colima, el CUEIV, los Sistemas Estatales de Protección Civil de los Estados de Jalisco y Colima, y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Los lahares inducidos por lluvia han sido muy frecuentes en el Volcán de Colima, las estaciones instaladas en las barrancas registran eventos en el periodo en que las lluvias son intensas (de junio a octubre). A partir de análisis espacial y temporal con imágenes satelitales, se ha determinado que los lahares tienen lugar en cinco barrancas principales, de oeste a este: La Lumbre, Cordobán, San Antonio, Montegrande y La Arena (Ver anexo 10). Los lahares han alcanzado distancias de hasta 15 km y profundidades de flujo de 1.5 a 2 m, determinadas por los límites de los canales (Figura 10) y por las marcas de agua y lodo en los árboles (Capra et al., 2010).



Figura 10. Se observa el flujo en una de las barrancas y la profundidad de los canales determinada por el límite del canal.

#### 7.4. Modelo FLO-2D

Actualmente, existen diferentes modelos de simulación para delimitar zonas de inundación por lahares, los más utilizados en los últimos años son Titan-2D (Williams et al., 2008), LaharZ (Schilling, 1998) y FLO-2D (O'Brien et al., 1993). El código LaharZ es un modelo semi-empírico que se basa en el estudio de eventos conocidos, de los cuales se obtiene la relación entre el volumen del flujo y el área de inundación (Dávila et al., 2007). El código no permite simular flujos con diferentes características (relación entre agua y sedimento) y no permite estimar velocidades de flujo, así como profundidades máximas. El código Titan-2D ha sido diseñado para la simulación de flujos granulares secos (como flujos piroclásticos) y su adaptación para la simulación de flujos granulares de dos fases (agua más sedimentos) no ha sido muy utilizada ya que no permite variar con el tiempo la concentración del sedimento y tampoco considera las características reológicas de la fase fluida. Para este trabajo se utilizó el programa FLO-2D, debido a que este permite modificar las características reológicas de los flujos, así como la concentración de sedimentos y su variación espacio-temporal, lo cual permite una mayor confiabilidad en la definición de las zonas de inundación, así como el cálculo de la profundidad y de la velocidad del flujo (Caballero y Capra, 2014).

El software FLO-2D es un modelo numérico bidimensional que permite simular flujos en topografías complejas y el movimiento de fluidos no-newtonianos como flujos hiper concentrados y flujos de escombros (Zaragoza et al., 2020). Este modelo matemático trabaja con la integración de la ecuación diferencial de continuidad (ecuación 1) y la ecuación de movimiento (O'Brien, 2009) (ecuación 2):

$$i = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

en donde,  $i$  es la intensidad de la lluvia,  $S$  es la pendiente,  $h$  es la profundidad hidráulica,  $t$  es el tiempo,  $V$  es la velocidad,  $x$  y  $y$  son las dimensiones longitudinal y transversal del flujo y  $g$  es la gravedad. Estas ecuaciones son las que permiten

simular la trayectoria, el área de inundación, las profundidades y la velocidad del flujo (Zaragoza et al., 2020). Además, para calibrar el modelo FLO-2D se requieren parámetros como modelo digital de elevación (DEM), hidrograma de entrada, rugosidad de la superficie dada por el coeficiente de Manning, reología (límite plástico y viscosidad), número de Froude y concentración de sedimentos, los cuales permiten realizar simulaciones que más se acercan más al fenómeno natural.

## **8. Metodología**

### **8.1. Análisis de lluvias y cuencas hidrográficas**

En esta investigación se trabajó con una base de datos inicial que consiste en los datos registrados por dos estaciones de lluvia instaladas a lo largo de la barranca de Montegrande, en flanco sur del Volcán de Colima; los datos se extrajeron mediante el programa HOBOWare. De la base de datos se analizaron los eventos que acumulan más de 10 mm, umbral mínimo al cual se asocia la posible ocurrencia de un lahar (Lavigne et al., 2000; Capra et al., 2010). Si a lo largo de un día se registra más de un evento, estos deben ser separados en caso de haber más de una hora sin registro de lluvia (Breugem et al., 2020). De esta manera, se organizaron los datos en una tabla de Excel con sus respectivas fechas y horas exactas de inicio y fin. Para estos eventos se realizaron cálculos de lluvia acumulada (mm), duración (horas), intensidad promedio (mm/hora) y R3, que corresponde al valor de lluvia acumulada durante los tres días anteriores al evento que está siendo analizado; además, se determinó la intensidad máxima calculada en una venta de tiempo de 5 minutos, mediante el programa DISRAINS (Borselli, 2005). Posterior a esto, se construyó una tabla resumen en donde se puedan visualizar de manera más efectiva los eventos de lluvia ocurridos durante el año (Tabla 1) y se pueda hacer una correlación con los lahares ocurridos durante este mismo periodo, los cuales son obtenidos mediante señales sísmicas.

Tabla 1. Ejemplo de la tabla resumen en donde se visualizan fácilmente los datos de fecha, horas de inicio y fin, lluvia acumulada, duración, intensidad promedio, R3 e intensidad máxima.

| Fecha      | Hora inicio | Hora fin | Lluvia acumulada R (mm) | Duración (horas) | Intensidad promedio (mm/hora) | R3 (mm) | Intensidad máxima |
|------------|-------------|----------|-------------------------|------------------|-------------------------------|---------|-------------------|
| 27/01/2018 | 15:04:31    | 17:05:37 | 32.2                    | 2.02             | 15.94                         | 3.00    | 60.8016           |
| 7/05/2018  | 3:40:32     | 7:13:29  | 30.6                    | 3.3332           | 9.18                          | 10.00   | 82.4025           |
| 10/05/2018 | 20:22:31    | 21:45:56 | 13.8                    | 0.6666           | 20.70                         | 14.60   | 90.00             |
| 17/06/2018 | 16:37:12    | 18:47:35 | 14.2                    | 1.4167           | 10.02                         | 16.20   | 27.2003           |
| 18/06/2018 | 0:01:14     | 5:31:17  | 38.6                    | 5.50             | 7.02                          | 40.20   | 56.0014           |
| 23/06/2018 | 17:48:29    | 19:54:25 | 18.2                    | 1.25             | 14.56                         | 6.80    | 102.86            |
| 28/06/2018 | 19:50:06    | 22:15:23 | 11                      | 2.1666           | 5.08                          | 13.60   | 28.80             |
| 5/07/2018  | 18:26:14    | 19:15:46 | 11.6                    | 0.5833           | 19.89                         | 1.60    | 39.2008           |

Para cada evento de lluvia que coincidió con la generación de un lahar, se calcularon las curvas de descarga de la cuenca alta de la barranca La Arena a partir de la cual se puede estimar la curva de descarga del lahar con una concentración de sedimentos del 0.5%; valor localizado en el límite entre un flujo hyperconcentrado y un flujo de escombros, y usado anteriormente para los lahares estudiados en el Volcán de Colima (Caballero et al., 2016). En particular, se utilizó la curva de distribución de la lluvia para aproximar la curva de descarga de la cuenca (Charbonnier et al., 2017). Estos datos son utilizados en las simulaciones de lahares que se realizaron con el programa FLO-2D (O'Brien et al., 1993), en donde se tiene la posibilidad de simular diferentes escenarios con diferentes volúmenes y reologías (contenido de sedimentos, viscosidad y límite plástico) (Caballero et al., 2016).

Con los datos anteriormente procesados, se realizaron simulaciones numéricas para definir las zonas susceptibles a inundación en la población de San Marcos, y así estimar los posibles daños a la infraestructura.

Para realizar las simulaciones, se debe primero hacer un análisis morfométrico de la cuenca en el área de interés, con el fin de determinar la zona de alimentación, en donde dominan procesos erosivos, la red de drenaje principal y el punto que separa la zona de alimentación del área de inundación, que generalmente corresponde a un importante quiebre en la pendiente y en donde los drenajes secundarios se

juntan en el canal principal. Este análisis se realizó a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12.5 m (datos Alos Palsar). Posteriormente con este mismo DEM, convertido en puntos mediante la herramienta Raster to Point, se comienza el proyecto en el programa FLO-2D que, como se mencionó anteriormente, es donde se realizan los modelados numéricos para la simulación de lahares.

## 8.2. Simulación de lahares con el programa FLO-2D

Para determinar el valor de los parámetros que requiere el modelo, se utilizó el DEM anteriormente mencionado, el hidrograma de entrada basado en el análisis de lluvias descrito en la sección anterior, y la rugosidad de la superficie (n-Manning), las características reológicas (límite plástico y viscosidad), el número de Froude y la concentración de sedimentos, se determinaron a partir de las relaciones empíricas de O'Brien y Julien (1988) para flujos laminares, en donde los valores utilizados fueron:

| <i>Parámetro</i>            |                 | <i>Valor</i>                     |
|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Rugosidad (n-Manning)       |                 | 0.065                            |
| Reología                    | Límite plástico | $\alpha = 0.0765$ $\beta = 16.9$ |
|                             | Viscosidad      | $\alpha = 0.0648$ $\beta = 6.20$ |
| Número de Froude            |                 | 0.9                              |
| Concentración de sedimentos |                 | 0 – 0.55                         |

El primer paso en este programa consta en cargar un nuevo proyecto mediante un shapefile existente, para el cual se debe utilizar el DEM de puntos; después se crea una malla con tamaño de celda de 10 m mediante la herramienta Grid, este valor se escogió teniendo en cuenta el tamaño de celda del DEM utilizado (Figura 11).

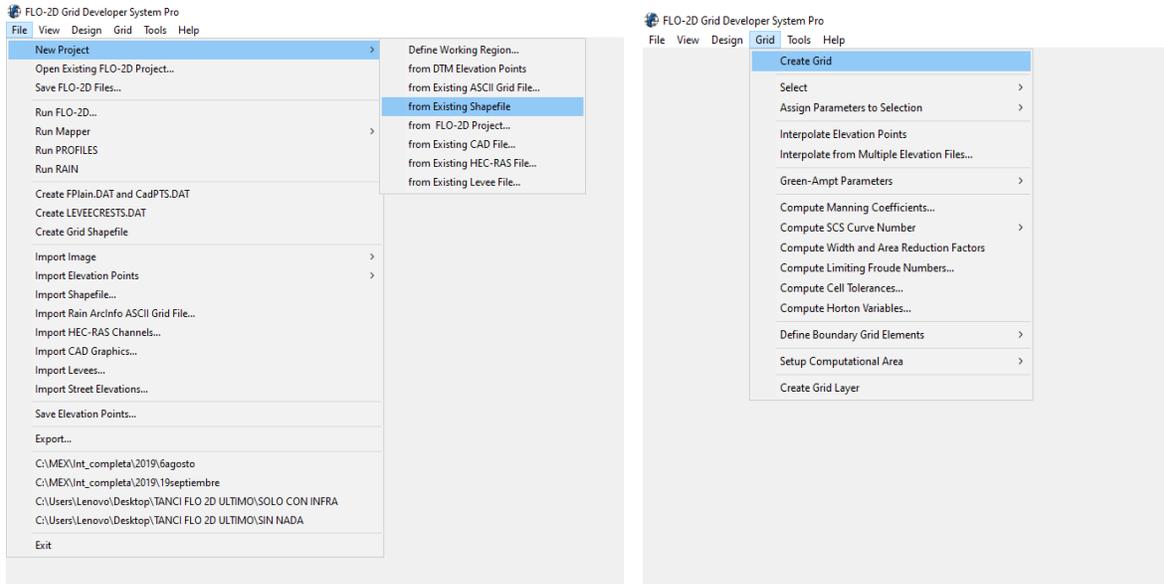


Figura 11.. Herramientas utilizadas para cargar el proyecto en el programa FLO-2D.

A continuación, se debe seleccionar el área computacional, importando el shapefile de la cuenca con el uso de las herramientas File e Import Shapefile, esta área será el límite a partir del cual el programa generará las simulaciones y se realiza mediante la herramienta Grid, la opción Setup Computational Area, seguido de Define Modeling Boundary from Shapefile, y la selección de la cuenca que se importó anteriormente (Figura 12).

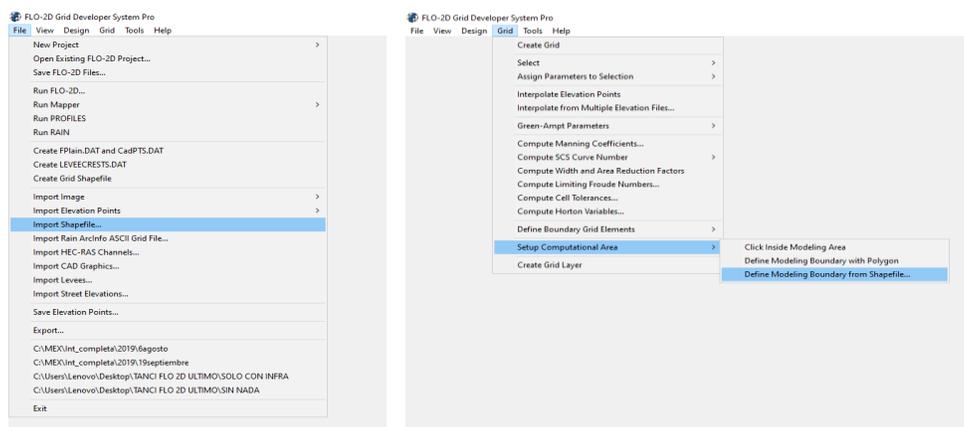


Figura 12. Herramientas utilizadas para seleccionar el área computacional en el programa FLO-2D.

El siguiente paso a realizar es la interpolación de las elevaciones con la herramienta Grid y la opción Interpolate Elevation Points, para que la malla computacional tenga el valor de altitud del terreno. Seguido de esto, se debe importar el shapefile de la red hidrológica principal de la misma manera que se importó el shapefile de la cuenca, esto con el fin de marcar las celdas de entrada (inflow) y salida (outflow) (Figura 13).

