



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

**Facultad de Ciencias e Ingenierías  
Departamento de Tecnología**

**Simulación numérica de la avalancha del volcán Mombacho que generó las  
Isletas en el lago Cocibolca.**

**Tesis Monográfica presentada como requisito final para optar al título de  
Ingeniero Geólogo**

**Elaborado por:**

Br. Wendy Suyen Santana

**Tutor:**

Msc. Francisco Espinoza

**Asesor:**

PhD. José Armando Saballos

**Managua, junio 2020**

## DEDICATORIA

*A Dios padre por la bendición de culminar otra etapa en mi vida.*

*A mi madre Yadira Suazo por ser el máximo pilar en este largo camino, por haberme brindado el tesoro más valioso que es la educación para forjar un futuro mejor, por alentarme a cumplir mis metas a pesar de las adversidades.*

*A mi hermana Jorlyn Santana por su cariño y motivarme a realizar cada una de mis metas.*

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios padre por ser mi sustento en todo este tiempo, por bendecirme en cada momento con sabiduría y entendimiento, dándome la capacidad y fortaleza de culminar mi monografía.*

*A mi tutor Msc. Francisco Espinoza por sus apreciables comentarios y sugerencias en el transcurso de la realización de este trabajo.*

*A mi asesor PhD. José Armando Saballos por compartir conmigo sus valiosos conocimientos, por sus consejos, tiempo y buena voluntad de guiarme siempre en la elaboración de esta monografía.*

*Agradezco profundamente al Ing. Luis Corea por sus valiosos consejos y por toda la ayuda incondicional que me brindo.*

*A todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron en la elaboración de este trabajo, muchas gracias.*



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN - MANAGUA

Managua, Nicaragua 8 de junio de 2020

Msc. Elim Campos Pérez

Director departamento de Tecnología

Facultad de Ciencias e Ingeniería UNAN-Managua

Su despacho

Estimado Maestro Campos, el motivo de la presente es para notificar la culminación del documento de tesis monográfica **“Simulación numérica de la avalancha del volcán Mombacho que genero las isletas en el lago Cocibolca”**, elaborado por la estudiante Wendy Suyen Santana con número de carnet 14046508, quien cumplió de manera satisfactoria las observaciones y redacción del documento. Por lo antes mencionado doy el visto bueno, para que continúe en el proceso de presentación.

Sin otro cometido, me despido deseándole bendiciones en su vida.

Atentamente,

---

Msc. Francisco Espinoza

Coordinador de Ingeniería Geológica

## RESUMEN

Las avalanchas de escombros volcánicos son uno de los procesos geológicos más devastadores y representan un gran peligro para las personas que habitan cerca de zonas volcánicas. El volcán Mombacho pertenece a la cadena volcánica cuaternaria de Nicaragua, posee una elevación de 1,345 msnm, a lo largo de la historia se han identificado dos avalanchas de escombros en el edificio volcánico, una de ellas origino lo que hoy en día se conoce como “Isletas de Granada”.

Se recreó la avalancha del flanco Noreste del volcán, mediante una simulación numérica, tomando datos de la morfología actual del Mombacho; utilizando el software Scoops3D se obtuvieron resultados de los factores de seguridad con un rango de 3-100, que permite clasificarlo como estable y se calculó la posible cantidad de volumen de material que puede desprenderse al suceder un evento similar en las laderas del edificio, a su vez se recrea una nueva avalancha en el mismo flanco con el programa TITAN2D, identificando las comunidades que se encuentran dentro del diámetro de la avalancha de escombros.

La distribución geológica del flanco Noreste del volcán Mombacho está compuesta por productos de la acción externa denominados unidad de depósitos recientes (Shea et al., 2007), (Pilato, 2005), (Avellán, 2004). Se realizó un análisis morfológico del área destacando tres sistemas de fallas con orientación NE-SO, N-S, y algunas NW-SE afectando los flancos del volcán.

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| <b>CAPITULO I</b> .....   | 1  |
| <b>1.1 INTRODUCCIÓN</b> .....   | 1  |
| <b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....   | 2  |
| <b>1.3 JUSTIFICACIÓN</b> .....  | 3  |
| <b>1.4 OBJETIVOS</b> .....  | 4  |
| 1.4.1 Objetivo general.....   | 4  |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....  | 4  |
| <b>CAPITULO II</b> .....  | 5  |
| <b>2.1 MARCO REFERENCIAL</b> .....  | 5  |
| 2.1.1 Antecedentes.....   | 5  |
| 2.1.2 Localización y generalidades del área de estudio .....                          | 8  |
| 2.1.2.1 Ubicación.....  | 8  |
| 2.1.2.2 Vías de acceso .....  | 8  |
| 2.1.2.3 Clima .....   | 9  |
| 2.1.2.4 Relieve .....   | 9  |
| 2.1.2.5 Hidrología.....   | 10 |
| 2.1.3 Marco teórico.....  | 12 |
| 2.1.3.1 Avalanchas de escombros volcánicos.....                                       | 12 |
| 2.1.3.1.1 Definición .....  | 12 |
| 2.1.3.1.2 Tipos de depósitos de avalanchas de escombros.....                          | 12 |
| 2.1.3.1.3 Características .....   | 13 |
| 2.1.3.1.4 Peligro por avalanchas de escombros volcánicos .....                        | 13 |
| 2.1.3.2 Mecanismos de debilitamiento .....  | 15 |
| 2.1.3.2.1 Vesicularidad y textura de los materiales .....                             | 15 |
| 2.1.3.2.2 Características morfológicas de edificios volcánicos.....                   | 16 |
| 2.1.3.2.3 Factores tectónicos que influyen al colapso de estructuras volcánicas ..... | 17 |
| 2.1.3.2.4 “Spreading”, alteración hidrotermal y otros factores .....                  | 17 |
| 2.1.3.3 Mecanismos desencadenantes en los edificios volcánicos .....                  | 18 |
| 2.1.3.3.1 Mecanismos por actividad magmática .....                                    | 18 |
| 2.1.3.3.2 Mecanismos de choque.....   | 19 |

|   |    |
|---|----|
| 2.1.3.3.3 Mecanismos gravitacionales .....  | 19 |
| 2.1.3.4 Lahares .....   | 21 |
| 2.1.3.4.1 Definición .....  | 21 |
| 2.1.3.4.2 Origen de los Lahares.....  | 21 |
| 2.1.3.4.3 Peligro por Lahares.....  | 22 |
| 2.1.3.5 Método Bishop simplificado en 3D usado por Scoops3D .....                 | 23 |
| 2.1.3.6 Método físico matemático de TITAN2D .....                                 | 24 |
| 2.2 Marco geotectónico.....   | 27 |
| 2.2.1 Geotectónica de América Central.....  | 27 |
| 2.2.2 Geología Regional de Nicaragua .....  | 28 |
| 2.2.3 Geología regional del Volcán Mombacho .....                                 | 30 |
| 2.2.4 Cadena volcánica Cuaternaria de Nicaragua .....                             | 31 |
| 2.3 HIPÓTESIS .....   | 32 |
| CAPITULO III .....  | 33 |
| 3.1 DISEÑO METODOLOGICO .....   | 33 |
| 3.1.1 Tipo de estudio.....  | 33 |
| 3.1.2 Área de estudio .....   | 33 |
| 3.1.3 Población y muestra .....   | 33 |
| 3.1.4 Matriz de operacionalización de variables.....                              | 34 |
| 3.1.5 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información..... | 35 |
| 3.1.5.1 Consulta o revisión bibliográfica.....                                    | 35 |
| 3.1.5.2 Fotointerpretación .....  | 35 |
| 3.1.5.3 Etapa de campo.....   | 35 |
| 3.1.5.4 Equipo de medición en campo.....  | 36 |
| 3.1.6 Plan de análisis y procesamiento de datos e información.....                | 36 |
| 3.1.6.1 Elaboración de mapa base.....   | 36 |
| 3.1.6.2 Procesamiento e interpretación de los datos obtenidos en campo .....      | 37 |
| 3.1.6.3 Simulación numérica de la avalancha de escombros “Las isletas”            |    |
| 41  |    |
| CAPITULO IV.....  | 42 |
| 4.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                      | 42 |
| 4.1.1 Morfología .....  | 42 |
| 4.1.1.1 Mapa altimétrico.....   | 42 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 4.1.1.2    | Mapa topográfico .....  | 44 |
| 4.1.1.3    | Mapa de relieve sombreado.....  | 46 |
| 4.1.2      | Geología local.....   | 48 |
| 4.1.2.1    | Descripción del Volcán Mombacho.....  | 48 |
| 4.1.2.2    | Depósito de avalancha de escombros Las Isletas (NE).....                                | 49 |
| 4.1.2.2.1  | Unidad rica en bloques.....   | 49 |
| 4.1.2.2.2  | Unidad con matriz de bloques.....   | 49 |
| 4.1.2.2.3  | Unidad basal rica en Pómez .....  | 50 |
| 4.1.2.2.4  | Unidad de materiales re-trabajados .....  | 50 |
| 4.1.2.2.5  | Unidad basal rica en Lapilli.....   | 51 |
| 4.1.3      | Mecanismos del colapso.....   | 53 |
| 4.1.4      | Simulación numérica .....   | 54 |
| 4.1.4.1    | Mapa de factor de seguridad- volcán Mombacho .....                                      | 54 |
| 4.1.4.2    | Mapa de volumen potencial- volcán Mombacho .....  | 54 |
| 4.1.4.3    | Mapa de zonificación de peligro por avalanchas de escombros en el volcán Mombacho ..... | 57 |
| 4.1.4.4    | Simulación de la avalancha de escombros Las Isletas del volcán Mombacho .....           | 59 |
| CAPÍTULO V | .....   | 62 |
| 5.1        | CONCLUSIONES .....  | 62 |
| 5.2        | RECOMENDACIONES .....   | 64 |
| 5.3        | BIBLIOGRAFÍA .....  | 65 |



## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- Mapa de ubicación del área de estudio .....  | 11 |
| Figura 2- Mecanismos que propician el colapso de un flanco.....  | 20 |
| Figura 3- Lahar en el volcán Casita, 1998 .....  | 22 |
| Figura 4- Mapa tectónico de América Central .....  | 28 |
| Figura 5- Mapa de provincias geológicas de Nicaragua, .....  | 30 |
| Figura 6- Cadena volcánica de Nicaragua.....   | 31 |
| Figura 7- Vista en perspectiva de una cuadrícula del modelo digital de elevación (DEM) que muestra una falla potencial con la masa eliminada .....                         | 37 |
| Figura 8- Mapa altimétrico.....  | 43 |
| Figura 9- Mapa topográfico .....   | 45 |
| Figura 10- Mapa de relieve sombreado.....  | 47 |
| Figura 11- Mapa Geológico del depósito de avalancha de escombros “Las Isletas”   | 52 |
| Figura 12- Factor de seguridad para el volcán Mombacho obtenido por el método simplificado de Bishop .....   | 55 |
| Figura 13- Mapa de volúmenes potenciales a colapsar del volcán Mombacho .....  | 56 |
| Figura 14- Mapa de zonificación por avalancha de escombros.....  | 58 |
| Figura 15- Simulación numérica obtenida por TITAN 2D, el contorno en rojo muestra el resultado de la simulación realizada .....  | 59 |
| Figura 16- Mapa de cobertura de una nueva avalancha de escombros desencadenada en la cárcava del flanco noreste del volcán Mombacho, simulado con el software TITAN2D..... | 61 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1- Matriz de operacionalización de variables..... | 34 |
| Tabla 2- Parámetros de entrada Scoops3D.....            | 40 |

## CAPITULO I.

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El volcán Mombacho es un estratovolcán escarpado localizado en el extremo Noroeste del Lago Cocibolca en el segmento SE de la cadena volcánica de Nicaragua, tiene una altura de 1,345 msnm y unos 50 km<sup>3</sup> de volumen. Se caracteriza por presentar una morfología suave, laderas de poca pendiente y se asienta sobre rocas sedimentarias del pacífico, seguido de material volcánico de las Sierras y posiblemente en los depósitos superiores de ignimbritas de Apoyo posteriores, que se acumularon antes del desarrollo de una base ancha de conos subsidiarios donde creció el Mombacho (Comisión Nacional de Energía, 2001)

Se conoce muy poco en relación a la actividad volcánica del volcán Mombacho, debido a que el volcán no ha estado activo desde hace miles de años, sin embargo, destacan eventos como inestabilidad de laderas. A lo largo de la historia en el volcán Mombacho se conoce de la ocurrencia de avalanchas en sus laderas, se cree que la primera fue en el flanco Noreste conocida como “las isletas”, seguidamente ocurrió la del flanco Sur denominada “el cráter (Vallance, Schilling y Devoli, 2001).

El volcán Mombacho tiene el potencial de producir nuevos deslizamientos de tierra, flujos de escombros, flujos de lodo y rocas, estos últimos son conocidos como “lahares”, cabe destacar que en la actualidad se observa la ocurrencia de flujos de detritos en el flanco Sur durante la época de invierno, los que probablemente podrían conllevar a una desestabilización a largo plazo.

Por lo anterior el presente trabajo se enfoca en crear simulaciones numéricas de la primera avalancha originada en la ladera Noreste del volcán Mombacho, responsable del origen de las isletas en el lago Cocibolca, con el fin de establecer los parámetros numéricos que permiten reproducir la avalancha y así poder

utilizarlos para evaluar futuros escenarios de peligros por avalanchas en este volcán y/o implementar esta misma metodología a otros intereses de la región.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A través de los años, reconocidos científicos han realizado diversos estudios en el Volcán Mombacho (Van Wyk de Vries y Francis, 1997; Vallance, et al., 2001; Shea et al., 2007; Stansell, 2013). Estos autores han datado y caracterizado geológicamente los diferentes eventos volcano-tectónicos del complejo volcánico Mombacho, destacando los colapsos en los flancos Noreste y Sur.