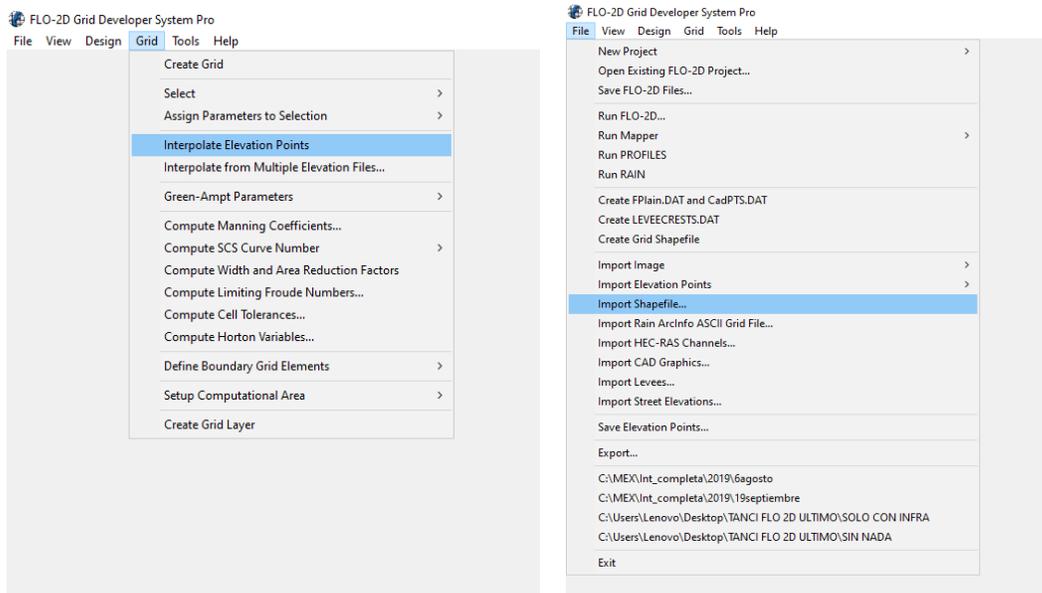


Figura 13. Herramientas utilizadas para realizar la interpolación en el programa FLO-2D.

Para definir la celda de entrada, que corresponde con el inicio del flujo, se debe importar el punto de entrada que se definió, a partir del análisis de cuencas, como la transición entre la zona de alimentación y la zona de inundación; a este punto se le asigna la característica de Inflow mediante la opción In/Out Condition (botón derecho en la celda) y la selección de Inflow element with hydrograph, ya que esta opción permite generar una hidrógrafa, la cual requiere tres variables: tiempo, descarga y concentración de sedimentos (Figura 14). La hidrógrafa se genera a partir de los datos de lluvia analizados, en donde el tiempo se establece en intervalos de 0.1 horas, la descarga máxima se asocia con el tiempo del pico máximo de lluvia y se le asigna un valor de descarga pico a partir de la ecuación (ecuación 3):

$$Descarga (m^3/s) = \text{área} (m^2) * \text{velocidad} (m/s)$$

Ecuación 3

En particular, se utilizó un valor pico de descarga obtenido de estimaciones directas realizadas en la barranca de Montegrando (Vázquez et al., 2014), y ajustada para la barranca La Arena.

Para la concentración de sedimentos máxima se consideró el valor de 0.5 de acuerdo con las características de los lahares estudiados en trabajos previos (Vázquez et al., 2016; Coviello et al., 2018).

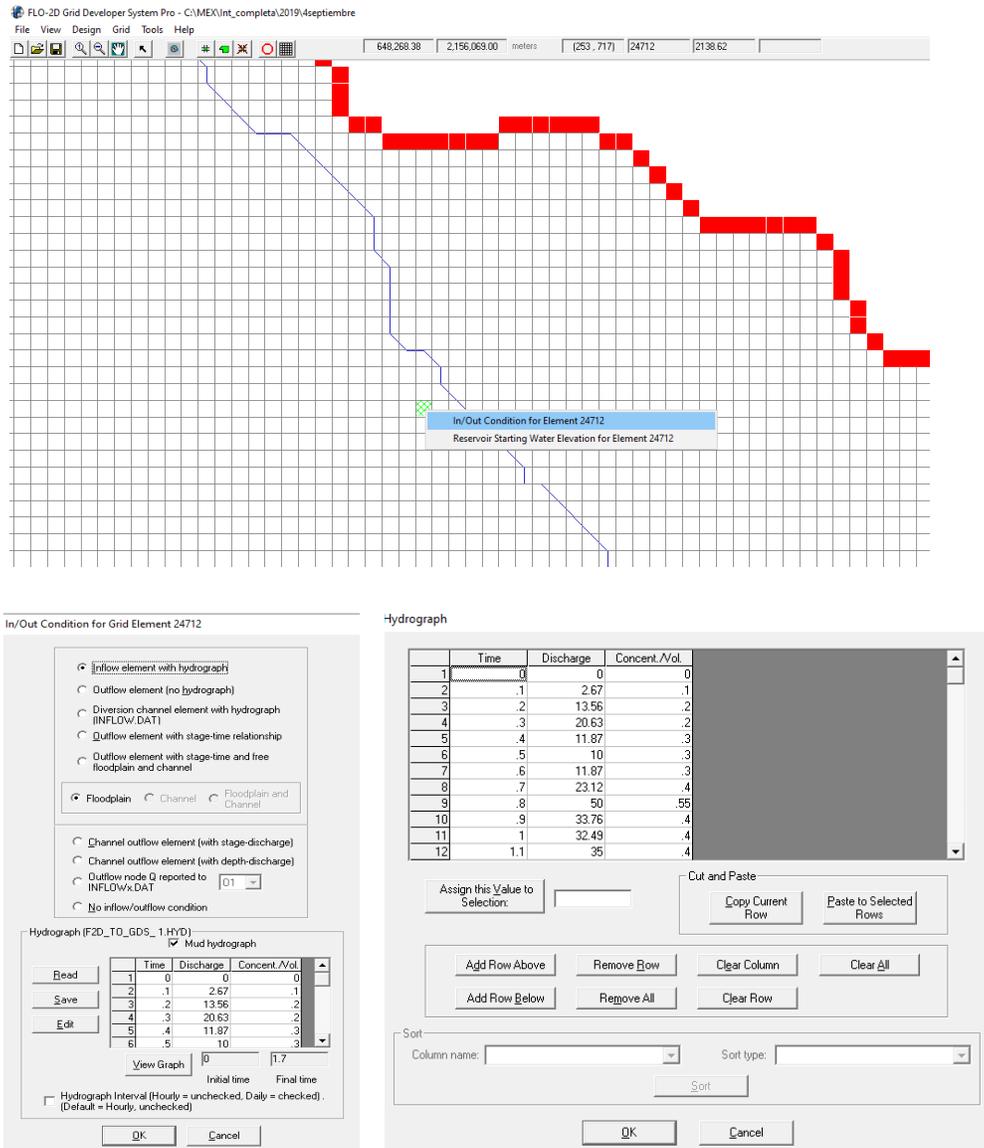


Figura 14. Herramientas utilizadas para definir celdas de entrada en el programa FLO-2D.

Para la definición de las celdas de salida, que corresponden al límite computacional distal, se deben seleccionar las celdas adyacentes al límite de la cuenca, a estas celdas se les asigna la condición de Outflow para que a partir de este punto no se calculen los parámetros de flujo (Figura 15).

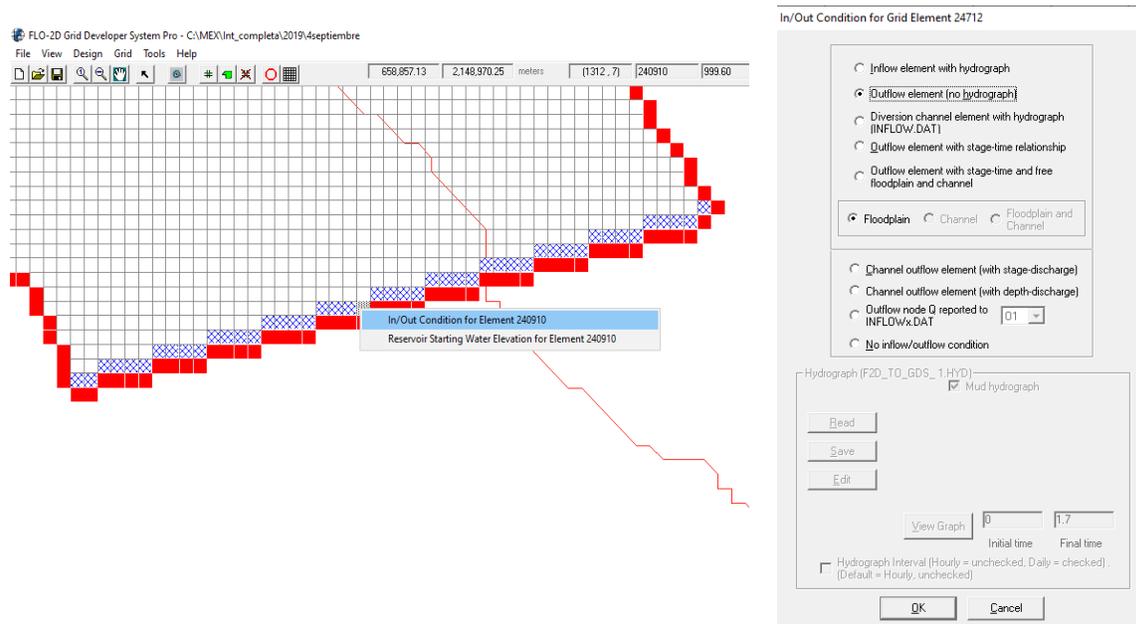


Figura 15. Herramientas utilizadas para definir celdas de salida en el programa FLO-2D.

Para generar las simulaciones, es necesario modificar los parámetros reológicos del flujo, esto se realiza mediante la herramienta Tools, la opción Mud and Sediment Transport y la selección de Mud/Debris (Figura 16), para este trabajo se tuvieron en cuenta los valores reológicos de los flujos laminares identificados en el manual de referencia de FLO-2D (O'Brien y Julien, 1988) y descritos anteriormente.

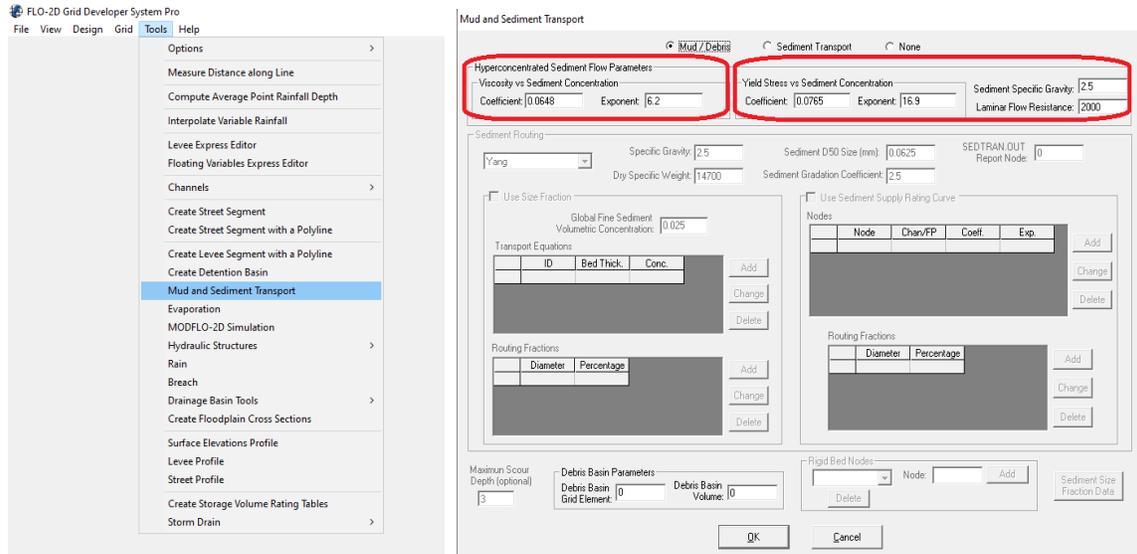


Figura 16. Herramientas utilizadas para definir parámetros reológicos en el programa FLO-2D.

Cuando estos parámetros se fijan, se procede a correr la simulación con la herramienta File y Run FLO-2D, allí se generará una tabla de control de variables, en donde el tiempo de simulación es el doble del tiempo de duración de la lluvia, con el fin de que la totalidad del flujo recorra toda la barranca y salga del drenaje. Después de verificar los parámetros que se van a simular, en el botón Run FLO2-D (save files) se guarda el proyecto en formato FPLAIN.DAT y se da lugar a la simulación del flujo (Figura 17).

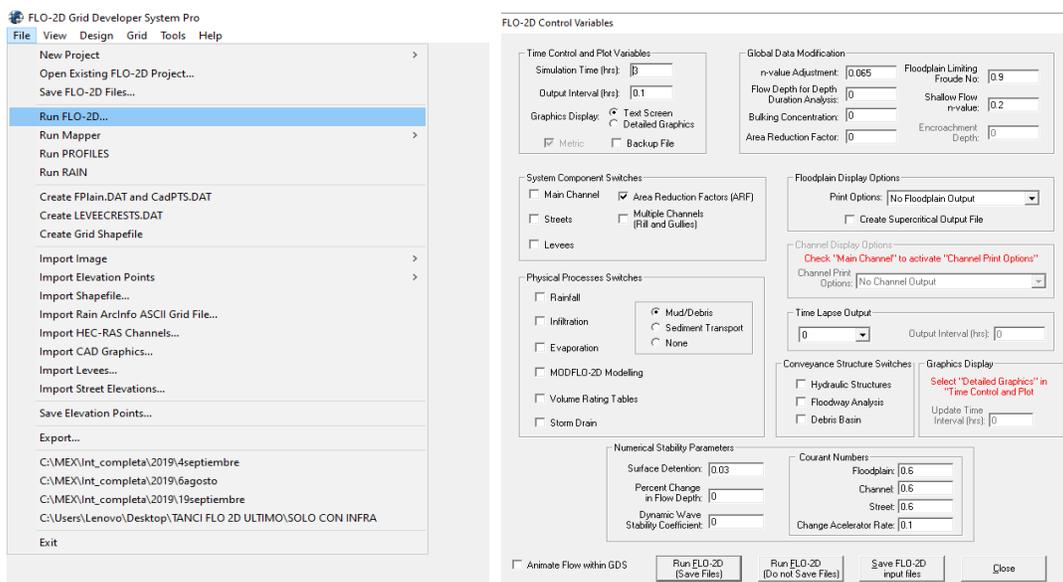


Figura 17. Herramientas utilizadas para correr la simulación en el programa FLO-2D.