La evaluación de los colapsos de las laderas Noreste y Sur del volcán Mombacho por métodos probabilísticos no ha sido realizada. Considerando que los resultados de este pueden aportar en la identificación de escenarios de riesgo, siendo un insumo fundamental para la identificación de zonas expuestas a fenómenos de inestabilidad de laderas y el impacto que la ocurrencia de estos puede generar para la población que habita en las cercanías del área.

El presente trabajo contribuye a las evaluaciones de riesgo a través de métodos probabilísticos con apoyo de nuevas tecnologías. Lo anterior conduce al planteamiento de un problema fundamental que abordará la presente investigación, el cual es: ¿la simulación numérica de avalanchas en el volcán Mombacho permitirá disponer de escenarios probabilísticos puntuales del riesgo por inestabilidad de laderas del volcán Mombacho?

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a datos históricos la última avalancha fue en el flanco Sur del volcán Mombacho en el año 1570 durante una intensa tormenta de lluvia y viento, aproximadamente 400 personas fallecieron sepultando por completo un pueblo indígena llamado Mombacho, que hasta la fecha de hoy se desconoce su ubicación exacta, supone que el pueblo se encontraba en lo alto del volcán o muy cerca del cráter abierto con dirección Sur (Shea, Van Wyk de Vries y Pilato, 2007).

Los diversos estudios desarrollados en el área de interés se han enfocado en: exploración geotérmica, geotectónica, riesgo y monitoreo volcánico, medio ambiente y caracterización de mecanismos de inestabilidad de laderas. Sin embargo, hoy en día, las geo ciencias se apoyan de nuevas metodologías y técnicas para el análisis y evaluación de riesgos.

La presente investigación propone una evaluación de riesgo a través del análisis de métodos matemáticos probabilísticos del flanco Noreste del volcán Mombacho, análisis que puede brindar y/o aportar a la evaluación de riesgos, a su vez vendría a proporcionar una valiosa herramienta para la planificación urbana, evaluadores de amenaza y vulnerabilidad, ya que proporciona un escenario probabilístico de una avalancha en algún punto crítico en el volcán Mombacho.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Simular numéricamente la avalancha que generó las isletas en el lago Cocibolca mediante el método de Bishop y la dinámica de fluidos granulares.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Describir la geología del extremo NE del volcán Mombacho para conocer los factores condicionantes y desencadenantes de fenómenos de avalancha de escombros en el área volcánica.
2. Realizar un análisis de la morfología para simular numéricamente la avalancha de escombros del flanco NE, a partir de información geológica existente en el área de estudio.
3. Zonificar el peligro por avalanchas de escombros en el volcán Mombacho para prevenir y mitigar pérdidas humanas y materiales.

## CAPITULO II

### 2.1 MARCO REFERENCIAL

#### 2.1.1 Antecedentes

Fundación Cocibolca (2017), ejecutó un plan de manejo de la Reserva natural volcán Mombacho como parte de la estrategia para consolidar la Reserva como área protegida. Presenta un detalle de programas, proyectos y actividades propuestas a ejecutarse para consolidar el trabajo en el área, que incluyen la delimitación de una nueva zona de Amortiguamiento y una nueva Sub-zona debajo de los 850, que harán con la aprobación de este plan, de acuerdo al Arto. 24 de la Ley 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.

Herrera (2017), actualizó la carta geológica del área de las aguas termales del Sur del volcán Mombacho y la caracterización geoquímica de los manantiales que afloran, enfocado a prospección de recursos geotérmicos y llevando a cabo muestreos de rocas y muestreo de aguas en la zona. Identificó tres grupos de aguas: cloruradas cálcicas – magnésicas y cloruradas sódicas, aguas bicarbonatadas cálcicas de las cuales concluyó que en su mayoría corresponden a aguas geotérmicas calentadas por vapor y algunas de ellas presentan un proceso de mezcla con aguas más superficiales.

Martínez, L y Martínez K, (2017) determinaron la presencia de arsénico en los acuíferos de la zona Sur del volcán Mombacho definiendo la calidad físico - química de las aguas subterráneas y superficiales del área, además de establecer las especies predominantes de arsénico en el agua subterránea basadas en mediciones temperatura (T °C), conductividad eléctrica (EC), pH, Eh.

Stansell (2013), realizó un estudio en sedimentos lacustres de lagunas formadas sobre los depósitos de las dos grandes avalanchas del Mombacho y dató materia orgánica presente por radiocarbono. Una edad basal de la laguna La Cancha indica que la avalancha de escombros del Noreste (Las Isletas) ocurrió en algún momento antes de 140 a 345 d.C.; Las edades basales de las lagunas Blanca y Verde indican que la avalancha de escombros del Sur (El Cráter) ocurrió antes de ~270 a 650 d.C. Hay fuertes evidencia de que los mecanismos variaron para la desestabilización de cada flanco, Posiblemente la influencia de un sistema hidrotermal conduce primero a una falla estructural más profunda en el sustrato para producir el colapso del sector Las Isletas, progresando a un nivel superior de desestabilización dentro del edificio y el colapso de “El Cráter”.

Shea et al., (2007), definieron la litología, estructura y emplazamiento de dos depósitos de avalancha de escombros con orígenes y materiales contrastantes del Cuaternario–Holoceno en el Volcán Mombacho, Nicaragua. Una comparación clara es posible porque ambos eventos fueron emplazados en topografía similar casi plana, es decir, en pendientes de 3°. Los materiales involucrados en cada evento fueron similares, excepto en su estado de alteración y en la cantidad de sustratos inicialmente incluido en el colapso.

Garofalo et al., (2006), mostraron que el Mombacho es un volcán profundamente diseccionado que pertenece a la cadena volcánica Cuaternaria de Nicaragua. El cráter de colapso histórico del Sur (El Cráter), actualmente alberga un campo de fumarolas con una temperatura máxima de 121 ° C.

Pilato (2005), expuso el estudio de avalanchas de escombros que han ocurrido en el Volcán Mombacho. Se enfocó en el mecanismo de deformación del sustrato para el caso Mombacho, importante para medir y advertir de algún peligro por avalancha de escombros, explica que debido la asimetría del Mombacho sus colapsos se dirigieron sobre pequeños spreading relacionado con graben, en el caso de la avalancha “Las Isletas” fue iniciada por colapso del anticlinal basal

relacionada al spreading, mientras que la formación de la avalancha “El Cráter” es atribuida más a un importante factor, que es la preferente ubicación de un sistema hidrotermal desarrollado que junto con el fracturamiento intenso por las tensiones del spreading, beneficiando al colapso del flanco.

Avellán (2004) realizó un análisis de los factores condicionantes que jugaron un papel muy importante en la inestabilidad de la ladera Noreste y como consecuencia la formación de las Isletas de Granada. El estudio incluyó un cartografiado geomorfológico donde determina las diferentes formas según su origen.

Vallance et al., (2001), presentaron un informe que describe los peligros de deslizamientos de tierra y lahares en general, analizan los peligros potenciales de futuros deslizamientos de tierra y lahares. El volcán tiene el potencial de producir deslizamientos de tierra y flujos de escombros, que podrían inundar áreas pobladas cercanas como la Ciudad de Granada, poblados que se ubican al SE de las Isletas de Granada y Península Asese.

Comisión Nacional de Energía., (2001): llevaron a cabo una evaluación del área de Masaya – Granada – Nandaime, dicha investigación incluida en el “Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua”. Elaboraron un mapa geológico – estructural y vulcanológico del área, en el cual identificaron estructuras de fallas, zonas de deslizamientos, flujos volcánicos y las diversas unidades litológicas.



## 2.1.2 Localización y generalidades del área de estudio

### 2.1.2.1 Ubicación

El volcán Mombacho está ubicado a 51.2 km de la Ciudad de Managua, Departamento de Managua y a 10 km de la ciudad de Granada, Departamento de Granada, el área de estudio se sitúa en las hojas topográficas: Isla Zapatera (3051-III) y Granada (3051-IV) publicadas por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). *Ver Figura N°1*

| <b>Vértices del área de estudio</b> |               |
|-------------------------------------|---------------|
| <b>1318193</b>                      | <b>611967</b> |
| <b>1318169</b>                      | <b>621471</b> |
| <b>1307489</b>                      | <b>621471</b> |
| <b>1307466</b>                      | <b>611967</b> |

### 2.1.2.2 Vías de acceso

Ubicándose el área de estudio a 51.2 km de la capital, las vías de acceso corresponden a:

1. Carretera Panamericana sur, pasando por los municipios de El Crucero-Managua, Jinotepe-Carazo hasta llegar al empalme Nandaime, recorriendo 10 km hacia la carretera a Granada, se encuentra la entrada al volcán Mombacho en el empalme el Guanacaste (Fundación Cocibolca, 2017).
2. Carretera a Managua-Granada, saliendo desde Managua hasta llegar a la ciudad de Granada, se toma la carretera Granada-Nandaime hasta llegar al cruce El Guanacaste en el kilómetro 50 de la carretera Granada-Nandaime (Fundación Cocibolca, 2017).

### **2.1.2.3 Clima**

El clima predominante en las faldas del Volcán Mombacho es tropical seco; se observan dos estaciones muy diferenciadas. La de lluvias, desde mayo hasta noviembre, y la seca, que abarca el resto de año. En las cumbres el contraste entre ambas estaciones no es tan marcado, porque existe una humedad constante producto de la condensación que se produce sobre la cubierta vegetal a partir de los 800 m de altura. Esto mantiene el verdor y la humedad permanente que son características de neblí-selvas (Fundación Cocibolca, 2017).

El promedio de precipitación pluvial de los últimos dos años en el área de la Estación Biológica Mombacho, es de 2,000 mm anuales. Los meses más lluviosos lo constituyeron Junio con 483 mm, septiembre con 404 mm y octubre con 315 mm. La temperatura promedio es de 23 grados centígrados, registra la más baja en diciembre con 9 grados. El clima es húmedo y frío, con chubascos eventuales casi constantes y de corta duración (Fundación Cocibolca, 2017).

### **2.1.2.4 Relieve**

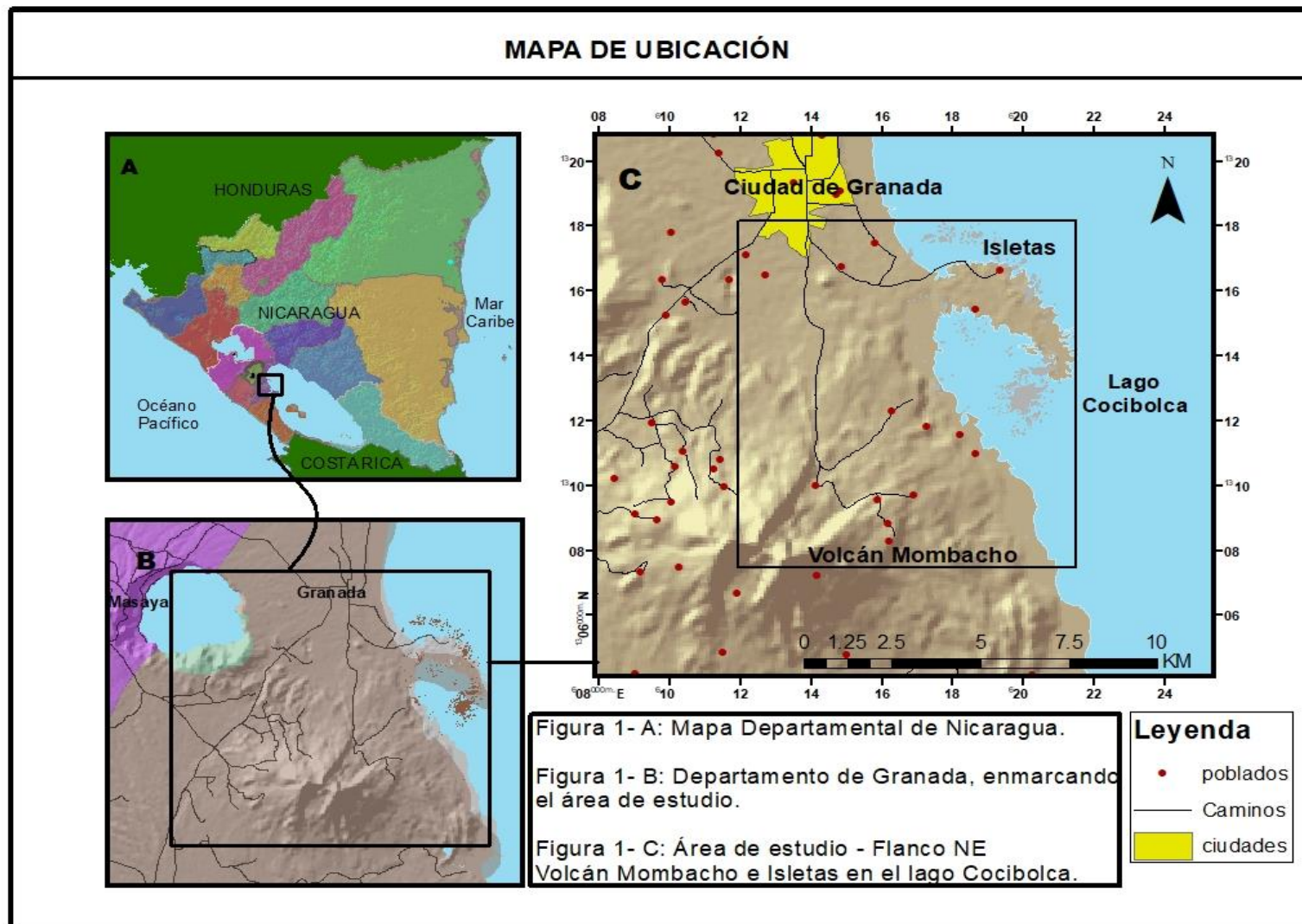
El Área Protegida Reserva Natural Volcán Mombacho presenta un relieve con elevaciones altas, escarpadas y de rápido escurrimiento superficial. A simple vista los picos montañosos, están dominados los laderas escarpadas y modificadas por derrumbes (avalanchas) que al paso el proceso de infiltración y recarga disminuye; en cambio en lugares con relieves planos, semiplanos y cóncavos, se favorece el proceso de infiltración y recarga hídrica al permitir un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo. Las laderas empinadas cubiertas de vegetación, jugado un importante papel en su desarrollo geológico y han permitido las condiciones y características paisajísticas que se ven hasta hoy día (Fundación Cocibolca, 2017).