Para visualizar la simulación, se hace uso de la extensión Mapper PRO, en donde se carga el proyecto anteriormente guardado y, con la herramienta Max Flow Depth, se hace visible el flujo simulado (Figura 18).

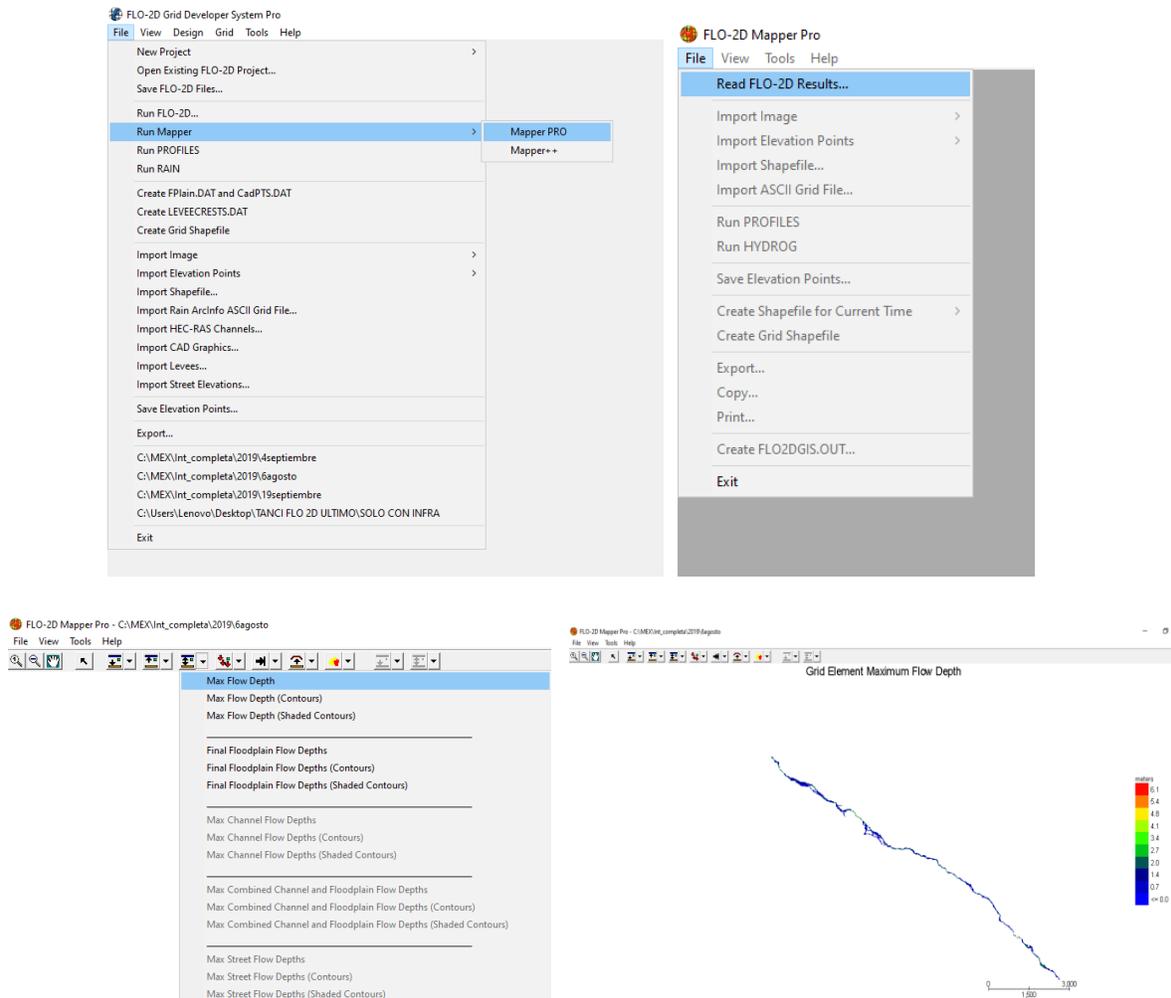


Figura 18. Herramientas utilizadas visualizar la simulación en la extensión del programa FLO-2D

Con base en el análisis de lluvia de los eventos anteriormente procesados, se generaron tres escenarios posibles de lahares que afectarían a la población de San Marcos:

- Escenario pequeño → A este grupo corresponden la mayoría de eventos relacionados a lluvias orogénicas, los cuales se caracterizan por tener una corta duración y alta intensidad. Los valores promedio de acumulación de

agua y duración para los eventos de este escenario son de 21.2 mm y 2.3 horas.

- Escenario intermedio → Lahares que ocurren por lluvias orogénicas pero acumulan mayor cantidad de agua que los del grupo anterior, por lo tanto inducen procesos de desbordamiento del flujo por fuera del canal. Los valores promedio de acumulación de agua y duración para el escenario intermedio son de 64.7 mm y 11.9 horas.
- Escenario grande → En este grupo se encuentran los lahares formados por huracanes, los cuales generan consecuencias devastadoras y podrían ser un riesgo importante para la población de San Marcos.

### 8.3. Mapas de amenaza

A partir de estos tres escenarios, se generaron cuatro tipos de mapas de amenaza, en donde los tres primeros se realizan para los tres escenarios, y el último se realiza para el escenario grande:

- Mapa de máxima profundidad → Estos mapas se realizan basados en la máxima profundidad calculada por cada pixel.
- Mapa de amenaza por presión de impacto → Con estos mapas se estiman los daños a la infraestructura que pueden generar los lahares a partir de su fuerza.
- Mapa de amenaza por máxima inundación → En estos mapas se visualiza la extensión máxima de los lahares, a partir del área total de inundación.
- Mapa de amenaza por probabilidad → Estos mapas se realizan basados en la probabilidad a inundación que tiene cada pixel.

#### 8.3.1. Mapa de amenaza por máxima profundidad

Este mapa se realiza a partir de los mapas de máxima profundidad obtenidos por cada escenario. Se realiza la sobreposición de las simulaciones en formato raster y, haciendo uso de la herramienta Point Sampling Tool se extraen los valores de profundidad y se define el valor máximo alcanzado en cada pixel. Posterior a esto,

estos valores máximos fueron utilizados para obtener un nuevo mapa raster y los intervalos utilizados para su clasificación fueron asignados a partir del histograma, para el cual se hizo una exclusión de los valores extremos:

- Escenario pequeño → 0.03 m – 3 m
- Escenario intermedio → 0.03 m – 3.5 m
- Escenario grande → 0.03 m – 13 m

### 8.3.2. Mapa de amenaza por presión de impacto

El mapa de amenaza por presión de impacto se realiza mediante la extensión Mapper PRO del programa FLO-2D, en donde se cargan los proyectos de las simulaciones de lahares generados por huracanes a partir de los archivos FPLAIN.DAT. Haciendo uso de las herramientas Load Map y Static Pressure, el programa generará un mapa de presión de impacto, el cual utiliza escalas de  $N/m^2$  o Pa (Pascuales) pero, para su representación y posterior análisis en el mapa, estos valores fueron convertidos a kPa (Kilopascuales) en los siguientes intervalos:

- 0 kPa – 200 kPa
- 200 kPa – 400 kPa
- 400 kPa – 600 kPa
- 600 kPa – 800 kPa
- 800 kPa – 1000 kPa

### 8.3.3. Mapa de amenaza por máxima inundación

Para la realización de este mapa, se debe hacer una sobreposición de los mapas raster obtenidos por cada simulación, los cuales se convierten a este formato mediante la herramienta Polygon to Raster. Posterior a esto, se hace la suma de todas las simulaciones con la ayuda de la Calculadora Raster, la cual genera un raster con el total de la suma; esta capa final se debe convertir a polígono mediante la herramienta Raster to Polygon, para así generar el mapa final de máxima inundación.

#### 8.3.4. Mapa de amenaza por probabilidad

Para ejecutar este mapa, el primer paso que se debe realizar es la sobreposición de las simulaciones en archivos raster de la misma manera que se hizo para el mapa anterior. Al tener esta sobreposición, se debe generar una malla de puntos para cada evento, la cual se realizó en el programa QGIS con el uso de las herramientas Vectorial, Herramientas de Investigación y Puntos Regulares, allí se utilizó como separación de los puntos el mismo tamaño de celda (12.5 m). A partir de esta malla, se extrajeron los valores de raster por cada punto, esto se realiza mediante Complementos, Analyses y la herramienta Point Sampling Tool; estos valores son procesados en Excel, de manera que cada pixel esté relacionado con la cantidad de veces que se inunda a lo largo de las simulaciones utilizadas; con estos datos se puede calcular la probabilidad a inundación de cada pixel. Posterior a esto, los datos fueron procesados en los programas SIG correspondientes (ArcGIS/QGIS) y se graficaron como raster, en donde los intervalos utilizados fueron:

- 0 % - 25 % → Probabilidad baja
- 25 % - 50 % → Probabilidad media
- 50 % - 75 % → Probabilidad alta
- 75 % - 100 % → Probabilidad muy alta

## 9. Resultados

Como primer resultado, se obtuvo una correlación entre los eventos de lluvia registrados y los lahares ocurridos durante los años 2018 y 2019. Los eventos de lluvias que correspondieron a eventos de lahar fueron utilizados para realizar las simulaciones. Con base en esta relación, se hicieron 28 simulaciones a partir de los eventos de lluvia que dispararon lahar durante los años 2018 y 2019 (Tabla 2), de las cuales 25 se clasificaron en el escenario pequeño (color azul), dos en el escenario intermedio (color rojo) y una en el escenario grande (color naranja), el cual no ocurrió durante el período mencionado, pero es un escenario posible para

la barranca La Arena y la población de San Marcos ya que corresponde con lluvias tropicales asociadas a los huracanes que cada año impactan la costa oeste de México.

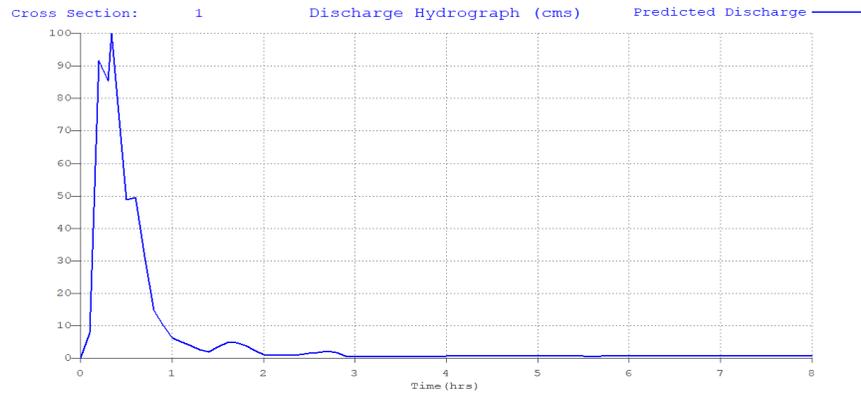
Tabla 2. Muestra las fechas a las que corresponden las simulaciones que fueron tenidas en cuenta como posible afectación en la población de San Marcos, se clasificaron en tres escenarios: pequeño (azul), intermedio (rojo) y grande (naranja).

| Fechas 2018 | Fechas 2019  | Huracán Patricia |
|-------------|--------------|------------------|
| 9/07/2018   | 5/07/2019    | 22-24/10/2015    |
| 28/07/2018  | 11/07/2019   |                  |
| 17/08/2018  | 23/07/2019 M |                  |
| 12/10/2018  | 23/07/2019 T |                  |
| 19/10/2018  | 24/07/2019   |                  |
|             | 25/07/2019   |                  |
|             | 6/08/2019    |                  |
|             | 7/08/2019    |                  |
|             | 17/08/2019   |                  |
|             | 22/08/2019 M |                  |
|             | 22/08/2019 T |                  |
|             | 23/08/2019   |                  |
|             | 4/09/2019    |                  |
|             | 8/09/2019    |                  |
|             | 9/09/2019    |                  |
|             | 14/09/2019   |                  |
|             | 19/09/2019   |                  |
|             | 23/09/2019   |                  |
|             | 28/09/2019   |                  |
|             | 30/09/2019   |                  |
|             | 4/10/2019    |                  |
|             | 12/11/2019   |                  |

A partir de las 28 simulaciones, distribuidas en los tres escenarios posibles, se calcularon curvas de descarga en las partes alta y baja del canal para los escenarios pequeño e intermedio, así como perfiles de inundación en los mismos lugares para los tres escenarios, y finalmente mapas de amenaza por máxima inundación, probabilidad de ocurrencia (espacial), máxima profundidad y presión de impacto.

Las curvas de descarga se realizaron para los escenarios pequeño (Figura 19) e intermedio (Figura 20), y se visualizan en unidades de metros cúbicos por segundo (cms por sus siglas en inglés).

a)



b)

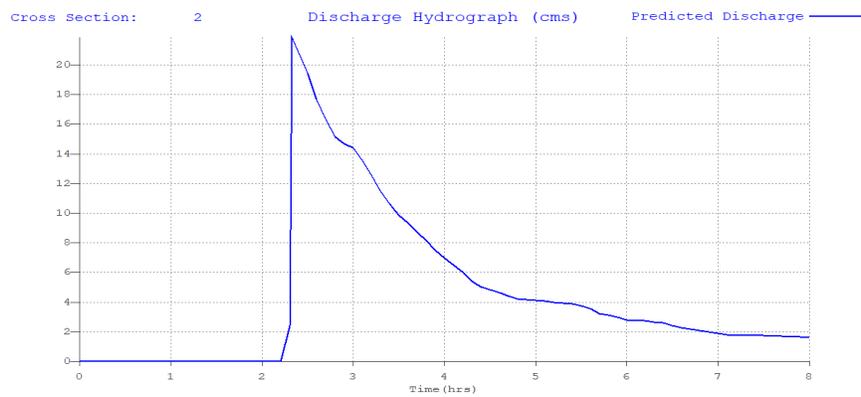
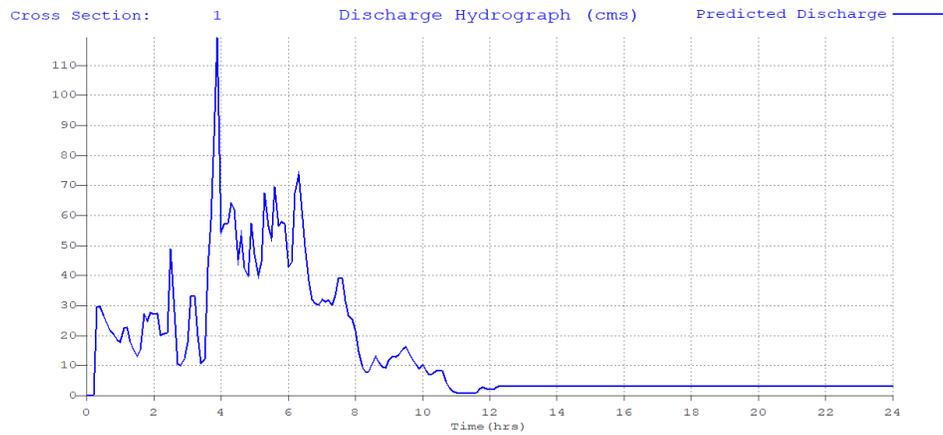


Figura 19. Gráficas de curvas de descarga para una de las simulaciones del escenario intermedio. a) Descarga en la parte alta del canal. b) Descarga en la parte baja del canal.

a)



b)

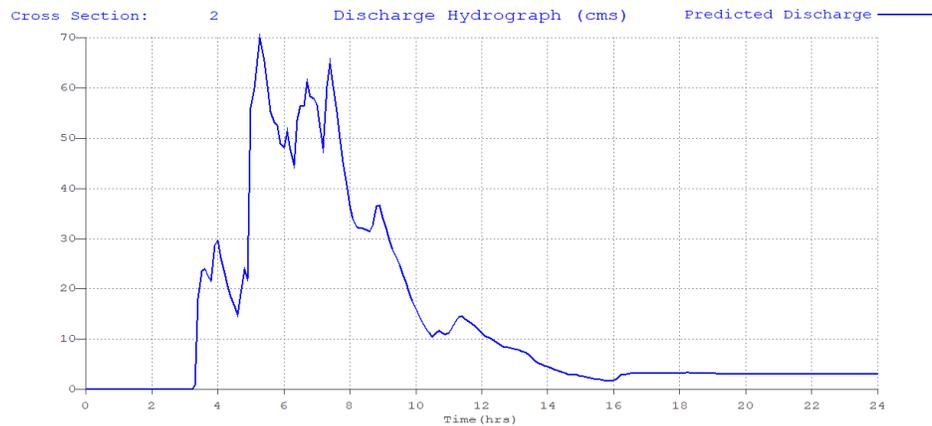


Figura 20. Gráficas de curvas de descarga para una de las simulaciones del escenario intermedio.  
a) Descarga en la parte alta del canal. b) Descarga en la parte baja del canal.

Los perfiles de inundación se realizaron con un ejemplo de simulación de cada uno de los escenarios: 6/08/2019 para el escenario pequeño (Figura 21a), 30/09/2019 para el escenario intermedio (Figura 21b) y 20-24/10/2015 (Figura 21c) para el escenario grande.

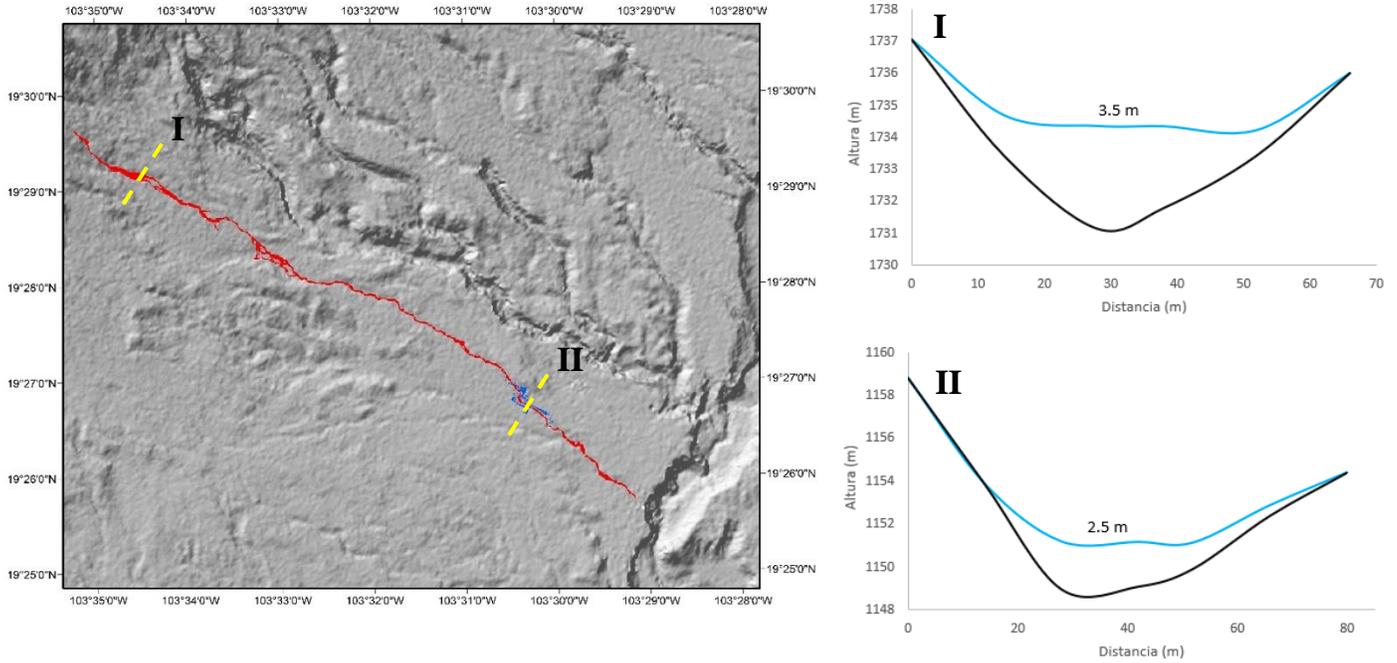


Figura 21. a) Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario pequeño. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 3.5 m y en la parte baja (zona de infraestructura) una profundidad de 2.5 m.

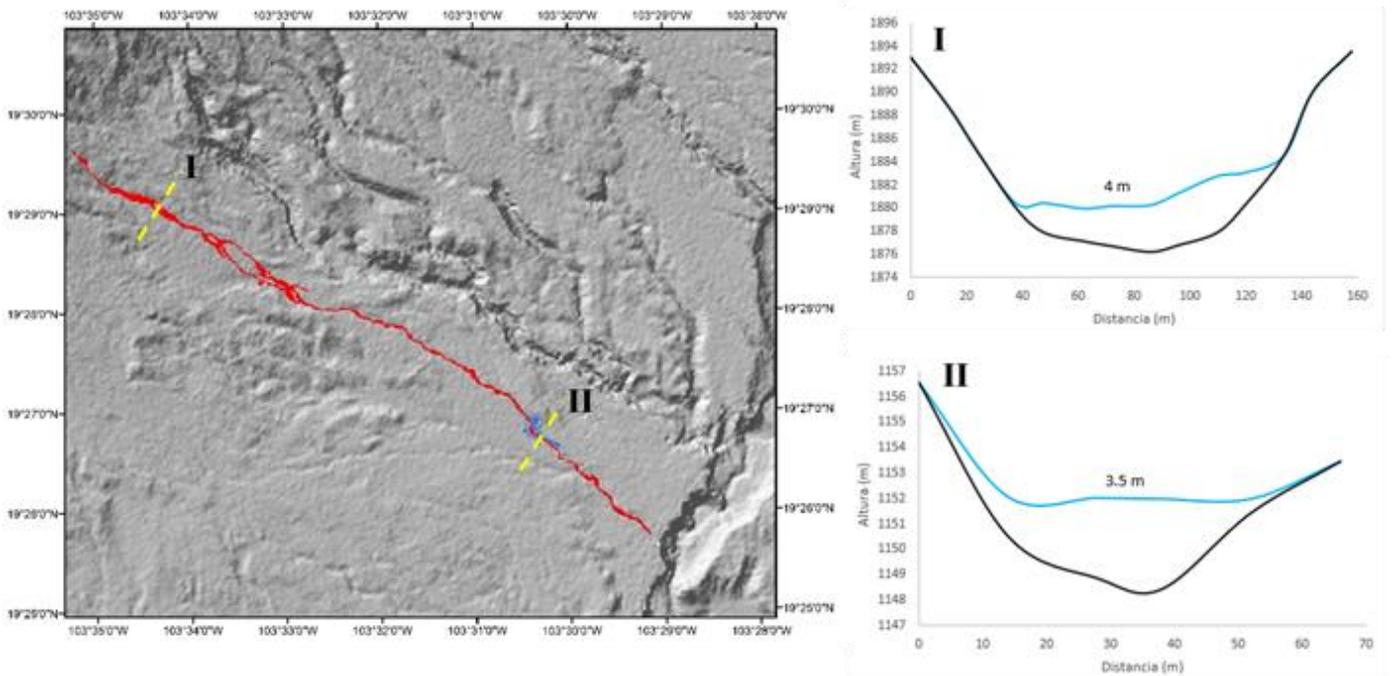


Figura 21. b) Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario intermedio. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 4 m y en la parte baja (zona de infraestructura) de 3.5 m

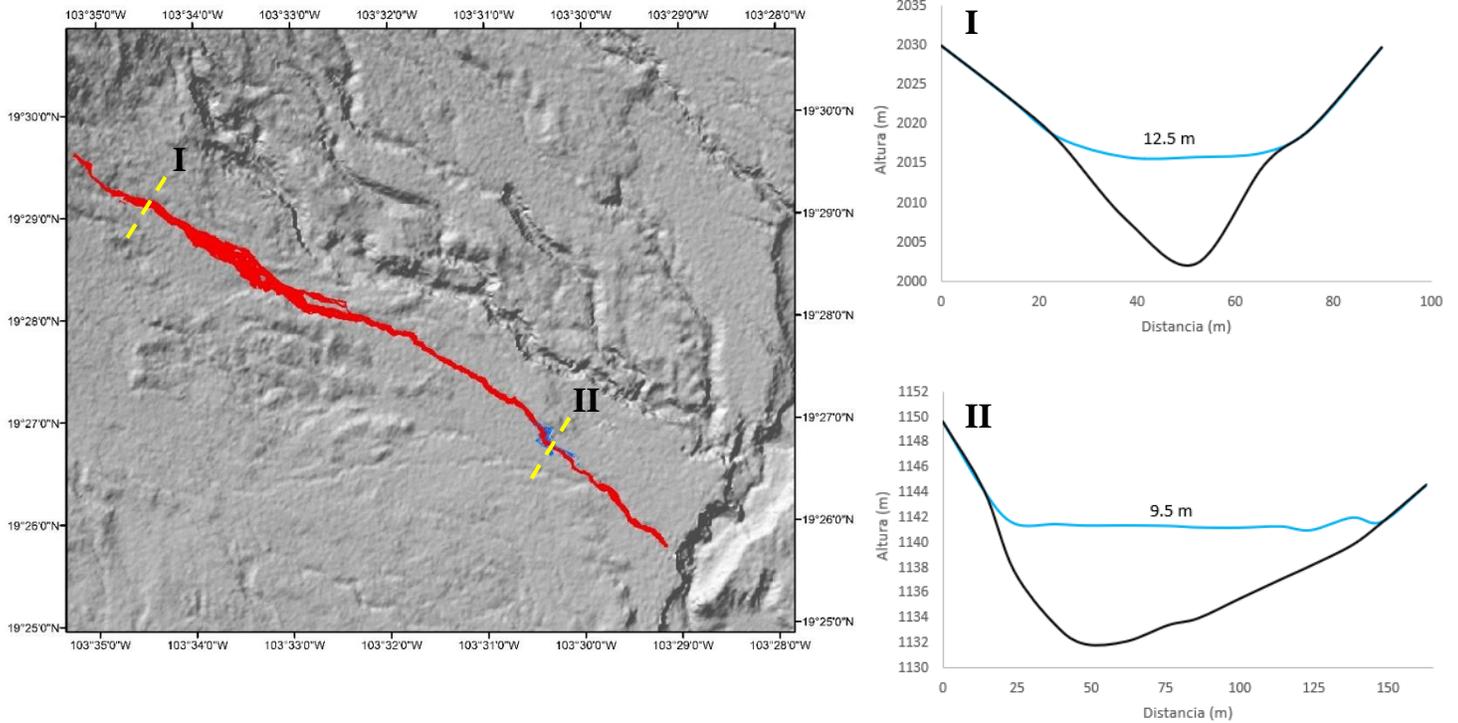


Figura 21. c) Perfiles de inundación para ejemplo de simulación del escenario grande. En la parte alta se muestra una profundidad máxima de 12.5 m y en la parte baja (zona de infraestructura) una profundidad de 9.5 m.

Los mapas de amenaza, que fueron el resultado final de este análisis, son descritos a continuación.

- Mapa de amenaza por máxima profundidad → En estos mapas se muestra la profundidad máxima alcanzada en cada píxel por los lahares generados por los diferentes eventos de lluvia registrada para los escenarios pequeño (Figura 22a), intermedio (Figura 22b) y grande (Figura 22c). Está dividida en cinco rangos de profundidad representados en metros (Tablas 3, 4 y 5):

### Escenario pequeño

Tabla 3. Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario pequeño.

| <i>Clasificación</i> | <i>Rangos</i> | <i>Color</i> |
|----------------------|---------------|--------------|
| Muy baja             | 0 m – 0.2 m   | Verde oscuro |
| Baja                 | 0.2 m – 0.5 m | Verde claro  |
| Intermedia           | 0.5 m – 1 m   | Amarillo     |
| Alta                 | 1 m – 2 m     | Naranja      |
| Muy alta             | 2 m – 3 m     | Rojo         |

### Escenario Intermedio

Tabla 4. Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario intermedio.