### **2.1.2.5 Hidrología**

Los acuíferos más importantes del país se localizan en las formaciones cuaternarias de la planicie de León – Chinandega, meseta de Carazo y la depresión Nicaragüense, compuesta por la cordillera volcánica del Pacífico que es donde se presentan elevadas tasas de recarga, originadas en su mayor parte por la infiltración de las aguas de lluvia. Las áreas de descarga se encuentran a lo largo de la planicie costera de los lagos Cocibolca y Xolotlán y en las costas del Océano Pacífico (Fundación Cocibolca, 2003).

La Reserva Natural volcán Mombacho, se encuentra como parte de la Cuenca Río San Juan N° 69. (Constitución de la República de Nicaragua, Ley del Agua N°620.) Comprendida dentro de una sub cuenca hidrográfica y dos micros cuencas; Los ríos Brujo, el Arroyo y el nacimiento de cuatro manantiales que irrigan laderas bajo (Fundación Cocibolca, 2006).

El volcán Mombacho posee un significativo recurso hídrico superficial, producto del nacimiento de una serie de manantiales y quebradas distribuidas en su mayor proporción en la parte Noreste y Sureste. En esta región y debido a la topografía y particularidades hídricas se encuentran incluidos los nacimientos de las fuentes de agua más importantes dentro de los límites de la Reserva, para proteger la cobertura forestal que facilita la recarga de los acuíferos (Fundación Cocibolca, 2006).



**Figura 1- Mapa de ubicación del área de estudio**

### **2.1.3 Marco teórico**

#### **2.1.3.1 Avalanchas de escombros volcánicos**

##### **2.1.3.1.1 Definición**

Leyrat, (2000) y Smith (1991), definen las avalanchas de escombros volcánicos como colapso sectorial, súbito y repentino ya sea total o parcial del flanco de un edificio volcánico que puede estar o no asociado a actividad eruptiva; y consiste en una gran masa densa de alta cohesión y saturada de escombros que fluye o se moviliza rápidamente y sus depósitos pueden cubrir grandes áreas.

Se considera un evento catastrófico, temporalmente instantáneo y de muy alta recurrencia, el volumen movilizado generalmente es de 1 o varios millones de metros cúbicos de roca. Este se genera por una ruptura brusca en una masa rocosa. El volumen de material movilizado suele ser superior a los 100.000 m<sup>3</sup> y generalmente la velocidad de movimientos suele ser elevada mayor de 40 m/s (INETER & COSUDE, Proyecto MET-ALARN, 2005).

##### **2.1.3.1.2 Tipos de depósitos de avalanchas de escombros**

- Mezcla de escombros brechados pobremente clasificados.
- Predomina el material lítico del volcán (más material juvenil).
- Se observan mega bloques lejos de la fuente.
- Se observa una morfología de montículos.
- Se observan bloques en rompecabezas, característico de este tipo de depósito.

### **2.1.3.1.3 Características**

Estos colapsos, gobernados por la fuerza normal o de la gravedad, se puede dividir y caracterizar en tres fases progresivas que son: 1) Inicio (o desestabilización), 2) Transporte y 3) Deposito en las que entran en juego factores que acentúan en mayor o menor grado las fases de la avalancha de escombros (Pilato, 2005).

Las características geomorfológicas de la avalancha de escombros son: escarpes o calderas de avalancha que tiene una forma particular conocida como herradura de caballo similar a un anfiteatro (Ui et al., 2000) y la topografía hummocks o montículos que puede ser formada por la expansión (spreading) lateral de la avalancha creando sistemas en horst (hummocks) y graben (depresiones) (Voight, 1981).

En la fase inicial, según el acuerdo general para colapsos de flancos volcánicos, se dice que está relacionada a la interacción entre dos mecanismos que propician el colapso que son: mecanismos de debilitamiento del edificio (crecimiento asimétrico, alteración hidrotermal, erosión, spreading) y mecanismos desencadenantes (movimientos sismo-volcánicos, explosiones, intrusiones, terremotos y clima).

### **2.1.3.1.4 Peligro por avalanchas de escombros volcánicos**

Las avalanchas de escombros volcánicos representan un gran peligro para la vida humana debido al gran despliegue de material suelto, junto con la velocidad en la que viaja desde el momento en el que ocurren. La repentina despresurización de sobrecarga magmática o sistema hidrotermal, debido a la gran cantidad de rocas removidas desde el cono y explosión dirigida como el Monte Santa Elena en 1980 (Voight et al., 1981).

Los colapsos de flancos pueden ser de dos tipos: lahares generados flujo saturados de agua como puede ser por derretimiento de capa de hielo, ruptura de la presa, etc. y el originado por intensas lluvias, por ejemplo el Volcán Casita 1998, con saldo de 2500 perdidas (Kerle and Van Wyk de Vries, 2001).

La diferencia de los depósitos de avalanchas de escombros y los lahares es la incorporación de agua en el proceso, teniendo diferentes mecanismos de iniciación ya que en lahares puede ser por colapso del lago del cráter o transformación de flujos piroclásticos. En la matriz prevalecen las arcillas, arenas (Palmer et al., 1991). Mientras que los depósitos de avalancha de escombros más cohesivos muestran estructura en rompecabezas y suelen ser altamente erosivos (Capa et al., 2002).

La desestabilización de grandes volúmenes de rocas de flanco de islas volcánicas como Hawai pueden crear mega Tsunamis. La repentina entrada de la avalancha de escombros en el mar puede producir olas que dependen del volumen de material y su aceleración. Estas olas pueden tener muchos metros de altura. En diciembre del 2002, una ola producida por la entrada de cerca de  $0.017 \text{ km}^3$  desde el edificio volcánico Estromboli destruyó parte de la ciudad y el pueblo de Ginestra, Italia. Esto implica que el peligro se puede extender muchos kilómetros desde la fuente (Siebert et al., 1989,1995).

Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que se encuentra a su paso, y alteran enormemente la topografía. Adicionalmente pueden generar lahares y crecidas directamente a partir del desagüe de avalanchas de escombros. Estas también pueden represar ríos y formar lagunas, las mismas que pueden drenar catastróficamente y generar de esta manera lahares y crecientes.

### **2.1.3.2 Mecanismos de debilitamiento**

Shea et al., (2007), refirieron que los mecanismos de debilitamiento y la fuerza gravitatoria crean factores y límites para los que su asociamiento influye en el desarrollo de colapsos. El crecimiento del edificio volcánico en alternancia de capas de diferentes propiedades físicas crea debilidades conocidas como heterogeneidad y sus múltiples factores asociados son:

#### **2.1.3.2.1 Vesicularidad y textura de los materiales**

La vesicularidad y texturas de las rocas son propiedades físicas adquiridas al momento de su formación, ambas favorecen presencia y circulación de fluidos. Por ejemplo, una capa de escorias sueltas es mucho más vesiculada que un flujo lávico denso y sin vesículas, permitiéndose la buena circulación de fluidos (Shea et al., 2007).

Sin embargo, en flujos lávicos la circulación de fluidos es atribuida a su fracturamiento originado en el momento de su enfriamiento (fracturas termales) o por actividad volcano tectónica posterior. En cambio, en las escorias sueltas esa mayor circulación de fluidos depende del arreglo en tamaños de sus fragmentos así como de la comunicación entre sus vesículas, en dónde; tamaños iguales indican mejor circulación de fluidos que tamaños variables, por eso las escorias suelen presentar mejor evidencia de circulación de fluidos hidrotermales (Shea et al., 2007).

El carácter textural de un flujo lávico, como su orientación mineral preferencial da facilidad al desarrollo de fracturas y circulación de fluidos. Posteriormente, estos dos tipos de materiales estarán sometidos a procesos de alteración climática e hidrotermal dentro y fuera del cono volcánico, generando fracturas y beneficiando al debilitamiento (Voight, 2000; Watters et al., 2000).



Los volcanes se construyen frecuentemente de una manera bimodal, los piroclastos y las cenizas viajan con el viento dejando el lado opuesto más accesible para las coladas de lava. Estas heterogeneidades espaciales también debilitan un edificio volcánico, ilustrando un lado más frágil y suelto (escorias) y un lado más denso y competente (lavas).

#### **2.1.3.2.2 Características morfológicas de edificios volcánicos**

La forma del volcán contribuye a la deformación de conos volcánicos, aunque su influencia en la estabilidad del flanco volcánico no ha sido muy estudiada, es posible que su peso y la repuesta a los estreses regionales variaran de un volcán con base circular (simétrico) a uno con su base heterogénea (asimétrico). Porque un volcán simétrico tendrá su peso mejor repartido entre sus laderas que uno asimétrico, teniendo un comportamiento más estable, esa asimetría del volcán es relacionado a fallamiento bajo el edificio o repetición de intrusión de diques en el flanco del volcán (McGuire, 1996).

Las pendientes de los flancos volcánicos varían desde un tipo de volcán a otro, por ejemplo en escudos oceánicos pueden ser de algunos grados hasta casi verticales en domos volcánicos que también se pueden colapsar, sabiendo que el Angulo límite de colapso varía entre 30 y 35° para escorias y arenas (Van Wyk de Vries et al., 2001).

Otra condición importante que beneficia al gran escarpe de las pendientes es debido a la disminución de cohesión del conjunto de capas por acción climática: meteorización, infiltración, erosión y productos de acumulación propios del volcán en favor del viento (McGuire, 1996).

Igualmente, el incremento paulatino en elevación puede también significar la tendencia al colapso, como por ejemplo el Kilimanjaro en Tanzania de 5985 m con 5000 m desde su base o estratovolcanes más pequeños como en nuestro caso el Mombacho de 1345 m.

### **2.1.3.2.3 Factores tectónicos que influyen al colapso de estructuras volcánicas**

La localización de volcanes sobre zonas de desplazamientos tectónicos como: rifts y cerca de fallas es importante ya que influyen su crecimiento regular, su deformación y su estabilidad en el tiempo (Pilato, 2005).

La presencia de fallas activas en el basamento puede generar fallas sobre un volcán con el consecuente colapso (Vidal y Merle, 2000). O su ubicación sobre zonas de rifts lo deformaran progresivamente (Van Wyk de Vries y Merle, 1996).

### **2.1.3.2.4 “Spreading”, alteración hidrotermal y otros factores**

Estudios recientes han dado mucho enfoque sobre fenómenos volcano-tectónicos como el desplazamiento lateral del basamento (spreading), el hundimiento (slumping) y la aparición de fallas diversas para ilustrar el debilitamiento de un volcán (Pilato, 2005).

El concepto de «spreading» se basa en los efectos del peso de un volcán sobre su basamento y sí mismo. Las nociones primarias fueron descritas por Van Benmelen (1949) y Suzuki (1967). Borgia (1992), uso la teoría para ilustrar la evolución estructural del Etna (Italia). Posteriormente, Van Wyk de Vries et al., (1996, 1997, 2000, 2004) demostraron la relación entre la desestabilización de edificios, la aparición de fallas y el “spreading”.

El hidrotermalismo se define como la circulación de fluidos presurizados y de alta temperatura generada a proximidad de fuentes de magma superficial. Son enriquecidos en materiales corrosivos, los cuales alteran progresivamente la roca, y suben la presión de poros, debilitando zonas del edificio (Vallance y Scott, 1997; López y Williams, 1993; Iverson et al., 1997). Zonas de resistencia baja se crean y

debido a la gravedad, el volcán se deforma, se desestabiliza y fallas inversas aparecen en su base.

También se forman plegamientos anticlinales, fallas normales oblicuas, grabens y fallas transversales. Todas estas estructuras contribuyen a provocar colapsos de laderas volcánicas (Van Wyk De Vries et al., 2000, Cecchi et al., 2004). Entonces, el crecimiento en alternancia de capas con su paulatina elevación significarían al mismo tiempo, el aumento de inestabilidad en dependencia de la naturaleza del basamento junto con la pendiente del edificio volcánico (Van Wyk de Vries, et al., 2001).

Sumado a lo anterior, otros factores entran en juego que son vibraciones sísmicas en el tiempo, erupciones y activaciones o reactivaciones de fallas, así como irregularidades dejadas por colapsos antiguos cuyo escarpe puede ser influenciado por discontinuidades del edificio (Vidal y Merle, 2000) y capas de erupciones adicionales que añaden peso en sectores específicos del volcán (McGuire, 1996), por ejemplo, Mombacho y St Augustine. En volcanes ubicados cerca de cuerpos de agua o mar, se ha demostrado que el nivel del agua crea presión en los poros por el aumento o descenso de su nivel (McGuire et al., 1997; McGuire, 1996).

### **2.1.3.3 Mecanismos desencadenantes en los edificios volcánicos**

Estos se podrían agrupar en 3 modelos de mecanismos desencadenantes o de acción, que pueden ser internos o externos al volcán:

#### **2.1.3.3.1 Mecanismos por actividad magmática**

Deformación del edificio por intrusión de criptodomo de magma (Monte Santa Elena, 1980; Glicken, 1996). Otros estudios han demostrado la capacidad que tienen las intrusiones para empujar y deformar cuerpos volcánicos (McGuire et al., 1990,

Elsworth y Voight, 1995), así como sus tendencias a modificar la presión de poros por fluctuaciones térmicas (Elsworth y Voight, 1995).