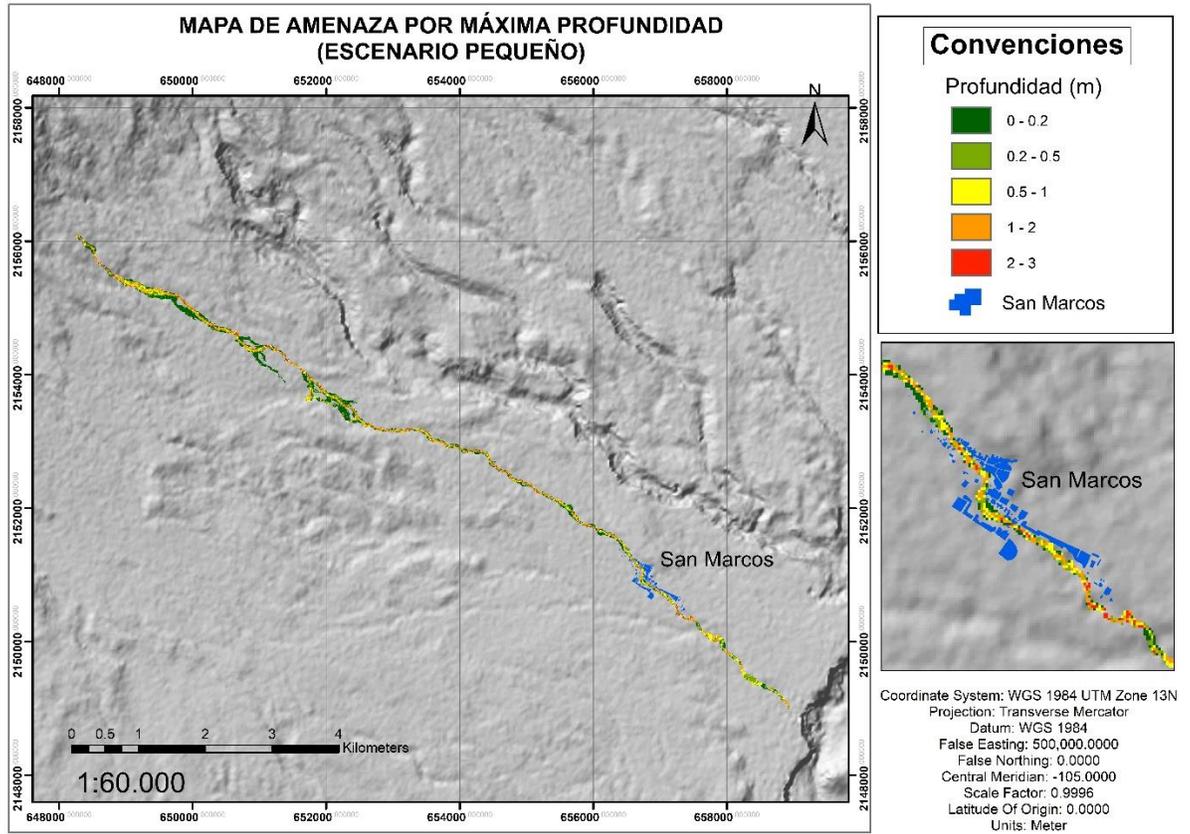
| <i>Clasificación</i> | <i>Rangos</i> | <i>Color</i> |
|----------------------|---------------|--------------|
| Muy baja             | 0 m – 0.2 m   | Verde oscuro |
| Baja                 | 0.2 m – 0.5 m | Verde claro  |
| Intermedia           | 0.5 m – 1 m   | Amarillo     |
| Alta                 | 1 m – 2 m     | Naranja      |
| Muy alta             | 2 m – 3.5 m   | Rojo         |

### Escenario Grande

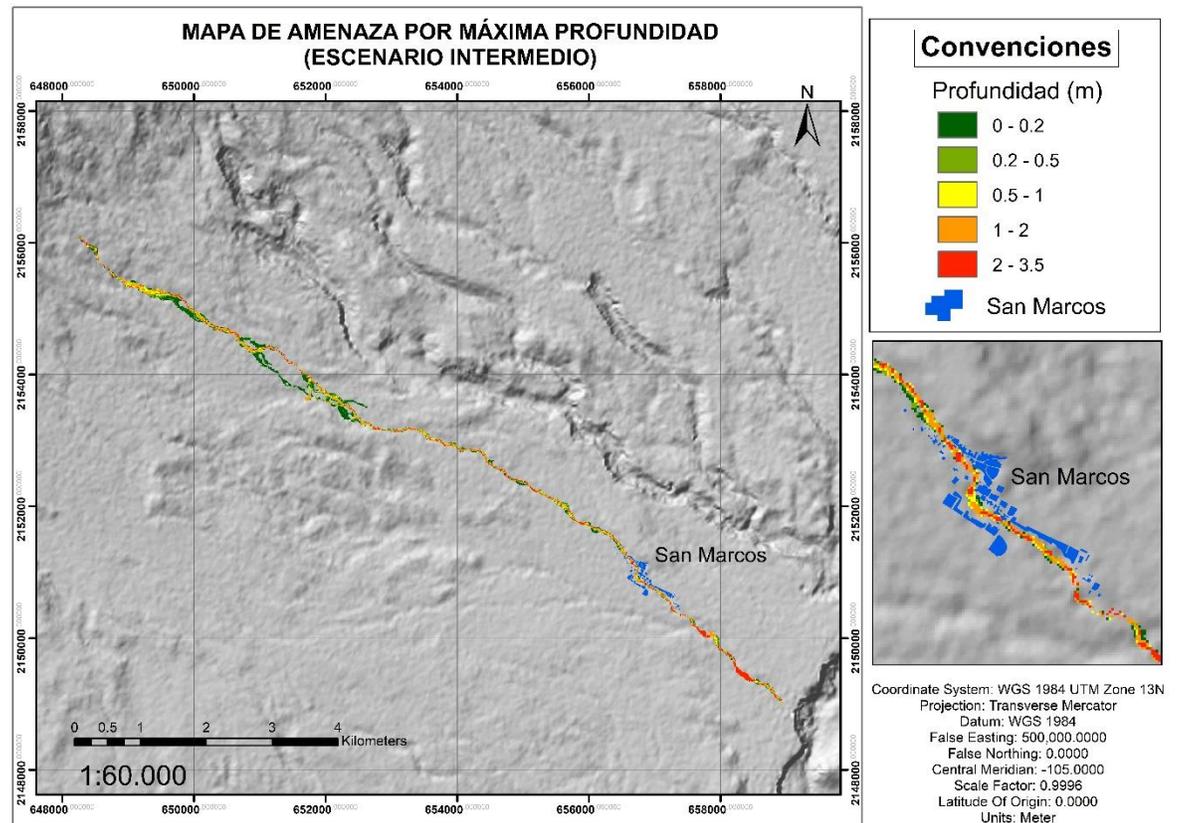
Tabla 5. Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por máxima profundidad correspondiente al escenario grande.

| <i>Clasificación</i> | <i>Rangos</i> | <i>Color</i> |
|----------------------|---------------|--------------|
| Muy baja             | 0 m – 1 m     | Verde oscuro |
| Baja                 | 1 m – 4 m     | Verde claro  |
| Intermedia           | 4 m – 7 m     | Amarillo     |
| Alta                 | 7 m – 10 m    | Naranja      |
| Muy alta             | 10 m – 13 m   | Rojo         |

a)



b)



c)

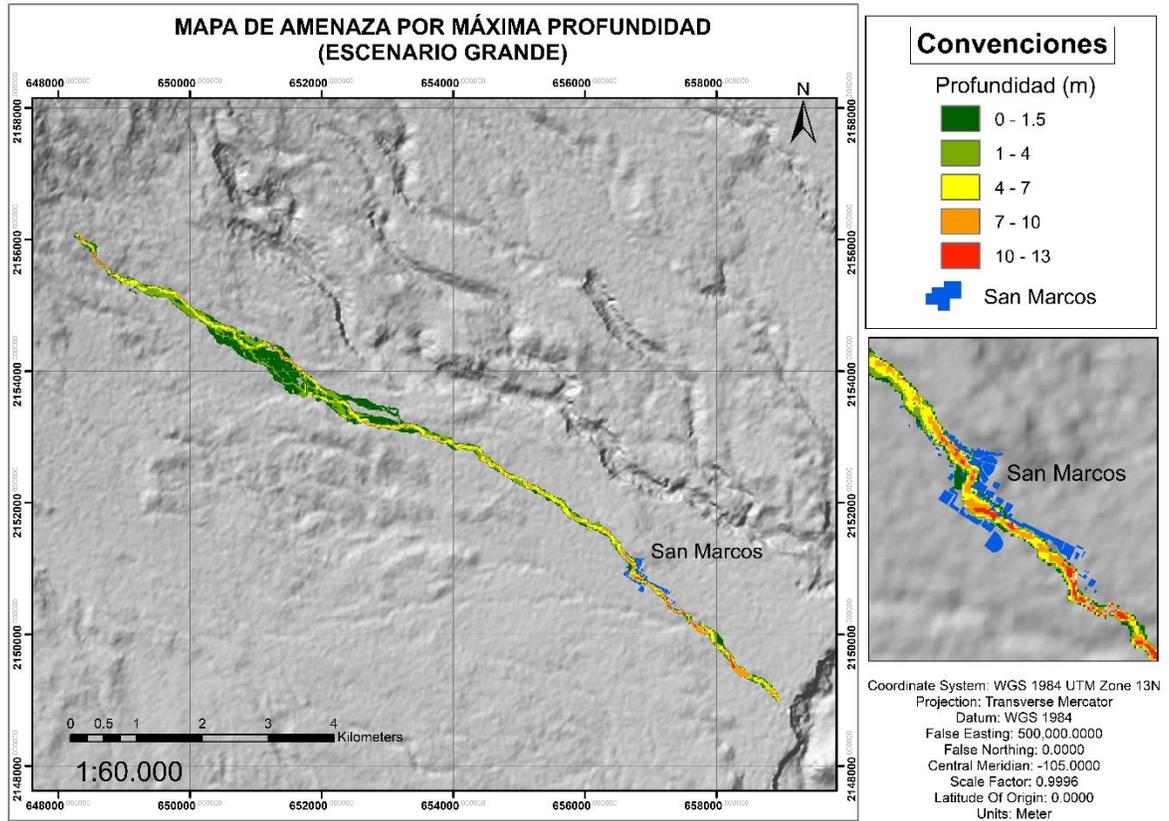


Figura 22. Mapa de amenaza por máxima profundidad, en donde los valores máximos están representados en color rojo y los mínimos en color verde oscuro. a) Mapa de amenaza por máxima profundidad en el escenario pequeño, b) en el escenario intermedio, c) en el escenario grande.

- Mapa de amenaza por presión de impacto → En este mapa se evidencia la fuerza que ejerce el lahar correspondiente al escenario grande (Figura 23). En el mapa se muestran las presiones de impacto en cinco rangos con unidades de kPa (Tabla 6):

Tabla 6. Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por presión de impacto

| <i>Clasificación</i> | <i>Rangos</i>      | <i>Color</i> |
|----------------------|--------------------|--------------|
| Muy baja             | 0 kPa – 200 kPa    | Verde oscuro |
| Baja                 | 200 kPa – 400 kPa  | Verde claro  |
| Intermedia           | 400 kPa – 600 kPa  | Amarillo     |
| Alta                 | 600 kPa – 800 kPa  | Naranja      |
| Muy alta             | 800 kPa – 1000 kPa | Rojo         |

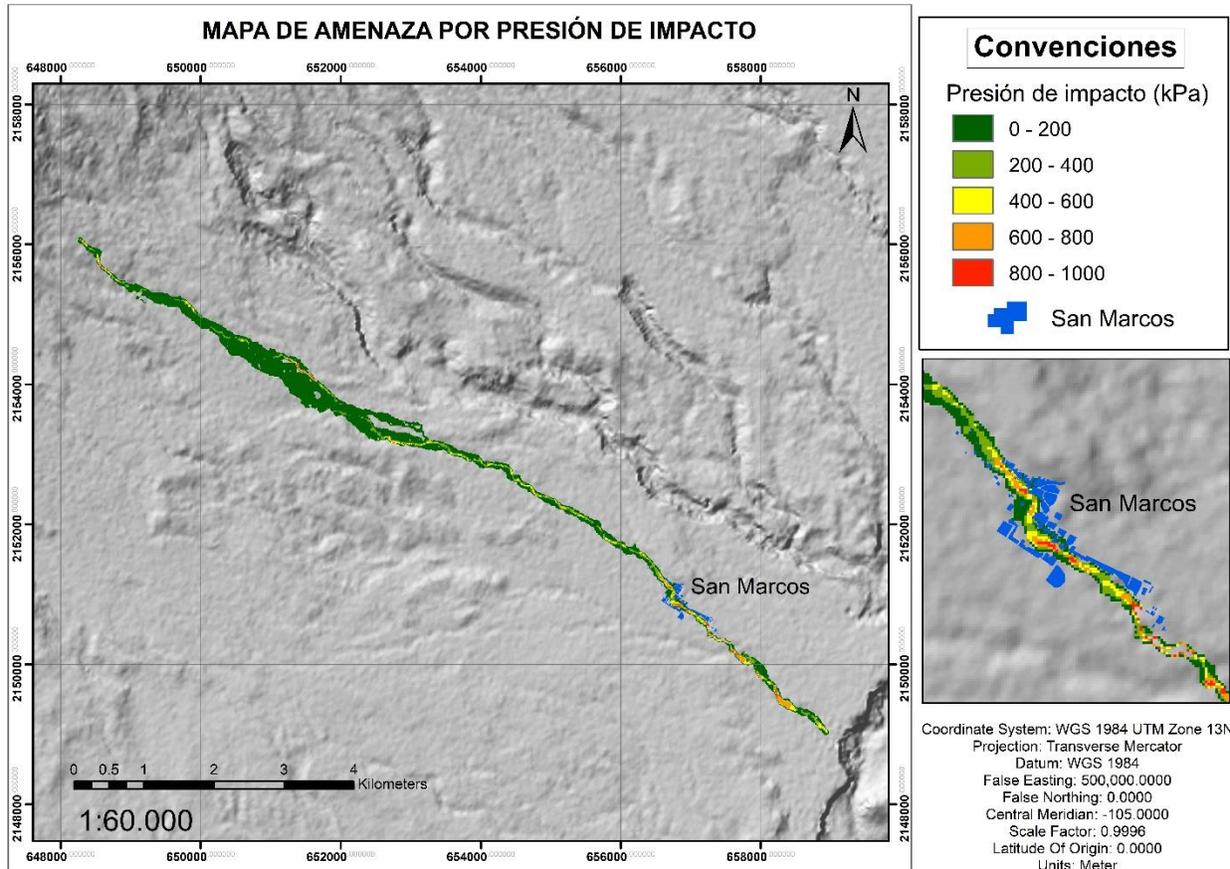


Figura 23. Mapa de amenaza por presión de impacto para el escenario grande, en donde los valores máximos están representados en color rojo y lo mínimos en color verde oscuro.

- Mapa de amenaza por máxima inundación → En este mapa se pueden observar las áreas de inundación y la distancia máxima que alcanzan los diferentes lahares según el escenario y cómo la población de San Marcos es afectada (Figura 24). En color verde está representado el escenario pequeño, en morado el escenario intermedio y en color rosa el escenario grande.

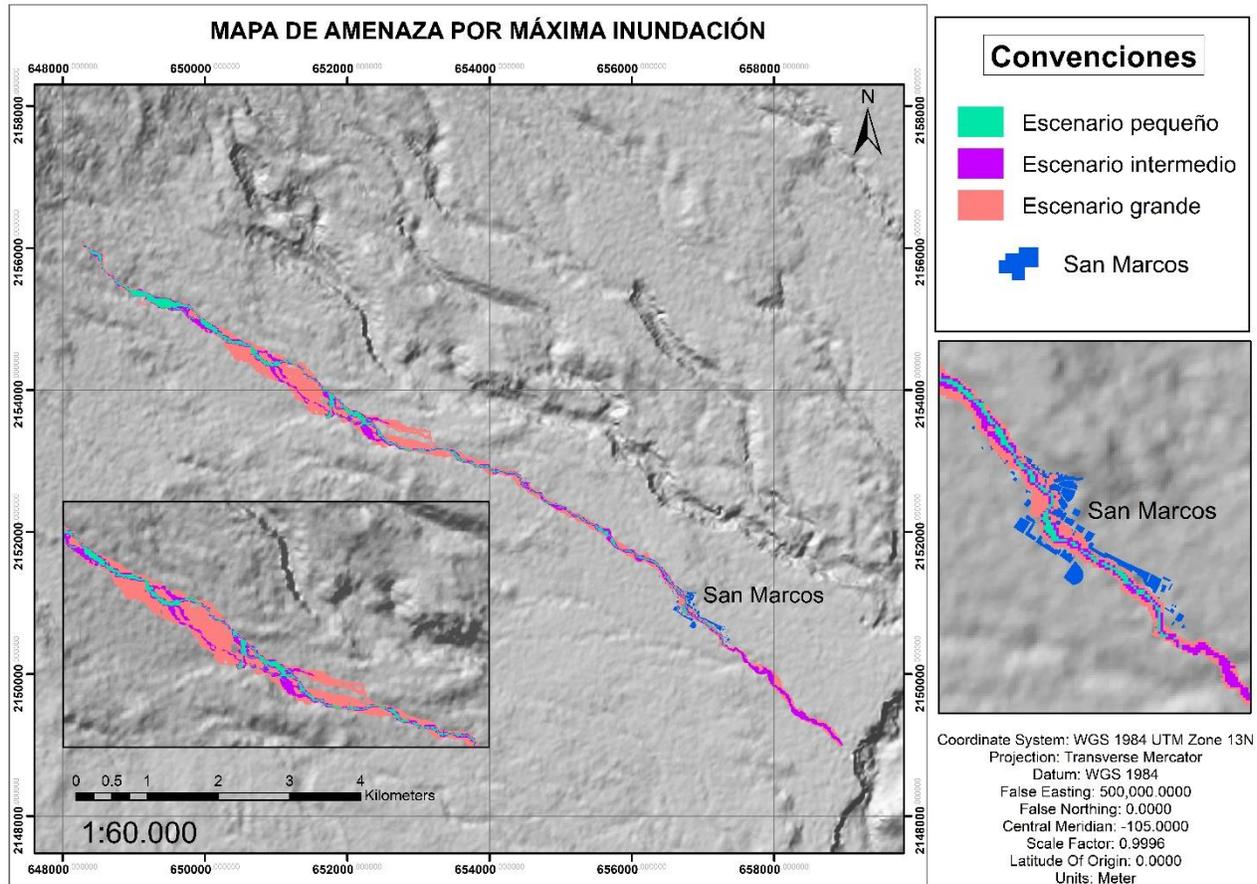


Figura 24. Mapa de amenaza por máxima inundación, teniendo en cuenta los tres escenarios posibles, en donde el color verde está representando el escenario pequeño, el morado el escenario intermedio y el color rosa el escenario grande.

- Mapa de amenaza por probabilidad → Este mapa muestra la probabilidad que tiene un píxel de ser inundado por los lahares generados en los escenarios pequeño, intermedio y grande (Figura 25). Se encuentra dividido en cuatro rangos dados en porcentajes (Tabla 7):

Tabla 7. Clasificación, rangos y colores del mapa de amenaza por probabilidad.

| <i>Clasificación</i> | <i>Rangos</i> | <i>Color</i> |
|----------------------|---------------|--------------|
| Muy baja             | 0 % – 25 %    | Verde oscuro |
| Intermedia           | 25 % – 50 %   | Verde claro  |
| Alta                 | 50 % – 75 %   | Naranja      |
| Muy alta             | 75 % - 100 %  | Rojo         |

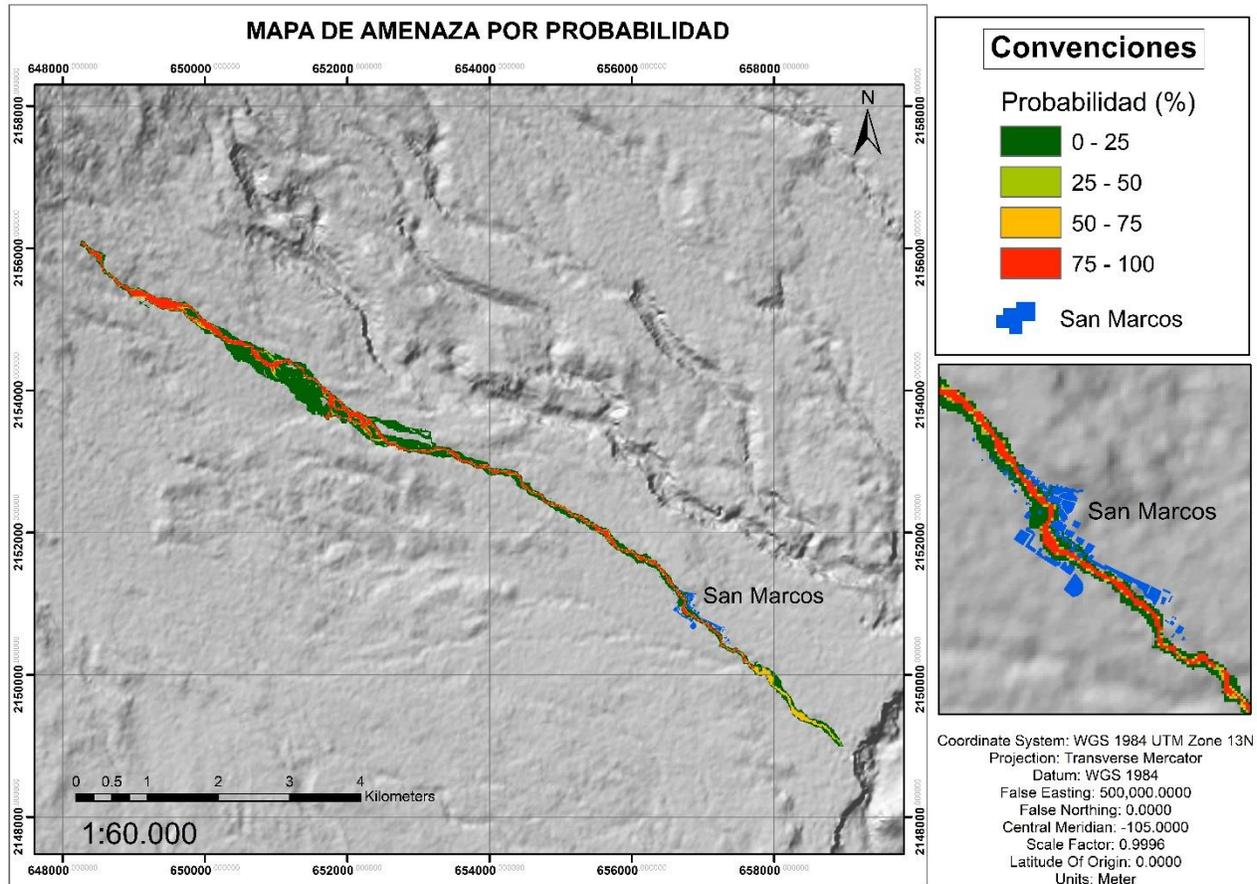


Figura 25. Mapa de amenaza por probabilidad, teniendo en cuenta los tres escenarios posibles, en donde el color rojo está representando las probabilidades más altas y el verde oscuro las más bajas.

## 10. Discusión

El presente trabajo aporta los datos originales acerca de la zonificación por amenaza de lahares en la barranca La Arena, en el flanco SE del Volcán de Colima. Los trabajos previos se han enfocado en las barrancas La Lumbre y Montegrande, siendo las más activas en cuanto a procesos de erosión y formación de lahares (Capra et al., 2018), y en donde se ubican las estaciones de monitoreo que permiten obtener datos sísmicos, visuales y meteorológicos por cada evento. En la barranca La Arena no se cuenta con un sistema de monitoreo, sin embargo, se considera que es esta barranca las condiciones de formación de lahares son similares a las observadas en las otras dos barrancas. Por lo anterior, los datos utilizados para este proyecto se refieren a lahares que fueron registrados en estaciones de las barrancas La Lumbre y Montegrande, ubicadas al suroeste y sur del Volcán de Colima,

respectivamente; estos canales son los más activos en la entrega de sedimentos del volcán. Estos datos fueron utilizados para definir la susceptibilidad a inundación de la población de San Marcos. Es importante resaltar que estos canales no contienen corrientes perennes y solo transportan flujos cuando corresponden a lahares disparados durante la temporada de lluvia, principalmente entre los meses de junio y octubre.

A partir de los datos de lluvia, se analizó un total de 31 eventos para el 2018, en donde el primer evento se registra el 27 de enero. Sin embargo, el mayor número de eventos se concentra durante la temporada de lluvias que, para el 2018, comienza el 17 de junio y termina el 28 de octubre; el último evento registrado es del 29 de noviembre. Para el 2019, fueron 52 los eventos analizados, los cuales ocurrieron entre el 25 de junio y el 12 de noviembre.

La lluvia acumulada y la duración de los eventos varían en un amplio rango, en donde la lluvia acumulada registra valores desde 6.4 a 46.8 mm para el 2018, y de 6.2 a 56.8 mm para el 2019; los valores de duración para el 2018 se encuentran entre 0.16 y 14.6 horas, y entre 0.08 y 9.66 horas para el 2019, con valores promedio de intensidad desde 8.23 hasta 40.5 mm/hora para el primer año, y de 3.5 a 122.4 mm/hora para el segundo.

Al analizar el registro, se observa que hay eventos que se caracterizan por la acumulación de pocas cantidades de lluvia en mucho tiempo, por lo tanto, cuentan con intensidades bajas (Figura 26a); mientras que en otros eventos sucede lo contrario con una mayor acumulación de lluvia en un menor tiempo, lo que corresponde a una mayor intensidad (Figura 26b); la ocurrencia de lahares está asociada a estos últimos, cuya curva hidrográfica se visualiza con una alta inclinación, lo cual indica una alta intensidad, y esto favorece un rápido escurrimiento superficial del agua y erosión del sedimento.

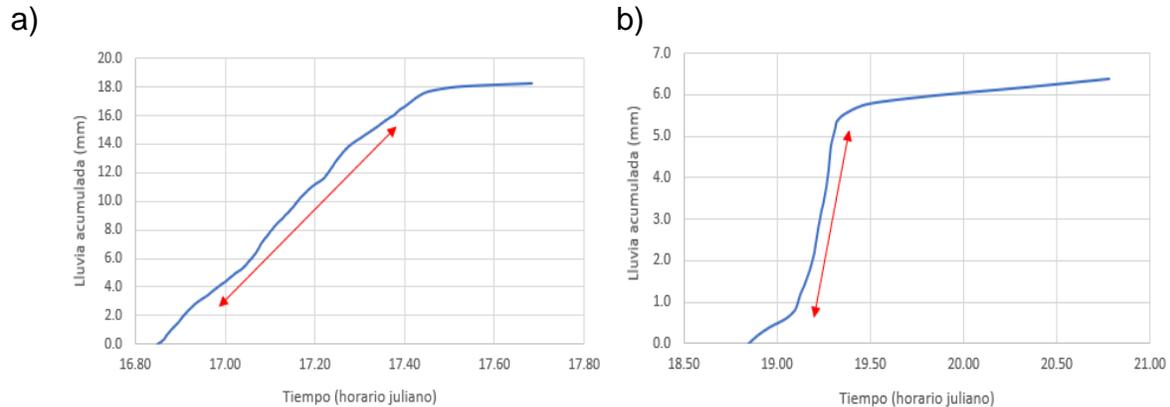


Figura 26. Curvas en donde se grafican las variables de lluvia acumulada vs duración. a) Se visualiza una curva poco inclinada, la cual indica mayor tiempo y poca intensidad, y no está asociada a ocurrencia de lahares. b) Se visualiza una curva inclinada, la cual indica menor tiempo y mayor intensidad, y se relaciona con ocurrencias de lahares

Con base en el anterior análisis, se correlacionaron los lahares ocurridos durante el mismo periodo, en donde, para el 2018 se cuenta con 17 eventos de lahar registrados a partir de señales sísmicas, para los cuales su duración oscila entre 1 y 3 horas; de estos 17 eventos, 13 coincidieron con eventos de lluvia, y 4 no fueron relacionados con los mismos. Para el 2019, el rango de duraciones es similar al del año anterior, y los lahares ocurridos fueron 41, de los cuales 5 no se relacionaron con eventos de lluvia. Esto se debe a que los datos de lluvia son registrados en una estación que toma en cuenta la precipitación en el lugar donde se encuentra, por lo tanto, 9 lahares están asociados a lluvias ocurridas en zonas más altas del volcán que no son registradas en la estación correspondiente a los datos que fueron analizados; esto también se evidencia en algunos eventos en donde el lahar comienza antes o muy poco tiempo después que la lluvia.