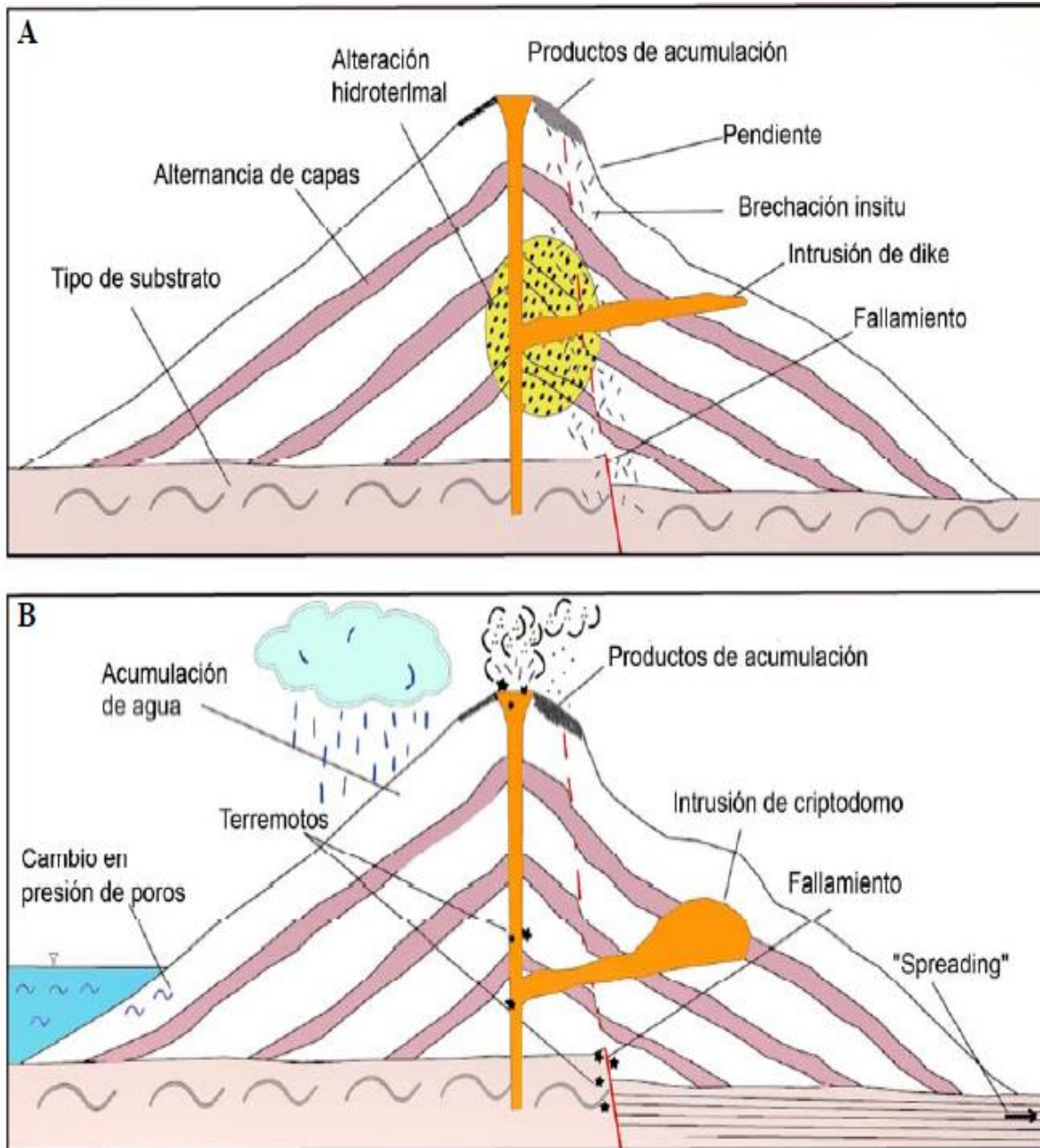
### **2.1.3.3.2 Mecanismos de choque**

Fuerte explosión (magmática, freatomagmática, freática), como el ejemplo de Bandai en 1888 (Siebert, 1987); Terremotos (tectónicos o volcánicos), como ejemplo Unzen en 1792 (Siebert et al., 1987), reactivación de una falla vertical durante un ajuste tectónico (Vidal y Merle, 2000).

### **2.1.3.3.3 Mecanismos gravitacionales**

Sobrecarga de una parte del edificio por acumulación de productos volcánicos durante una erupción o acumulación de agua dentro del edificio durante un huracán (ejemplo el Casita 1998, Kerle y Van Wyk de Vries et al., 2001).

Algunos colapsos conocidos como híbridos son accionados a la vez por más de un mecanismo en el que uno prevalece sobre los otros. Por ejemplo el Monte Santa Elena 1980 la desestabilización fue precedida por la intrusión de un criptodomo dominada por una importante deformación y una intensa actividad sísmica, el edificio había sido debilitado por alteración hidrotermal y movimiento de falla de desgarre lateral (Lagmay et al., 2000), pero el mecanismo de acción es retenido por la intrusión del criptodomo (Siebert et al., 1987). **Ver Figura N°2**



**Figura 2- Mecanismos que propician el colapso de un flanco**

**A) Mecanismos de debilitamiento; B) mecanismos de desencadenamiento**

**Fuente: (Benard B., 2005)**

## 2.1.3.4 Lahares

### 2.1.3.4.1 Definición

Los lahares, también llamados flujos de lodo y flujos de escombros que acontecen en terrenos volcánicos, son masas de lodo, roca y agua. Ocurren cuando el agua moviliza grandes volúmenes de lodo suelto, roca y escombros volcánicos (**Ver Figura N°3**). Comúnmente, los aludes y las avalanchas de escombros incorporarán suficiente agua para formar lahares. Pueden viajar muchas decenas de kilómetros por valles a velocidades de decenas de kilómetros por hora. Los lahares destruyen o dañan todo lo que encuentran en sus caminos a través de entierro o impacto. Los lahares siguen los valles de los ríos y dejan depósitos de arena fangosa y grava que pueden tener varios metros de espesor. Son particularmente peligrosos porque viajan más lejos (Vallance et al., 2001).

### 2.1.3.4.2 Origen de los Lahares

- 1- Mezcla de escombros de roca y agua de un volcán
- 2- Explosiones volcánicas pueden desaguar en forma catastrófica en lagunas cratéricas
- 3- Avalanchas de escombros saturadas en agua pueden transformarse en lahares.
- 4- Avalanchas de escombros que llegan a detenerse pueden generar lahares al soltar agua
- 5- Flujos piroclásticos pueden entrar en ríos e incorporar agua
- 6- La interacción de flujos y oleadas piroclásticas con nieve y hielo provocan la fusión de estos últimos, el agua así generada se puede mezclar con sedimentos.

### 2.1.3.4.3 Peligro por Lahares

Los lahares amenazan la vida y las propiedades tanto en los volcanes como en los vales que lo drenan, debido a su alta velocidad y densidad pueden destruir la vegetación y hasta estructuras importantes a lo largo de sus rutas tales como puentes. Los depósitos de lahares pueden enterrar obras de infraestructuras y campos cultivados (Tilling, 1993). Pueden depositar millones de metros cúbicos de sedimento en canales (Vallance et al., 2001).

Una vez que los lahares llenan los canales de la corriente con sedimentos, las corrientes comienzan a erosionar nuevos caminos. Los nuevos canales de arroyos pueden ser altamente inestables y cambiar rápidamente a medida que los sedimentos se erosionan y se mueven más hacia el valle. Además, debido a que los canales de la corriente están obstruidos con sedimentos, tienen menos capacidad para transportar agua y, por lo tanto, son más susceptibles a las inundaciones de menor magnitud (Vallance et al., 2001).



**Figura 3- Lahar en el volcán Casita, 1998**

**Fuente:** <https://webserver2.ineter.gob.ni/vol/casita/casita.html>

### 2.1.3.5 Método Bishop simplificado en 3D usado por Scoops3D

El método simplificado de Bishop determina la fuerza normal que actúa sobre la superficie de deslizamiento mediante el cálculo inicial de la fuerza de equilibrio en la dirección vertical en la base de cada rebanada de terreno. La fuerza cortante,  $S_{ij}$ , que actúa en la base de cada columna es una función de la resistencia al corte y el factor de seguridad,  $F$ , y está dada por:

$$S_{i,j} = \frac{1}{F} [c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}]$$

Donde:

$c_{i,j}$  es la cohesión de la columna  $i,j$

$A_{i,j}$  es el área de la superficie deslizante de la columna  $i,j$

$N_{i,j}$  es la fuerza normal de la columna  $i,j$

$\phi_{i,j}$  es el ángulo de fricción interna de la columna  $i,j$

si combinamos la ecuación anterior con la del peso de cada columna ( $W_{i,j} = N_{i,j} \cos \varepsilon_{i,j} + S_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$ ) y despejamos la fuerza normal  $N_{i,j}$  tenemos

$$W_{i,j} = N_{i,j} \cos \varepsilon_{i,j} + S_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

y despejamos la fuerza normal  $N_{i,j}$  tenemos

que:

$$N_{i,j} = \frac{W_{i,j} - \frac{c_{i,j} A_{i,j} \sin \alpha_{i,j}}{F} + \frac{u_{i,j} A_{i,j} \tan \phi_{i,j} \sin \alpha_{i,j}}{F}}{[\cos \varepsilon_{i,j} + (\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}) / F]}$$



Donde  $\varepsilon_{i,j}$  es la dirección del ángulo de inclinación de la columna  $i,j$ , y  $\alpha_{i,j}$  es el ángulo de la inclinación aparente de la columna  $i,j$ . Después de algunas simplificaciones algebraicas, el factor de seguridad,  $F$ , queda de la siguiente forma:

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - u_{i,j} A_{h_{i,j}}) \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j}]}$$

Donde  $R_{i,j}$  es la distancia el eje de rotación de la columna  $i,j$  al centro del área de deslizamiento.

### 2.1.3.6 Método físico matemático de TITAN2D

La física de TITAN2D se basa en las ecuaciones de la dinámica de fluidos de muy poco contenido de agua, por lo cual está regido por las ecuaciones de las aguas someras (*ver por ejemplo Denlinger y Iverson, 2004*), y matemáticamente se expresan así:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\vec{U}) + \frac{\partial}{\partial x} (\vec{F}(\vec{U})) + \frac{\partial}{\partial y} (\vec{G}(\vec{U})) = \vec{S}(\vec{U})$$

Donde:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} h \\ hV_x \\ hV_y \end{bmatrix}$$

Es el vector de variables de estado conservadas, y en donde:

$h$ : el espesor del flujo

$hV_x$ : el momentum en la dirección  $X$

$hV_y$ : el momentum en la dirección  $Y$

$$\vec{F}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} hV_x \\ hV_x^2 + \frac{1}{2}k_{ap}g_z h^2 \\ hV_x V_y \end{bmatrix}$$

Es el flujo de masa y momentum en la dirección  $X$ .

$$hV_x^2 + \frac{1}{2}k_{ap}g_z h^2$$

Es la componente  $X$  del flujo del momentum en la dirección  $X$ , y  $hV_x V_y$  la componente  $Y$  en la dirección  $X$ .

En cuanto al flujo de masa y de momentum en la dirección  $Y$ , le corresponde el siguiente término de la ecuación general:

$$\vec{G}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} hV_y \\ hV_x V_y \\ hV_y^2 + \frac{1}{2}k_{ap}g_z h^2 \end{bmatrix}$$

Donde  $hV_y$  es el flujo de masa en la dirección  $Y$ ,  $hV_x V_y$  es la componente  $X$  en la dirección  $Y$ , y  $hV_y^2 + \frac{1}{2}k_{ap}g_z h^2$  es la componente  $Y$  del flujo del momentum en la dirección  $Y$ .

Por otro lado, tenemos que:

$$\vec{S}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_x h - hk_{ap} \text{sign} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial y} (g_z h) \sin \phi_{int} - \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \max \left( g_z + \frac{V_x^2}{r_x}, 0 \right) h \tan \phi_{bed} \\ g_y h - hk_{ap} \text{sign} \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial x} (g_z h) \sin \phi_{int} - \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \max \left( g_z + \frac{V_y^2}{r_y}, 0 \right) h \tan \phi_{bed} \end{bmatrix}$$

Es el vector de las fuentes disipativas e impulsora, donde  $g_x h$  es la fuerza gravitacional impulsora en la dirección X.

$-hk_{ap} \text{sign} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial y} (g_z h) \sin \phi_{int}$  : Es la fuerza de fricción interna disipativa en la dirección X.

$-\frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \max \left( g_z + \frac{V_x^2}{r_x}, 0 \right) h \tan \phi_{bed}$  : Fuerza de fricción basal disipativa en la dirección X, y los otros términos similares para la componente Y.

$K_{ap}$  =es el coeficiente de esfuerzo lateral activo/pasivo. Es activo cuando el flujo se torna divergente, por lo que asume un valor pequeño; y toma un valor grande (pasivo) cuando el flujo es convergente.