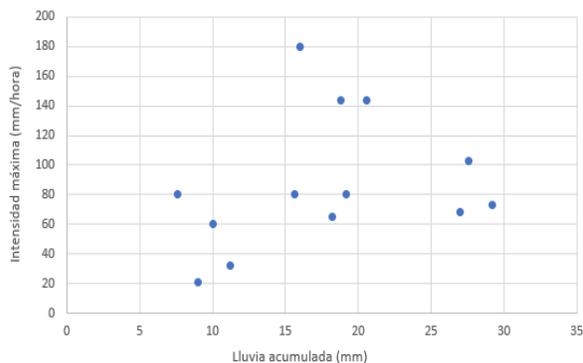
Por otra parte, se cuenta con un total de 12 eventos de lluvia, 6 en cada año, que acumulan cantidades considerables de agua (mayores a 20 mm) pero no disparan eventos de lahar, posiblemente debido a valores bajos de intensidad instantánea por lo que la mayor parte del agua se infiltra en el suelo y no permite que se genere suficiente escurrimiento superficial para que se genere un lahar. En la tabla 8 se muestra un ejemplo del análisis de correlación que se realizó entre los eventos de lluvia con los de lahar, en azul, y los eventos que acumulan altas cantidades de

agua, en amarillo, pero que no generan eventos lahar. Además, en la figura 27 se grafica la lluvia total acumulada con el valor máximo de intensidad de los eventos que dispararon lahares para cada año.

Tabla 8. Ejemplo de tabla de eventos de lluvia correlacionados a los lahares, con sus respectivas fechas, horas y duración. Además, se resaltan los eventos que acumulan cantidades de agua mayores a 20 mm, pero no disparan lahar.

| LLUVIAS 2018 |             |          |                         | LAHARES 2018 |            |          |
|--------------|-------------|----------|-------------------------|--------------|------------|----------|
| Fecha        | Hora inicio | Hora fin | Lluvia acumulada R (mm) | Fecha        | Hora local | Duración |
| 27/01/2018   | 15:04:31    | 17:05:37 | 32.2                    |              |            |          |
| 7/05/2018    | 3:40:32     | 7:13:29  | 30.6                    |              |            |          |
| 10/05/2018   | 20:22:31    | 21:45:56 | 13.8                    |              |            |          |
| 17/06/2018   | 16:37:12    | 18:47:35 | 14.2                    |              |            |          |
| 18/06/2018   | 0:01:14     | 5:31:17  | 38.6                    |              |            |          |
| 23/06/2018   | 17:48:29    | 19:54:25 | 18.2                    |              |            |          |
| 28/06/2018   | 19:50:06    | 22:15:23 | 11                      |              |            |          |
| 5/07/2018    | 18:26:14    | 19:15:46 | 11.6                    |              |            |          |
| 9/07/2018    | 15:15:46    | 17:13:51 | 29.2                    | 9/07/2018    | 15:40      | 2h       |
| 15/07/2018   | 16:31:16    | 17:19:46 | 11.2                    | 15/07/2018   | 16:30      | 2h       |
| 20/07/2018   | 18:50:47    | 20:46:40 | 6.4                     |              |            |          |
| 28/07/2018   | 17:40:36    | 20:54:01 | 19.2                    | 28/07/2018   | 17:30      | 1h 30min |
| 10/08/2018   | 18:58:36    | 21:28:05 | 12.4                    |              |            |          |
| 12/08/2018   | 15:17:30    | 16:20:57 | 18                      |              |            |          |
| 17/08/2018   | 16:37:41    | 18:47:22 | 18.8                    | 17/08/2018   | 17:00      | 1h 30min |
| 18/08/2018   | 18:19:01    | 19:31:28 | 20.6                    | 18/08/2018   | 18:30      | 1h 10min |
| 22/08/2018   | 18:24:40    | 19:33:39 | 27                      | 22/08/2018   | 18:20      | 1h 5min  |
| 23/08/2018   | 13:12:57    | 14:47:38 | 22.6                    |              |            |          |
| 23/08/2018   | 16:50:59    | 17:40:56 | 18.2                    | 23/08/2018   | 17:00      | 1h 30min |

a)



b)

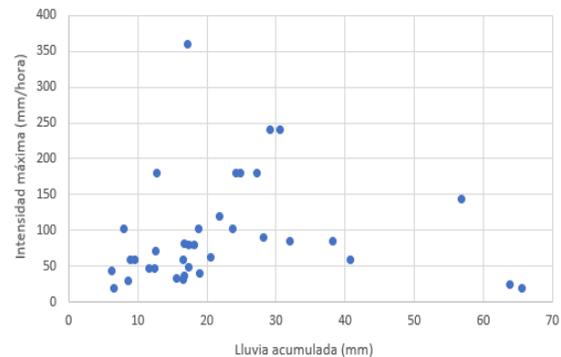


Figura 27. Gráficas de lluvia total acumulada vs el valor máximo de intensidad de los eventos que dispararon lahares. a) Gráfica para el 2018. b) Gráfica para el 2019.

Con base en el análisis de lluvias, se seleccionaron los eventos más representativos durante los años 2018 y 2019, los cuales fueron utilizados para realizar las simulaciones numéricas. En particular, se observa que las precipitaciones más recurrentes en la zona de estudio son las lluvias orográficas o locales (alta intensidad y baja duración) y, por esta razón, es indispensable tenerlas en cuenta como un escenario de riesgo en el volcán, específicamente para la población de San Marcos. A partir de las simulaciones, se establece que San Marcos se ve afectado por varios de estos lahares y, debido a que la barranca La Arena cruza el centro habitado, los lahares que se emplazan allí afectan directamente infraestructura de la población. Del total de 49 eventos en ambos años, se obtuvieron 27 simulaciones que afectarían la infraestructura de San Marcos, ya que los demás flujos no llegan hasta la población. Por otro lado, como posible escenario, se consideró el evento de lluvia asociado al huracán Patricia, cuyo paso en el 2015 provocó lahares de gran magnitud en las barrancas Montegrande y La Lumbre.

Con base en las simulaciones de lahares obtenidas por cada evento de lluvia considerado, se pudieron agrupar los eventos en tres escenarios principales: el escenario pequeño que corresponde a las lluvias más recurrentes y flujos que corren a lo largo del canal (con lluvia acumulada entre 6.2 y 40.8 mm e intensidad promedio entre 1.7 y 22.1 mm/hora), el escenario intermedio que se caracteriza por lluvias más intensas y flujos que se desbordan del canal (con lluvia acumulada de 20 y 56 mm e intensidad promedio de 4 y 6 mm/hora); y el escenario grande que corresponde al huracán Patricia, el cual tuvo impacto en la barranca La Lumbre. De tal manera, los datos aplicados fueron tomados de la manera como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. División de los tres escenarios planteados a partir de las simulaciones realizadas, número de eventos correspondientes a cada uno y barrancas en las que ocurrieron.

| <i>Escenario</i> | <i># de eventos</i> | <i>Ocurrido en</i> | <i>Aplicado a</i> |
|------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| Pequeño          | 25                  | Montegrande        | La Arena          |
| Intermedio       | 2                   | Montegrande        |                   |
| Grande           | 1                   | La Lumbre          |                   |

Además, se realizaron perfiles de descarga hidrográfica en las partes alta y baja del canal para los escenarios pequeño (Figura 19) e intermedio (Figura 20), con el fin de conocer las variaciones del flujo con la distancia y a lo largo del tiempo. Con estas gráficas se muestra que, para el ejemplo del primer escenario, en la parte alta, el pico de descarga ocurrió durante la primera hora, mientras que para la parte baja, ocurrió entre la segunda y tercera hora del evento, lo cual concuerda con que el flujo va cambiando sus dinámicas a lo largo del canal con respecto al tiempo y a las variaciones morfológicas del canal, lo cual se demuestra con la ecuación 3, por lo tanto, en las partes altas la descarga máxima se presentará horas antes que en las zonas bajas. Esto mismo está relacionado con los valores máximos de descarga, ya que estos valores son mayores en las partes altas, esto se refleja en la gráfica de la figura 19a, la cual presenta un valor máximo de 100 cms (metros cúbicos por segundo), mientras que la gráfica de la figura 19b muestra un valor máximo de 25 cms, esto se debe a que el flujo va cambiando y va disminuyendo en descarga con la distancia y el tiempo. Las mismas relaciones suceden para el escenario intermedio, en donde, aunque haya picos de descarga más altos que en el escenario pequeño, el pico de descarga máxima en la parte alta sucede finalizando la tercera hora del evento, mientras que en la parte baja, además de que hay una descarga máxima menor, el valor máximo sucede más de una hora después; los valores correspondientes afirman la relación anterior, en donde el primer valor máximo registrado es de 120 cms (Figura 20a), mientras que en la parte baja del canal, este valor máximo es de 70 cms (Figura 20b).

Por otra parte, las inundaciones en diferentes partes del canal también se pueden observar, de una manera más efectiva, mediante los perfiles topográficos y de profundidad del flujo, como se identifica en la figura 21. Para estos perfiles de inundación se hace un análisis similar al anterior, en donde se realizan perfiles en las partes alta y baja del canal y se concluye que sobre la primera habrá inundaciones de mayores profundidades que sobre la segunda. Además, se hace una comparación entre los tres escenarios, en donde el pequeño e intermedio tienen valores de profundidad similares, con diferencias de menos de 1 m, mientras que en el escenario grande se observan valores mucho más altos, que concuerdan con

que este es un flujo de dimensiones mucho mayores que los escenarios anteriores. De igual manera, es importante resaltar que el valor que muestra el perfil de inundación depende directamente de la zona exacta en el que se haya realizado.

Además, la diferencia de profundidades máximas que alcanzan los tres escenarios es la razón por la cual se realizaron diferentes mapas de amenaza por máxima profundidad (Figura 22). De esta manera, la profundidad máxima que alcanzan los flujos correspondientes al escenario pequeño es menor que la que alcanzan los flujos del escenario intermedio y, evidentemente, estas dos son mucho menores que las que se presentan el escenario grande. En el escenario pequeño se observan profundidades máximas de 3 m, teniendo en cuenta que en la población de San Marcos son más frecuentes profundidades de 0.5 a 1 m; para el escenario intermedio las profundidades máximas son de 3.5 m y, a diferencia del escenario pequeño, en San Marcos se presentan valores de 1 a 3.5 m; estos dos escenarios tienen una mayor ocurrencia, ya que provienen de lluvias orogénicas, las cuales suceden con alta frecuencia durante la temporada de lluvias. En el escenario grande se presentan profundidades máximas de 13 m, valor mucho mayor que los dos escenarios anteriores, pero a su vez, con una ocurrencia más baja.

El daño a una infraestructura producto de un lahar depende de las características dinámicas de este, entre las cuales está la profundidad (Jenkins et al., 2015). En los tres escenarios posibles se presentan profundidades que pueden llegar a generar daños en viviendas y edificios dando como resultado pérdidas económicas y, en algunos casos, pérdida de vidas humana. Es así como, a partir de estos mapas, para el escenario pequeño se presenta una amenaza media, ya que en la zona poblada se observan valores de profundidad de 0.5 a 2 m; a diferencia de los escenarios intermedio y grande, en donde en el primero se observan rangos entre 0.5 y 3.5 m, y en el segundo de 4 a 13 m sobre el área de San Marcos, los cuales se clasifican en amenaza media a muy alta, teniendo en cuenta que a mayor profundidad, se presentarán mayores daños. Es importante resaltar que los valores de profundidad observados sobre la población de San Marcos son valores que

pueden generar desde inundaciones en las viviendas, hasta graves daños a la infraestructura y a las vidas de los seres humanos que allí habitan.

De igual manera, es importante resaltar que San Marcos puede ser afectado por un evento de gran magnitud como un huracán; a partir de esto, surge el mapa de presión de impacto (Figura 23), el cual muestra valores en kPa a lo largo de la barranca, con el fin de definir el daño a la infraestructura que causaría un evento de este tipo. Aunque esta variable depende de diferentes factores como la estructura de las edificaciones, el material de estos, la altura y densidad de las paredes (Prieto et al., 2018), además de las propiedades del flujo como la concentración de sedimentos y la velocidad, se hace un análisis somero a partir de los datos que registró el huracán Patricia en la barranca La Lumbre. Según Thouret et al. (2020), una ventana de cristal convencional puede ser destruida con una fuerza tan baja como 1 o 2 kPa, y una puerta de madera con una de 3 kPa, por lo tanto, las aberturas de las edificaciones son los puntos más débiles en estas; los valores que registra la fuerza de impacto de un lahar provocado por lluvias asociadas a un huracán sobre San Marcos son mucho mayores, por lo tanto todas las construcciones o partes de estas que estén hechas de materiales como cristal y madera van a ser afectadas por un evento de esta magnitud. Además, al hacer un análisis de estas presiones, teniendo en cuenta que la profundidad que alcanzaría un evento tan grande sobre el área construida sería mayor a 4 m y los valores en esta zona alcanzan el rango entre 800 y 1000 kPa, la infraestructura se vería altamente afectada debido a que la inundación con relación a la presión de impacto ejercida sería suficiente para su destrucción parcial o total; del mismo modo es importante tener en cuenta que se debe hacer un estudio mucho más detallado, como análisis de datos de campo y uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial, para conocer detalladamente factores como el tipo y material de la infraestructura, con el fin de valorar de manera más precisa los daños que se generarían con la variabilidad de presiones de impacto y sus alteraciones económicas sobre la población de San Marcos.