## 2.2 Marco geotectónico

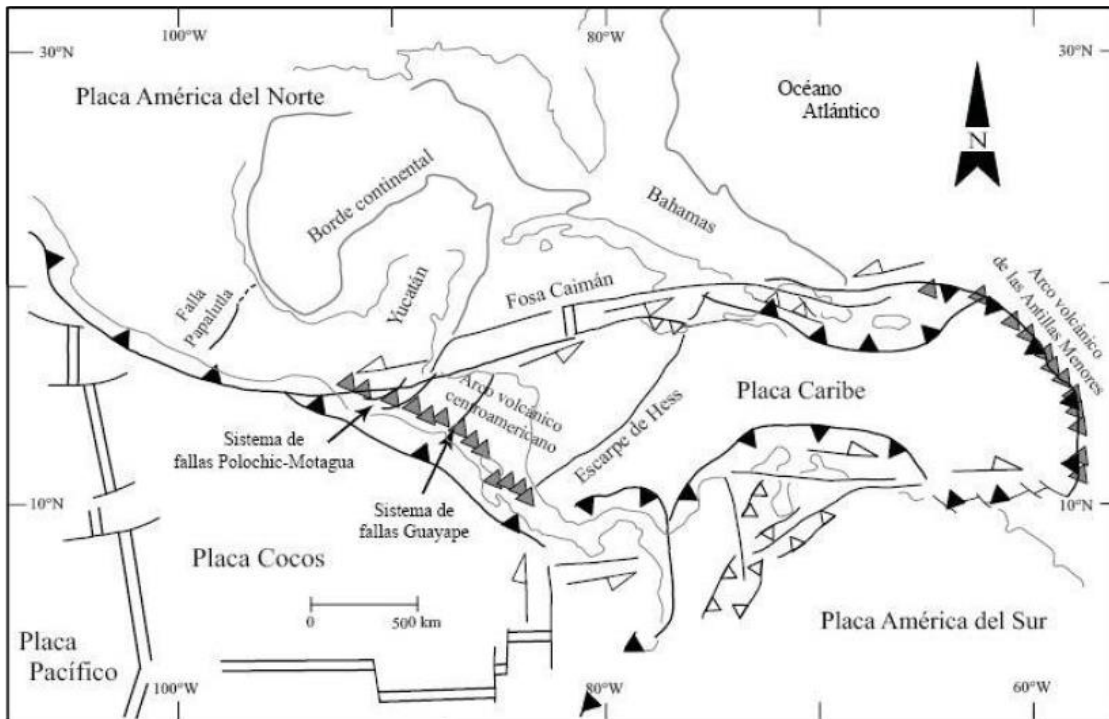
### 2.2.1 Geotectónica de América Central

América central está ubicada en la placa Caribe entre las placas de Norteamérica y Sudamérica, limitando al Norte con la placa Norteamericana a través de un sistema de fallas Motagua-Polochic-Jocotan y la Fosa Caimán; al Este con la Fosa de Puerto Rico y la zona de subducción de las Antillas Menores; al Sur con la placa Sudamericana y al Oeste con la Fosa Mesoamericana. **(Ver Figura N°4)**. En los últimos 50 millones de años el tectonismo de América Central está siendo afectado por la subducción de la placa Cocos debajo de la placa Caribe con una velocidad aproximada de 8 cm/año y una inclinación de 25° en la parte superficial y 84° a profundidades de 100 km y 220 km (Frischbutter, 2002).

América Central forma un arco cóncavo hacia el Caribe en la parte de Costa Rica y otros cóncavos en el océano Pacífico (territorio panameño) debido a una alineación tectónica mayor que determina su forma geográfica elíptica. Estructuralmente ha sido clasificada en 3 unidades más o menos paralelas (Dengo, 1973)

Estructuras debido a la tectónica de América Central:

1. Depresión Nicaragüense y Depresión Central ( El Salvador)
2. Cadena Volcánica del Cuaternario
3. Cuencas pull-apart a lo largo de la cadena volcánica del Cuaternario



**Figura 4- Mapa tectónico de América Central**

**Fuente: (Frischbutter, 2002)**

### **2.2.2 Geología Regional de Nicaragua**

La evolución geológica del país inicia desde el Paleozoico con el desplazamiento del basamento metamórfico cristalino (Dengo, 1983). Este basamento está formado por rocas metamórficas como esquistos, filitas, mármoles, cuarcitas y gneises incluidas dentro de la Formación Palacaguina (Bracci, 1957) o esquistos de Nueva Segovia, se encuentran intruidas por cuerpos ígneos plutónicos del Mioceno (Garayar, 1971).

En el Cretácico al Suroeste del país ocurrió la emersión del basamento ofiolítico incluyendo basaltos elipsoidales, aglomerados de basaltos, rocas intrusivas gabroicas, calizas silíceas, pedernales, grauwacas y peridotitas serpentinizadas;

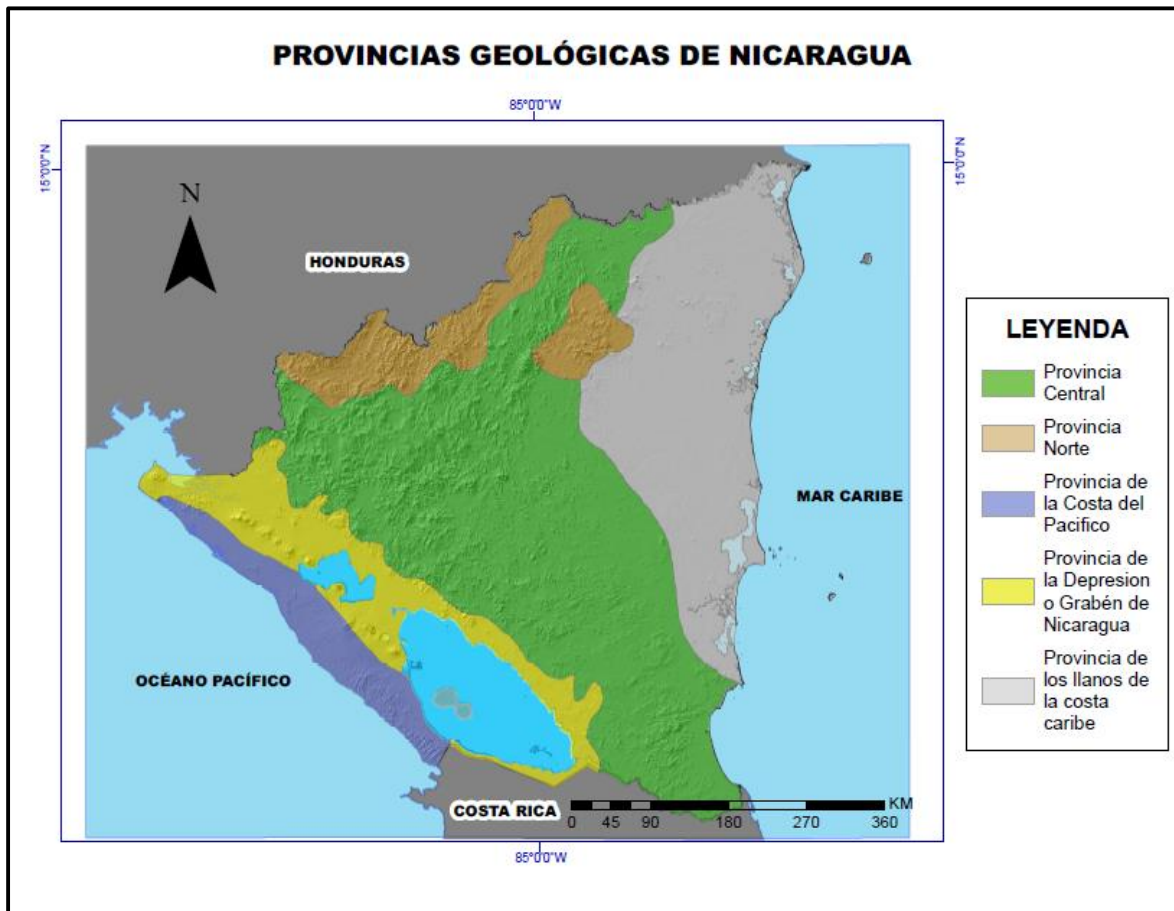
todas estas rocas han sido agrupadas bajo el nombre Complejo Nicoya (Dengo G., 1973).

Sobre-yaciendo en contacto a este basamento se encuentran rocas sedimentarias representadas por intercalaciones de areniscas y lutitas del Cretácico superior, agrupadas en la Formación Rivas. Del Eoceno hasta el Plioceno en la costa del Pacífico, se depositaron rocas sedimentarias en una cuenca de subsidencia de ambiente nerítico y deltaico (Kuang, 1971).

Entre el Eoceno- Plioceno se desarrolló una intensa actividad volcánica, como consecuencia de la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa del Caribe, produciendo la deposición de considerables capas de rocas volcánicas, incluyendo una serie de unidades sedimentarias epiclasticas y piroclásticas pertenecientes a la Provincia Central (McBirney y Williams, 1965).

A finales del Terciario e inicios del Cuaternario se originó un sistema de fallas en dirección Noroeste como resultado de esfuerzos locales de tensión, producidos por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, lo que permitió la formación de la Depresión o Graben de Nicaragua perteneciente a la Provincia de la Depresión de Nicaragua, caracterizada por el predominio de rocas volcánicas y depósitos sedimentarios del Pleistoceno y Holoceno (Kuang, 1971).

Durante el Pleistoceno en los Llanos de la Costa Atlántica se dio una deposición de rocas sedimentarias y aluviales recientes como consecuencia de la erosión en las Tierras Altas del Interior de Nicaragua, formando una gran cuenca llamada Mosquitia presentando extensiones de roca ígnea intrusiva y extrusiva, donde se ha producido una serie de estructuras geológicas que favorecen la acumulación de petróleo, entre anticlinales y fallas (Kuang, 1971). **Ver Figura. N°5**



**Figura 5- Mapa de provincias geológicas de Nicaragua,**

**Fuente: (Hodgson, 2000)**

### 2.2.3 Geología regional del Volcán Mombacho

La Depresión Nicaragüense con una orientación Noroeste-Sureste, tiene 70 Km de ancho y 300 Km de longitud, y una dirección Noroeste-Sureste. Atraviesa el territorio Nicaragüense en el sector occidental, paralelo a la Costa del Pacífico y a la Fosa Mesoamericana, (McBirney y Williams, 1965) ;( Elming, 1998).

Según McBirney and Williams. (1965), la Depresión de Nicaragua comenzó su formación a finales del Cenozoico por los esfuerzos de tensión local que actúan en la cresta de un geo-anticlinal, producidos por la compresión regional creada entre las Placas Cocos y Caribe.

Esta se encuentra rellena con depósitos piroclásticos y aluviales con un espesor de 2000 m, (Hodgson, 1998). Su formación ocurrió durante el Pleistoceno, Weyl. (1980), sin embargo otros autores como, Williams and McBirney. (1965), consideran que comenzó a hundirse durante el Mioceno Tardío.

## 2.2.4 Cadena volcánica Cuaternaria de Nicaragua

La cadena volcánica de Nicaragua se desarrolla al interior de la Depresión Nicaragüense, se extiende en sentido NO-SE desde el Volcán Cosigüina hasta el Volcán Maderas, en la Isla de Ometepe (Lago de Nicaragua), con una extensión de 380km (Avellán, 2014). Dicha cordillera volcánica se compone de unos 40 edificios, los cuales en su mayoría aparecen agrupados a construir complejos volcánicos que presentan unidades morfológicas distintas y generalmente separadas entre sí por sectores con ausencia, o presencia muy reducida de actividad volcánica. Entre los diferentes complejos volcánicos (Van Wyk de Vries, 1993) se identificó la presencia de tres tipos fundamentales: escudos volcánicos, estratovolcanes y complejos ácidos. *Ver Figura Nº. 6*



**Figura 6- Cadena volcánica de Nicaragua**  
**Fuente: Sensor ALOS PALSAR**



## **2.3 HIPÓTESIS**

La simulación numérica de la avalancha en el flanco Noreste del volcán Mombacho, brindará un escenario probable de la magnitud de tal acontecimiento, teniendo en cuenta los factores geológicos que pueden generar inestabilidad en las laderas del volcán como la alteración hidrotermal, el fracturamiento de las rocas, las fallas geológicas, y la morfología que pueden influir en el colapso de los flancos del volcán.

## **CAPITULO III**

### **3.1 DISEÑO METODOLOGICO**

#### **3.1.1 Tipo de estudio**

El tipo de estudio se clasificó en descriptivo, en donde se definieron los mecanismos que influyeron en la desestabilización del flanco y las unidades geológicas aflorantes en el área, en cuanto a la simulación numérica se utilizó un enfoque cuantitativo, ya que se necesitó datos numéricos aproximados de la cantidad de material que colapso en el edificio volcánico.

#### **3.1.2 Área de estudio**

El área de estudio abarco desde el extremo Noreste del volcán Mombacho hasta las isletas ubicadas en el Lago Cocibolca, ocupó un área de 18.3 km aproximadamente, distancia que comprende el recorrido de la avalancha “las Isletas”.

#### **3.1.3 Población y muestra**

El universo de este estudio es el Volcán Mombacho y como muestra el sector Noreste del volcán, su recorrido hasta el lago Cocibolca y las isletas de Granada.

### 3.1.4 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 1- Matriz de operacionalización de variables

| Objetivo General  | Objetivos Especificos  | Variable conceptual                        | Subvariables                                       | Variable operativa o indicador                     | Técnicas de recolección de datos e información               |
|---|--|--|--|--|--|
| <p>Simular numéricamente la avalancha que generó las isletas en el lago Cocibolca mediante el método de Bishop y la dinámica de fluidos granulares.</p> | <p>Describir la geología del flanco NE del volcán Mombacho tomando como referencia estudios previos para conocer los factores condicionantes y desencadenantes de fenómenos de avalancha de escombros en el área volcánica.</p>      | <p>Geología local</p>                      | <p>Litología, estructuras</p>                      | <p>Lineamientos, fallas, fracturas</p>             | <p>Revisión bibliográfica, visita de campo</p>               |
|   | <p>Realizar un análisis de la morfología para simular numéricamente la avalancha de escombros del flanco NE, a partir de información geológica existente en el área de estudio.</p>  | <p>Simulación numérica</p>                 | <p>Mecanismos desencadenantes y condicionantes</p> | <p>Hidrotermalismo, alteraciones, tipo de roca</p> | <p>Fotointerpretación, mapas topográficos, ortofotomapas</p> |
|   | <p>Zonificar el peligro por avalanchas en el volcán Mombacho para que sea tomado en cuenta por tomadores de decisión, planificadores urbanos y ordenadores del territorio y así prevenir y mitigar pérdidas humanas y materiales</p> | <p>Peligro por avalanchas de escombros</p> | <p>Vulnerabilidad</p>                              | <p>Condiciones del suelo, pendiente, spreading</p> | <p>Selección de datos morfológicos, fichas de campo</p>      |

### **3.1.5 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información**

#### **3.1.5.1 Consulta o revisión bibliográfica**

Se recopiló y analizó toda la información existente en el área de estudio de carácter geológico, estructural, entre otros, haciendo énfasis en avalanchas de escombros para realizar las simulaciones numéricas. Para obtener la información se visitó centros de documentación y sitios de internet, como: INETER, etc. Esto se efectuó a través de la recolección de datos, documentos (informes, estudios, artículos, revistas, tesis y otros trabajos), mapas (topográficos, geomorfológicos, geológicos, etc.) e imágenes (fotografías aéreas, imágenes satelitales y ortofotomapas) que abarcan el área de estudio.

#### **3.1.5.2 Fotointerpretación**

Se realizó la fotointerpretación a detalle de las fotografías aéreas editadas por INETER (2004), específicamente las líneas de vuelo (9, 10 y 11), abarcando el área del volcán Mombacho e isletas de Granada con lo que se logró identificar diferentes rasgos morfológicos como: recorrido de la avalancha, lineamientos, estructuras circulares, escarpes, fallas, fracturas, desplazamiento etc., para comprobar y complementar la información obtenida de los mapas recopilados y realizar mapas bases de elevaciones y estructuras.

#### **3.1.5.3 Etapa de campo**

Como parte de la investigación se realizó un reconocimiento geológico del área, utilizando como información base la expuesta en artículos científicos presentados por Shea et al., (2007); Pilato (2005); Avellán (2004); entre otros. Donde clasifican la litología del volcán en la unidad Mombacho (depósitos provenientes de coladas de lavas propias del volcán) y unidad de depósitos recientes (depósitos recientes producto de procesos de meteorización y de las avalanchas en los flancos).

Se realizó la interpretación en base a ortofotomapas, fisiografía del mapa topográfico y geomorfología, permitiendo generar un mapa base del área, posteriormente se llevó a cabo una correlación de las estructuras observadas mediante fotografías aéreas y en campo.

#### **3.1.5.4 Equipo de medición en campo**

Se utilizaron materiales para adquirir la información geológica mediante el levantamiento de campo como: Brújulas, martillo de geólogo, GPS, cintas métricas, binoculares, fotografías aéreas, modelo de elevación del terreno (MDE) derivado del sensor ALOS PALSAR, el cual tiene una resolución espacial de 12.5 metros x 12.5 metros y mapas topográficos.

#### **3.1.6 Plan de análisis y procesamiento de datos e información**

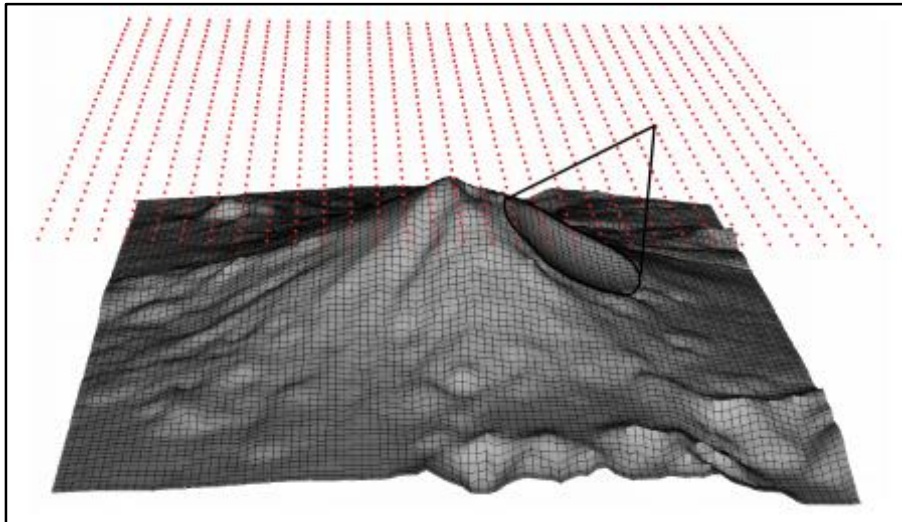
##### **3.1.6.1 Elaboración de mapa base**

Se realizó con la ayuda del software ArcMap (10.5) la digitalización de la información obtenida en la fotointerpretación, ortofotomapas, mapas topográficos (3051-III y 3051-IV) correspondientes al área de estudio y el modelo de elevación digital de terreno (MDE) derivado del sensor ALOS PALSAR, para la elaboración de los mapas digitales de curvas de nivel y modelo de relieve sombreado, para el mapa altimétrico se utilizó el software Surfer 10. Mediante el análisis de estos mapas se identificó e interpreto los principales rasgos estructurales y las direcciones de fallamiento que se encuentran afectando el área.

### 3.1.6.2 Procesamiento e interpretación de los datos obtenidos en campo

Obtenido los datos suficientes tanto en campo y documentación, se procedió a realizar la simulación, para ello se utilizó el programa Scoops3D:

Scoops3D es un programa informático, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos, (USGS), para analizar pendientes de estabilidad a lo largo de un paisaje digital, como lo representa un modelo de elevación digital o DEM. Puede que sistemáticamente busque un paisaje digital y calcule la estabilidad de millones de posibles deslizamientos de tierra tridimensionales (3D), abarca una amplia gama de profundidades y volúmenes que potencialmente afectan diferentes partes del DEM. **Ver Figura Nº. 7**



**Figura 7- Vista en perspectiva de una cuadrícula del modelo digital de elevación (DEM) que muestra una falla potencial con la masa eliminada**

**Fuente: (Reid et al., 2015)**

Scoops3D procesa de manera sistemática y eficiente todo el DEM, incorporando así los efectos complejos de la topografía por medio de una “búsqueda” simple o exhaustiva. En una búsqueda exhaustiva, cada celda del DEM se incluye en múltiples planos de fallas potenciales, y Scoops3D registra la menor estabilidad (factor de seguridad) para cada celda, así como el tamaño (volumen o área) asociado con cada uno de estos posibles deslizamientos de tierra.

También determina el plano de falla potencial menos estable para todo el DEM. Los resultados de Scoops3D se pueden incorporar fácilmente a un sistema de información geográfica (SIG) u otro software de visualización, en esta tesis se incorporaron en el software ArcMap (10.5)

Los análisis de equilibrio límite, como el utilizado en Scoops3D, no determinan las deformaciones y/o desplazamientos que afectan la masa potencial que se deslizará. El plano potencial de ruptura predefinido, o superficie de deslizamiento, se denomina superficie de prueba. Scoops3D utiliza superficies de prueba compuestas de porciones de una esfera y supone un deslizamiento rotacional. Una superficie de prueba esférica representa la geometría 3D más simple sin restricciones de estructuras internas, por lo que es útil para los análisis de estabilidad regional en los que se pueden examinar millones de superficies de prueba en un DEM.

Scoops3D permite seleccionar entre dos métodos conocidos de equilibrio para calcular la estabilidad de una superficie de prueba rotacional: el método ordinario (Fellenius) y el método simplificado de Bishop. Los dos métodos son computacionalmente eficientes y funcionan bien con columnas 3D definidas por un DEM.

Ambos calculan la estabilidad utilizando el momento de equilibrio alrededor de un eje de rotación. Ninguno de los dos requiere el cálculo de las fuerzas laterales que actúan entre columnas y, por lo tanto, evitan las dificultades asociadas con el cálculo de las fuerzas laterales en las caras de las columnas que no están alineadas con la cuadrícula del DEM. Los métodos difieren principalmente en cómo estiman la fuerza normal que actúa sobre la superficie de prueba.

Cada método tiene ventajas y desventajas. El método ordinario (Fellenius) siempre proporciona un valor de factor de seguridad para una superficie de prueba rotacional dada. No requiere un proceso iterativo para encontrar un factor de seguridad y esto acelera el cálculo. Los valores del factor de seguridad calculados usando el método ordinario en 3D son comúnmente más bajos (más conservadores) que los determinados por otros métodos de equilibrio límite.

En comparación, el método simplificado de Bishop proporciona valores de factor de seguridad similares a los encontrados con métodos de estabilidad más rigurosos en 2D y 3D. El método simplificado de Bishop requiere un método de solución iterativa para calcular  $F()$ , y el proceso de iteración ocasionalmente no puede converger en una solución o converge en una solución espuria (es decir, incorrecta), particularmente si la superficie de prueba incluye secciones de deslizamiento muy empinadas o se ve afectada por altas presiones de agua en los poros del suelo. Scoops3D permite filtrar soluciones espurias.

En la elaboración de los mapas de factor de seguridad, volúmenes y simulación, resultados del programa Scoops3D se utilizó el método simplificado de Bishop debido a que este da los resultados más precisos para el factor de seguridad

- Salidas del programa Scoops3D

Durante la ejecución, Scoops3D genera un conjunto de archivos de salida que incluyen:

- ✓ Seis archivos de salida estándar que siempre se producen.
- ✓ Seis archivos de salida condicionales que se crean según las opciones seleccionadas por el usuario o la existencia de errores y filtros relacionados con los cálculos del factor de seguridad.

Cada archivo de salida se crea en una forma apropiada para el tipo de datos, ya sea como texto, ráster en formato ASCII o archivo 3D.

El archivo de salida de texto principal contiene los parámetros de entrada principal con un texto explicativo, enumera los nombres de los archivos de salida generados, el número de superficies de prueba analizadas y contiene resultados sobre el factor de seguridad mínimo global o global encontrado durante la ejecución de Scoops3D.

Los otros archivos ASCII ráster creados son el que contiene el volumen potencial a colapsar asociado con la superficie crítica para cada celda del DEM, y el archivo de pendientes en grados.

- Parámetros de entrada para el programa Scoops3D



Se utilizó un DEM de 12.5 m de resolución del volcán Mombacho disponible gratuitamente a través del servidor de datos geo-espaciales de Alaska (ASF Vertex), cuyo enlace de internet es: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

Parámetros de entrada que se utilizaron para correr el programa Scoops3D. **Ver tabla 2**

**Tabla 2- Parámetros de entrada Scoops3D**

| <b>I. INPUT FILES:</b>  |  |                           |
|---|--|---------------------------|
| DEM file: D:\Progs-2019\Scoop3D\Scoop3D_Mombacho\ALOS_DEM_original\mombacho.asc<br>Main parameter input file: MombachoRun02.scp |  |                           |
| <b>II. SIMULATION PARAMETERS:</b>   |  |                           |
| DEM<br>Input file for topography: D:\Progs-2019\Scoop3D\Scoop3D_Mombacho\ALOS_DEM_original\mombacho.asc                         | Dimensions of DEM grid (x,y):  | 960 1039                  |
|   | Number of cells in DEM grid:   | 997440                    |
|   | Number of non-null cells in DEM grid:  | 997440                    |
|   | Horizontal resolution of DEM grid (m):   | 12.5                      |
|   | Minimum elevation of DEM (m):  | 32                        |
|   | Maximum elevation of DEM (m):  | 1347                      |
|   | xllcorner and yllcorner (m):   | 606131.062<br>1301834.125 |
| UNIT DESCRIPTORS (used for labels in output files)  | m      kPa      kN/m <sup>3</sup>  |                           |
| MATERIAL PROPERTIES   | Property method:   | layer                     |
|   | Number of layers (nmat):   | 1                         |
|   | total unit wt.<br>lnum   cee   phi   gamt<br>kPa      kN/m <sup>3</sup><br>1   1000.00   40.000   24.000       |                           |
| GROUNDWATER CONFIGURATION   | Groundwater method (water):  | None                      |
| EARTHQUAKE LOADING  | Horizontal pseudo-acceleration coefficient (dimensionless)(eq):  | 0                         |
| LIMIT-EQUILIBRIUM METHOD  | Analysis method (method):  | Bishop                    |
|   | SEARCH METHOD (srch)   | box                       |
| POTENTIAL FAILURE SIZE CONTROLS   | Primary constraint, volume or area (vacriterion):  | Volume                    |
|   | Surface area is not a criterion for size restriction.  |                           |
|   | Volume range of potential failures (m <sup>3</sup> )(vmin, vmax):  | 2.000E+09                 |
|   | Tolerance amount for initial potential failure (tol):  | 5.00E+07                  |
|   | Minimum number of active columns in potential failure required,<br>Otherwise error message generated (limcol): |                           |
| SLIP DIRECTIONS   | Interval to search slip directions on each side of overall   |                           |
|   | Fall direction of potential failure, in degrees (degmax):  | 0                         |
|   | Increment amount for slip direction, in degrees (deginc):  | 0                         |
|   | Calculated number of slip directions tested for each lattice node:   | 1                         |
| <b>SEARCH-LATTICE EXTENT AND RESOLUTION</b>   |  |                           |
| VERTICAL EXTENT AND RESOLUTION  | Minimum elevation of search-lattice nodes (m) (zsmn):  | 50                        |
|   | Maximum elevation of search-lattice nodes (m) (zsmx):  | 1500                      |
|   | Search-lattice vertical spacing (m) (zsrchres):  | 50                        |
|   | Increment amount for potential failure surface sphere radius(m)(dr):   | 100                       |
| HORIZONTAL EXTENT AND RESOLUTION  | Starting search-lattice horizontal node (ismn,jsmn):   | 1 ,1                      |
|   | Ending search-lattice horizontal node (ismx,jsmx):   | 960 1039                  |
|   | Horizontal spacing - multiple of DEM resolution (nsrchres):  | 1                         |
| COARSE-TO-FINE SEARCH PARAMETERS  | Horizontal and vertical multiplier for initial coarse search (multres):  | 8                         |
|   | Search iteration tolerance - percent change F (fostol):  | 0.01                      |

### **3.1.6.3 Simulación numérica de la avalancha de escombros “Las isletas”**

Mediante el software TITAN2D se realizó la simulación numérica del flujo de escombros volcánicos que dio origen al depósito de Las Isletas, al noreste del volcán Mombacho.

Titan2D es un programa informático desarrollado por el grupo de flujo de masas geofísicas (GMFG, por sus siglas en inglés) en la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo, dirigido por el Dr. Abani Patra, con el fin de simular avalanchas granulares sobre modelos digitales de elevación del terreno. El programa está diseñado para simular flujos de masa de índole geológicos, tales como flujos volcánicos, avalanchas de escombros y deslizamientos de tierra.