Por otra parte, en el mapa de amenaza por máxima inundación (Figura 24) se pueden observar los tres escenarios posibles y, de manera gráfica, muestra el área inundada por cada uno de estos. Para el escenario pequeño, la inundación no supera el área abarcada por el canal, mientras que el escenario intermedio se inunda activando canales laterales; el desborda de los canales y afecta un área de inundación mucho mayor que los dos primeros escenarios. De igual manera, se hace un análisis cuantitativo del área de la infraestructura afectada por los lahares; esta valoración genera una visión del porcentaje de área total de afectación por cada uno de los escenarios.

Los valores de área se generaron a partir de SIG con los polígonos de San Marcos y los tres escenarios, en donde San Marcos cuenta con un área total de  $\sim 781.935$  m<sup>2</sup>. El escenario pequeño abarca un área de  $\sim 372.031$  m<sup>2</sup>, de la cual  $14.306$  m<sup>2</sup> afectan la población, el escenario intermedio tiene un área de  $\sim 831.093$  m<sup>2</sup>, en donde  $29.043$  m<sup>2</sup> tienen influencia sobre San Marcos; se puede evidenciar una diferencia de área afectada entre el escenario pequeño e intermedio, siendo razonable que el intermedio presente mayor área de inundación. Para el escenario grande, que presenta un área total de  $\sim 1.979.843$  m<sup>2</sup>,  $71.769$  m<sup>2</sup> afectan la infraestructura. De esta manera, en términos de porcentaje, el centro habitado se ve afectado por los escenarios pequeño, intermedio y grande en 1,82%, 3,71% y 9,17%, respectivamente. Es determinante que el escenario grande represente mayor área de afectación para la población que los escenarios pequeño e intermedio; aun así, los tres escenarios representan amenaza para la población de San Marcos.

Además, en la figura 25 se muestra el mapa de probabilidad de inundación de la zona de estudio, en la cual se observa la población de San Marcos. Se dividen cuatro intervalos de porcentaje, en donde el color verde oscuro representa una baja probabilidad de inundación (0% - 25%) y esta puede estar asociado con las áreas inundadas por el escenario grande, ya que la ocurrencia de un evento de esta magnitud es menor que la de los otros dos escenarios. En colores verde claro y naranja se representa la probabilidad media (25% - 50% y 50% - 75%),

respectivamente), que se puede visualizar en la parte más baja del canal y puede estar asociado tanto al escenario grande como al escenario intermedio y son los que incluyen esta área como distancia máxima que alcanzan los lahares. Por último, se observa una línea roja correspondiente a una probabilidad alta de inundación (75% - 100%), esto coincide con el canal principal de la barranca La Arena, el cual será inundado sin importar la magnitud del evento que se presente, siempre y cuando las características (intensidad, R3, etc) de la lluvia sean propicias para ser mecanismo de disparo de lahar.

Finalmente, se determina que, con base en los dos mapas finales (máxima inundación y probabilidad), la amenaza por inundación de la población de San Marcos es de media a baja. Asimismo, se evidenció que FLO-2D es un instrumento exitoso para delimitar zonas de inundación y para generar diferentes escenarios de lahar, no solo relacionados con su volumen o magnitud, sino también teniendo en cuenta las concentraciones de sedimentos y reologías que influyen en las áreas propensas a este fenómeno. Además, los resultados pueden ser base para acciones locales de reducción del riesgo.

## **11. Conclusiones**

- Las características de las lluvias, como lluvia acumulada, duración, intensidad y R3, son determinantes para que se genere escurrimiento superficial y erosión con la formación de lahares, o para que el mayor volumen de agua se infiltre en el suelo. La relación entre lluvia acumulada y duración, la cual establece la intensidad, es uno de los factores más importantes para intuir si un evento de lluvia sería mecanismo de disparo de lahar o no.
- Aunque los datos que se utilizaron para realizar las simulaciones no corresponden a la barranca La Arena, es importante tenerlos en cuenta y hacer un análisis frente a los posibles eventos que pueden suceder en esta zona y, de esta manera, hacer un uso adecuado del suelo y una oportuna evaluación y mitigación del riesgo.

- Los mapas de amenaza fueron realizados a partir de las simulaciones numéricas y evaluados en cada uno de los escenarios, por lo tanto, cada uno brinda diferente tipo de información debido a los parámetros que los caracterizan, razón por la cual se realiza un análisis individual de cada uno de ellos.
- Para una mejor interpretación de los datos, es necesario realizar un estudio más detallado de la infraestructura de la población, ya que solo se tuvieron en cuenta presiones, profundidades y áreas, de tal forma que, para disminuir el sesgo en el análisis, es importante tener en cuenta los tipos de materiales, alturas y condiciones de la infraestructura.
- El programa FLO-2D es un software efectivo para la simulación de lahares y zonas inundables, ya que permite introducir parámetros reológicos del flujo y concentración de sedimentos, y no solamente genera áreas de inundación sino velocidades y profundidades de los flujos.
- La población de San Marcos y su infraestructura se ven afectadas por lahares inducidos por lluvias orográficas y, a su vez, podrían ser amenazadas por eventos de huracán. Teniendo en cuenta que las primeras lluvias son eventos muy comunes entre los meses de mayo y octubre, que la ocurrencia de eventos de gran magnitud es menor y que la barranca La Arena cruza el centro de esta población, la susceptibilidad a inundación de la población de San Marcos se clasifica como media a baja.

## 12. Referencias bibliográficas

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., Hunt, R. J., 2015. Applied Groundwater Modelinf (Second Edition). Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 117-180.
- Andrades, M., Múñez, L., 2012. Fundamentos de la Climatología. Universidad de La Rioja. España.
- Anthes, R. A., 1982. Tropical Cyclones: Their Evolution, Structure and Effects, American Meteorological Society, Boston.
- Arámbula, R., Reyes, g., Vargas, D.M., González, M., Navarro, C., Martínez, A., Ramírez, A., 2018. Seismic monitoring of effusive-explusive activity and large lava dome collapses during 2013-2015 at Volcán de Colima, Mexico. Journal of Volcanology ang Geothermal Research, 351, 75-88.
- Barclay, J., Alexander, J., Susnik, J., 2007. Rainfall-induced lahars in the Belham Valley, Montserrat, West Indies. School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich. Journal of the Geological Society, London, 164, 815-827.
- Borselli, L., 2005. DISRAINS usage 1.3, CNR-IRPI, Documentation versión 0.1, Italy.
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., Ritsema, C.J., 2020. Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. Earth-Science Reviews, 204, 103-171.
- Caballero, L., Capra, L., 2014. The use of FLO-2D numerical code in lahar hazard evaluation at Popocatépetl volcano: a 2001 lahar scenario. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14, 3345-3355.
- Caballero, L., Capra, L., Vázquez, R., 2016. Evaluating the Performance of FLO-2D for Simulating Past Lahar Events at the Most Active Mexican Volcanoes: Popocatépetl and Volcán de Colima. Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support, 179-189.
- Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Gavilanes, J.C., Norini, G., Sarocchi, D., Caballero, L., Cortés, A., 2010. Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima,

- Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process. *Journal and Volcanology Geothermal Research*, 189, 105-117.
- Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez, V.H., Arámbula, R., 2018. Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall runoff modeling seismic and video monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 781-794.
  - Capra, L., Gavilanes, J. C, Bonasia, R., Saucedo, R., Sulpizio, R., 2015. Re-assessing volcanic hazard zonation of Volcán de Colima, México. *Natural Hazards*, 76 (1), 41-61.
  - CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001. La prevención de los desastres en México. Secretaría de Gobernación, 35.
  - CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2019. Ciclones tropicales.
  - CIOH, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 2020. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe.phptextLaZonadeConfluenciaIntertropical,loshemisferiosnorteysur>.
  - CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2012. Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2009, 2010 y 2011 en México.
  - CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2019. Reporte Anual del 2019. Servicio Meteorológico Nacional. México.
  - Cortés, A., Garduño, V. H., Navarro, C., Komorowski, J. C., Saucedo, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., 2005. Carta geológica del Complejo Volcánico de Colima, Geología del Complejo Volcánico de Colima. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras 10, escala 1:100.000, mapa con contexto explicativo, 37.
  - Costa, J.E., 1984. Physical Geomorphology of Debris Flows. *Developments and Applications og Geomorphology*, Springer, 268-317.
  - Cruz, J., 2014. El comportamiento de la temperatura ante el cambio climático en Jalisco y en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Unidad regional de Occidente, Gobierno de la República de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT.

- Davila, N., Capra, L., Gavilanes, J.C., Varley, N., Norini, G., Gómez, A., 2007. Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, 127-141.
- Dunkerley, D., 2008. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22, 5024-5036.
- Ferrari, L., Valencia, M., Bryan, S., 2005. Magmatismo y tectónica de la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3), 343-378.
- García, E., 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 50, 67-76.
- Gómez, A., Orozco, M., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3), 227-283.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017. *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*, Bogotá, 110.
- INEGI, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. San Marcos, Jalisco, México. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=14>.
- Inzunza, J., 2019. *Meteorología descriptiva*. Universidad Santiago de Chile.
- Jenkins, S., Philips, J., 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* 77-75.
- Lavigne, F., Thouret, J. C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A., 2000. Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 423-456.
- Luna, C., 1979. *Atlas de huracanes en el Océano Pacífico y en el Océano Atlántico*. INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Secretaría de Programación y Presupuesto.

- Macías, J. L., Saucedo, R., Gavilanes, J. C., Varley, N., Velasco, S., Bursik, M. I., Vargas, V., Cortes, A., 2006. Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcán de Colima y sus perspectivas futuras, *GEOS*, 25, 340-351.
- Méndez, J., Návar, J., González, V., 2007. Análisis de tendencias de precipitación en México (1920 – 2004). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 65, 38-55.
- Murcia, H., 2008. Depósitos de lahar del Complejo Volcánico Tacaná y depósitos aluviales en el abanico de Tapachula, Chiapas, México (tesis de posgrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
- NOAA, Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera, 1999. Hurricane basics, una guía de preparación.
- NOAA, Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera, 2013. Ciclones Tropicales, una guía de preparación.
- Norini, G., Capra, L., Gropelli, G., Agliardi, F., Pola, A., Cortes, A., 2010. Structural Architecture of the Colima Volcanic Complex. *Journal of Geophysical Research*, 115.
- O'Brien, J., 1986. Physical processes, rheology and modeling of mudflows, Doctoral dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- O'Brien, J., 2001. FLO-2D users manual, Nutrioso, Arizona.
- O'Brien, J., 2009. FLO-2D Software (versión PRO 2009). Windows: Nutrioso. FLO-2D Software, Inc.
- O'Brien, J., Julien, P., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (8), 877-887.
- O'Brien, J., Julien, P., Fullerton, W., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *J. Hydraul. Eng.*, 119, 244–261.
- Patiño, M., Meyer, A., Galicia, M., Lezama, C., Lara, B., 2009. Zona de mayor afectación en el Puerto de Manzanillo, Colima, México, por eventos hidrometeorológicos intensos y su periodicidad, 47, 47-60.
- Paton, D., Smith, L., Daly, M., 2008. Risk perception and volcanic hazard mitigation: Individual and social perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 172, 179–188.

- Pérez, L., Martínez, C., Farfán, L., Tereshchenko, I., 2016. Pronóstico y precipitación de los ciclones Jova (2011), Manuel (2013) y Patricia (2015) que afectaron al estado de Jalisco. *Teoría y Praxis*, 10-30.
- Prieto, J. A., Journeay, M., Acevedo, A. B., Arbeláez, J. D., Ulmi, M., 2018. Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Engineering Geology*, 239, 144-157.
- Rodríguez, J., 2017. Los desastres recurrentes en México: El huracán Pauline y la tormenta Manuel en Acapulco, Guerrero. *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social "Disertaciones"*, 133-152.
- Salazar, A., Loza, L., Gómez, J., 2010. Características climáticas generales en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). Universidad de Guadalajara, México.
- Schilling, S., 1998. LaharZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation Hazard zones. Open File Reported, United States Geological Service, 98-638.
- SEMADET, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, 2020. <http://siga.jalisco.gob.mx/>.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010. Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales, edición 2010.
- Smith, G.A, Fritz, W.J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation, *Geology*, 17, 375-376.
- Suárez, G., García, V., Gaulon, R., 1994. Active crustal deformation in the Jalisco block, Mexico: evidence for a great historical earthquake in the 16th century. *Tectonophysics*, 234 (1-2), 117-127.
- Thouret, J. C., Antoine, S., Magill, C., Ollier, C., 2020. Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews*, 201, 103003.
- Torres, M., Cardoso, E. A., Díaz, R., Gutiérrez, J. C., 2006. Proyecto de estudios de peligros naturales en municipios de la planicie costera del Estado de Chiapas. Atlas de peligro de la ciudad y municipio de Acapetahua, Chiapas. Servicio

Geológico Mexicano (SGM) – Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) – Secretaría de Seguridad Pública – Subsecretaría de Protección Civil.

- Universidad de Colima, Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos. <https://portal.ucol.mx/cueiv/Volcan-colima.htm>.
- Williams, R., Stinton, A. J., Sheridan, M. F., 2008. Evaluation of the Titan-2D two-phase flow model using an actual event: Case study of the 2005 Vazcum Valley Lahar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 760-766.
- Zaragoza, G., Caballero, L., Capra, L., Nieto, A., 2020. Lahares secundarios en el volcán Popocatepetl: El lahar Nexpayantla del 4 de febrero, 2010. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37 (2), 121-134.