El programa Titan2D se basa en un modelo promediado de la profundidad del flujo para un continuo incompresible, un flujo granular de “aguas poco profundas”. Las ecuaciones de conservación para masa y momento se resuelven con diferentes reologías que modelan las interacciones entre los granos de los medios y entre el material granular y la superficie basal. El sistema hiperbólico resultante de ecuaciones se resuelve utilizando un esquema paralelo de Godunov de malla adaptativa. Mayores detalles de la parte físico-matemática de este software, puede ser encontrado en Prata et al., 2005.

## CAPITULO IV.

### 4.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1.1 Morfología

La morfología del volcán Mombacho (flanco Noreste), se definió a través del análisis de los aspectos relacionados con las formas del terreno (morfología) y las estructuras geológicas existentes en el área. Con el propósito de llevar a cabo un análisis e interpretación integral del área de estudio, se elaboraron y analizaron los siguientes mapas: altimétrico, topográfico y modelo de relieve para definir las características morfológicas del volcán Mombacho (flanco Noreste).

##### 4.1.1.1 Mapa altimétrico

El mapa altimétrico, también conocido como mapa hipsométrico, es una representación tridimensional del relieve que se construye conectando las curvas de nivel de igual valor. Al dar colores a este tipo de mapas, podemos apreciar claramente las diferencias de alturas en el relieve de la zona de estudio. En este trabajo, se usó una gama de colores con tonos que van desde azul para zonas de mínimas alturas, amarillo a café para zonas medias y crema a rosado para zonas de máximas alturas; la diferencia y cercanía entre estos tonos, permite determinar los principales rasgos estructurales del volcán Mombacho.

El punto más alto del volcán Mombacho posee una altura de 1,345 m.s.n.m, descendiendo de manera lineal hacia el noreste del área se observa un escarpe bordeando el área del flanco donde se originó la avalancha de escombros de las isletas (**Ver Figura Nº. 8**), Se destaca en la parte central de la avalancha de escombros y en las isletas pequeños tumultos, asociados a estructuras circulares asociadas a maares y hummocks. (Shea et al., 2008).

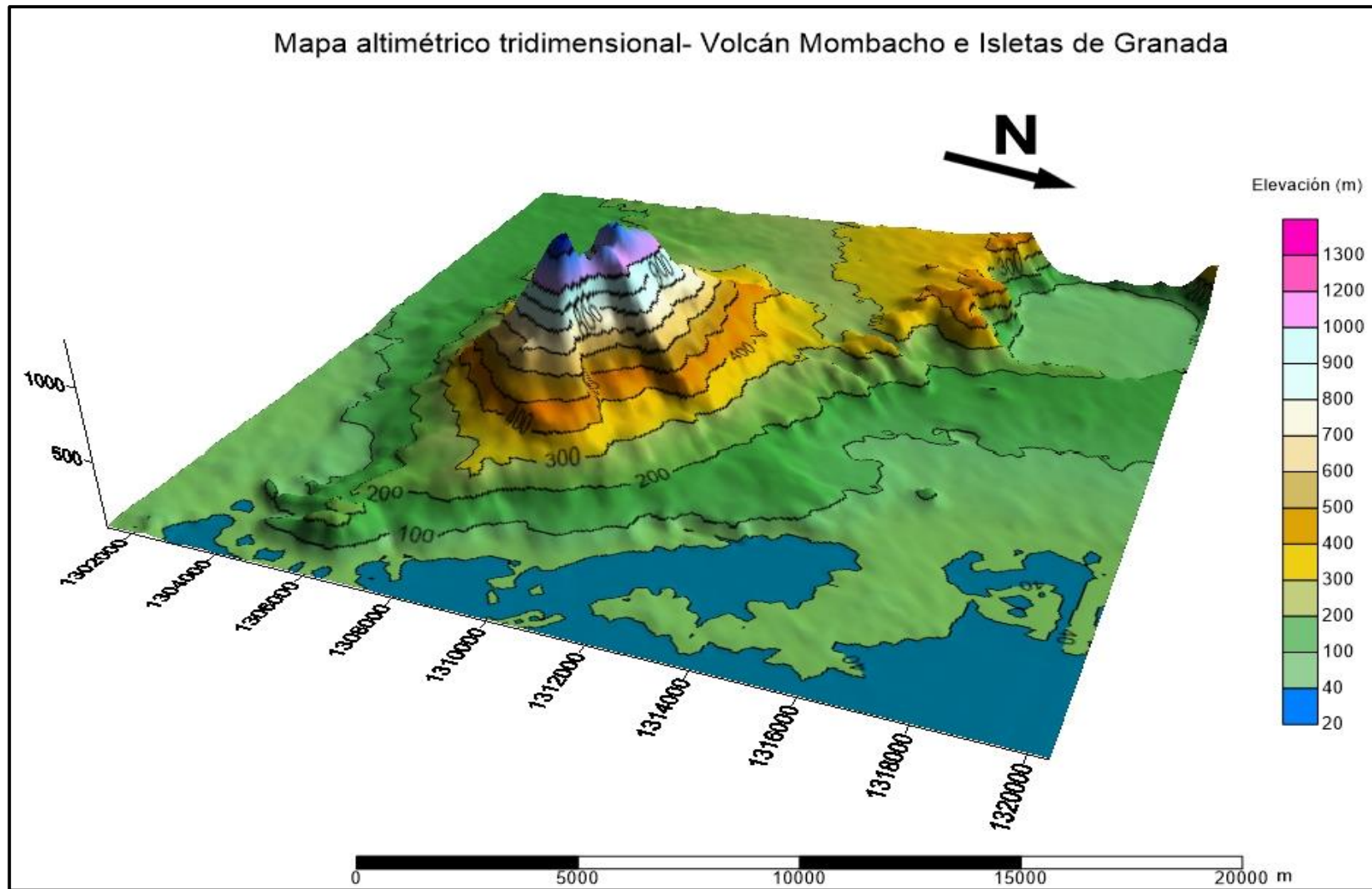


Figura 8- Mapa altimétrico

#### 4.1.1.2 Mapa topográfico

El mapa topográfico es una representación plana de la superficie terrestre mediante curvas de nivel de gran precisión.

Mediante el análisis del patrón de las curvas de nivel se identificaron tres zonas:

La primera zona se localiza en el flanco noreste del volcán, donde se expone un rasgo estructural en forma de “U” que se extiende desde el cráter hasta la base del volcán, que además de evidenciar el escarpe de la avalancha de escombros “Las Isletas”, está asociada a una falla normal, expresado entre las curvas de nivel de 1,200 m a 200 m, poco espaciada y alargadas hacia el este. **Ver figura Nº. 9**

La segunda zona se localiza en la porción central del área de estudio donde la topografía es casi plana, (**Ver figura Nº. 9**), se pueden observar curvas de nivel cerradas, formando pequeñas estructuras circulares, las cuales corresponden a maares y cráteres de explosión; de igual forma se presenta un sistema de fallas normales y fallas de deslizamientos a lo largo de las curvas de nivel 800 m a 100 m.

La tercera zona es la que representa las zonas bajas donde las curvas de nivel marcan 40 m, (**Ver figura Nº. 9**), en esta zona están asentada las isletas, que no son más que tumultos donde descansan los escombros de la avalancha que ocurrió en el flanco Noreste del volcán Mombacho, y cuya fecha de origen es incierta.

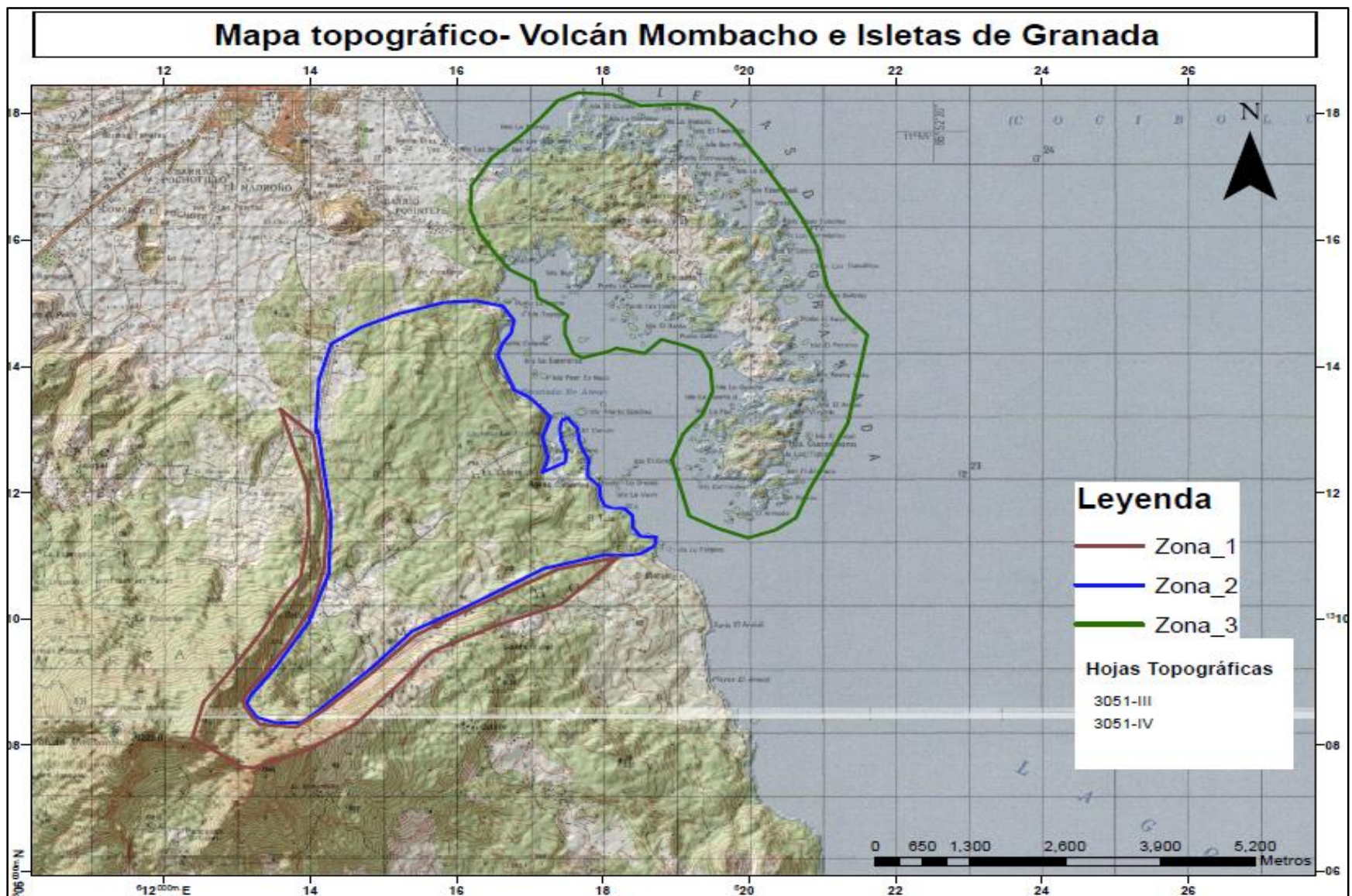


Figura 9- Mapa topográfico



#### 4.1.1.3 Mapa de relieve sombreado

El mapa de relieve sombreado es una representación tridimensional en escala de grises del relieve, generada tomando en cuenta la posición relativa del sol para sombrear la imagen, facilitando así la distinción de rasgos estructurales que son más difíciles de distinguir en un mapa topográfico tradicional.

El mapa de relieve sombreado del área de estudio, en conjunto con la fotointerpretación permitió realizar el análisis estructural del flanco NE del volcán Mombacho y facilitó el trazo de morfoestructuras. **Ver Figura N<sup>o</sup>. 10**

En el área se han definido tres sistemas de fallas con orientación NE-SO, N-S, y algunas NW-SE donde el sistema de falla N-S y NE-SO presenta numerosas pequeñas fallas normales que afectan los flancos del volcán, sobre todo, el lado oeste, estas fallas normales son generadas por el deslizamiento hacia abajo de las zonas inclinadas parcialmente por alteración hidrotermal, y la zona superior del flanco puede ser por deslizamiento.

Siguiendo al Noreste se identifica estructuras circulares como maares y cráteres de explosión, estas estructuras se correlacionan con fracturas que tienen dirección Este-Oeste, obedeciendo la morfología típica de fracturamiento local característico de actividad explosiva y numerosos volátiles. En la superficie de la península y en los extremos del recorrido de la avalancha (del cráter a la base) se caracteriza por las estructuras en hummocks, estos tienden a desaparecer hacia el anfiteatro (depresión).

Simulación numérica de la avalancha del volcán Mombacho que generó las isletas en el lago Cocibolca

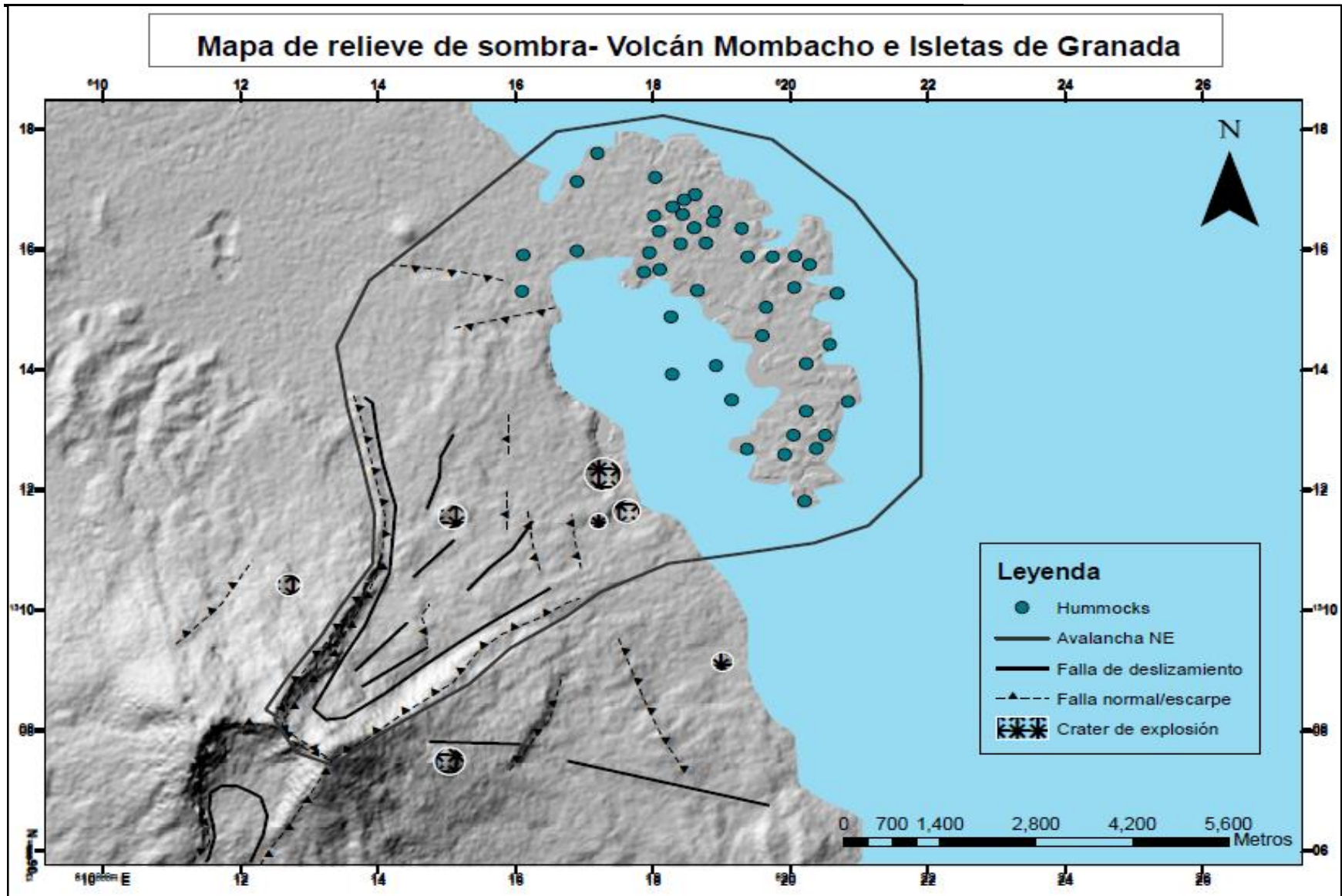


Figura 10- Mapa de relieve sombreado



## **4.1.2 Geología local**

### **4.1.2.1 Descripción del Volcán Mombacho**

El volcán Mombacho es un estratovolcán escarpado, pertenece al segmento volcánico Sureste de la cadena volcánica del pacífico, caracterizado por la actividad de tipo básica y efusiva con predominio de secuencias volcánicas (coladas de lavas y depósitos piroclásticos tipo escorias y cenizas) seguidas por depósitos recientes (coluviales y aluviales).

Esta construido sobre rocas sedimentarias del Pacífico, seguido de material volcánico de las Sierras (Pleistoceno) y posiblemente los depósitos superiores de ignimbritas de Apoyo posteriores que fueron depositados antes del desarrollo de una base ancha de conos subsidiarios donde creció el Mombacho.

El edificio ha sufrido por lo menos tres fenómenos de avalanchas de escombros sin erupción asociada, siendo las más representativas al sur, al noreste y posiblemente una más antigua al sureste. La mayor actividad reciente se ha concentrado al oeste de la vieja cumbre (Pilato, 2005).

El periodo de actividad del volcán Mombacho esta datado en edad Cuaternario al Reciente (Hradecký., 1998), y según el único dato histórico encontrado estuvo en actividad en el año 1570, encontrándose todavía en la fase fumarólica. Los depósitos de avalanchas del volcán Mombacho consisten en materiales inconsolidados los cuales son organizados en unidades con diferentes comportamientos y secuencias. El volcán Mombacho y sus depósitos de avalanchas de escombros, yacen sobre secuencias ignimbríticas de pómez (Apoyo) al E, NE y depósitos de lapilli acrecional al E, S, SE y SW.

#### **4.1.2.2 Depósito de avalancha de escombros Las Isletas (NE)**

##### **4.1.2.2.1 Unidad rica en bloques**

Conforma la unidad de mayor extensión, emplazándose en niveles superiores el cual tiende a disminuir en función de la distancia cubriendo irregularmente la zona distal. Está constituida por bloques de variables tamaños desde 10 cm hasta 10 m con escasa presencia de matriz.

Los bloques son de composición andesítica a augita-hiperstena porfirica (Ui, 1972) inclinados desde el edificio original no se encuentran evidencias de estructuras de choques lo que significa poca interacción entre estos, conformando morfologías hummocks o de montículos.

La forma de los bloques conserva planos correspondientes con fracturas termales o juntas, originadas por tensiones al momento del enfriamiento al interior de los flujos lávicos emitidos del estratovolcán Mombacho. Entonces la densidad en distribución de juntas condiciona el tamaño y forma de los bloques.

En la zona intermedia los bloques consisten de brechas con bordes y esquinas bien angulosas o dentadas volviéndose un poco subredondeados con la distancia, separados a partir de sus planos de enfriamiento y/o debilidad

En la parte distal que se extiende hasta los 12 km, los grandes bloques (o en caso las isletas), expuestos a intensa erosión lacustre, se notan ligeramente imbricados indicando pérdida de energía cinética. Sin embargo la presencia de bloques distanciados cientos de metros puede significar el aumento relativo en el tiempo del nivel del Lago que cubre gran parte del abanico de Las Isletas.

##### **4.1.2.2.2 Unidad con matriz de bloques**

Consiste en bloques pequeños a medianos (<10 m) con aumento en contenido de matriz y en variedad litológica. La matriz consiste de una mezcla no clasificada de fragmentos de origen basáltico, andesítico, pómez dacítica de la base, piroclásticos

con rangos de tamaños desde arcillas finas y cenizas hasta bloques (<0.063 mm - 25 cm). Es importante notar que la ausencia de material juvenil en la matriz, explica una ausencia en actividad magmática asociada con el colapso.

Cerca de la cumbre el material es sujeto a la acción hidrotermal y fumarólica, es compuesta por bloques de 70 cm hasta matriz fina, completamente alterada tipo kaolinita color blanco-amarillento y rojizo. En dependencia del estado de alteración los bloques pueden ser más redondeados y la matriz tiende a ser más fina.

En el estrecho margen Norte del abanico porciones desplazadas, representan coherente estratigrafía interna con niveles piroclásticos preservados, provenientes de pequeños conos de escorias o cenizas.

#### **4.1.2.2.3 Unidad basal rica en Pómez**

Representa la base consistente en secuencias de flujos de pómez de composición dacítica de 0.3 cm hasta 20 cm de diámetro englobada en matriz de cenizas blancuzcas, pocos líticos y algunos cristales de anfíboles aislados. Su centro de origen se relacionó con actividad de la caldera de Apoyo 20 km noroeste del Mombacho (Sussman, 1984).

Su presencia en la facie matriz de Las Isletas explica la mezcla y define el contacto de base. Dicha matriz hace notar la incorporación de material inferior o basal; caracterizado por fragmentos de pómez subredondeados, subangulosos, en partes pulverizados y meteorizados. La presencia de fragmentos de carbón de leña conservados hace suponer alta temperatura al interior de la masa desplazada.

#### **4.1.2.2.4 Unidad de materiales re-trabajados**

Aflora en la zona distal y representa la mezcla o alternancia del nivel de lapilli acrecional con el de pómez en donde este primero se deforma, se fractura y se mezcla en partes inferiores del depósito de pómez. Los lapilli fueron encontrados en la zona distal, descrito como bloques fracturados incorporados dentro de matriz rica

en pómez y con el aumento de distancia tiende a disminuir el volumen de pómez, esto representa la unidad basal mezclada.

#### **4.1.2.2.5 Unidad basal rica en Lapilli**

Esta unidad constituye la parte más inferior del basamento depositado anterior a la unidad rica en pómez; una capa de lapilli acrecional originada a partir de flujos piroclásticos con fragmentos milimétricos a centímetros de composición andesítica a dacítica poco densos. Matriz grisácea con algunos líticos basálticos en general vesiculados y cristales aislados. Esta unidad se encuentra en zonas mayormente distales, se presenta con ligeras ondulaciones, con nítidas fracturas de choque y con disposición original.

Las morfologías son casi lisas o de baja amplitud, coincide con ignimbritas de Formación Las Sierras de edad Pleistocénica (Kuang J., 1972), aunque su fuente no fue determinada porque sus afloramientos son locales y en los alrededores no se encuentra aflorando.

Simulación numérica de la avalancha del volcán Mombacho que generó las isletas en el lago Cocibolca

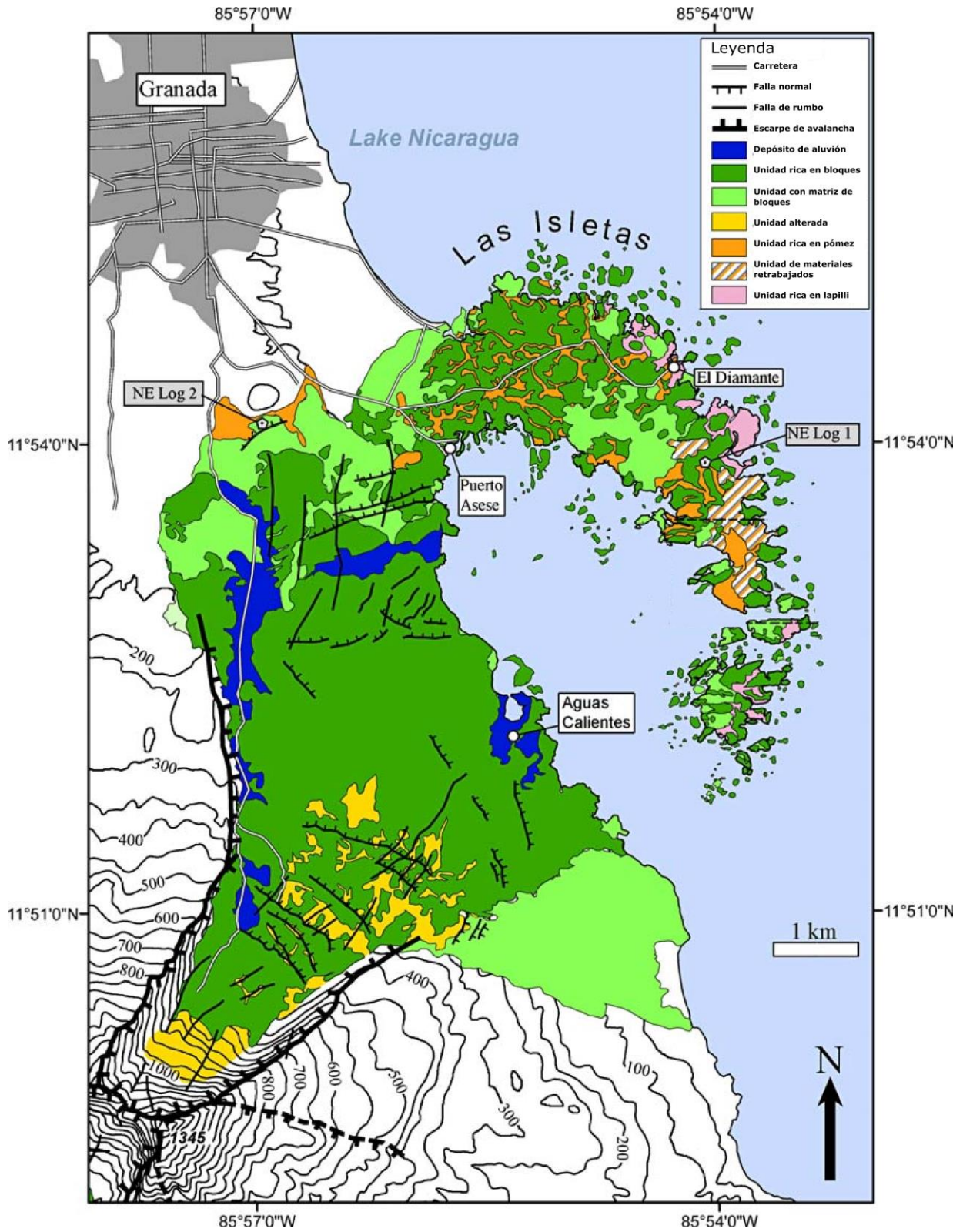


Figura 11- Mapa Geológico del depósito de avalancha de escombros "Las Isletas"

Fuente: (Shea et al., 2007)

### 4.1.3 Mecanismos del colapso

Debido a la asimetría del volcán Mombacho, las tensiones y debilitamiento por el spreading, los estratos se desestabilizan creando fallas transformantes, grabenes, plegamientos anticlinales y anillo de bombamiento que aparece en su base. Todas estas estructuras integradas contribuyen con el accionamiento de avalanchas de escombros del Noreste “Las Isletas”, iniciada por el colapso del anticlinal basal relacionada al spreading, mientras que en el flanco Sur “El cráter” lo fue la acción hidrotermal (Shea et al., 2007).

Así como pliegues cerca del volcán al Sureste que marcan la presencia de otra avalancha de escombros más antigua “La danta”. Y evidencias del anillo de bombamiento en las orillas levantadas del Lago de Nicaragua (Shea et al., 2007).

Se cree que el colapso del flanco Noreste del edificio volcánico fue similar a la del volcán Socompa (Van Wyk de Vries et al., 2001), donde la superficie de falla corta el volcán hacia abajo a la base, y donde una gran proporción de sustrato (Ignimbritas de Apoyo y la unidad Lapilli) estaban involucrados directamente. El sustrato extruido se cortó por la superficie de falla.

Los estudios sobre el Socompa y otros volcanes han demostrado que la difusión puede crear grandes fallas sub-horizontal de empuje en la base del edificio. Este conjunto de fallas basales puede haber empujado progresivamente el sustrato extruido hacia el noreste y ha creado una superficie de debilidad (van Wyk de Vries et al., 2001).

En el flanco Sur “El Cráter” los materiales alterados (arcillas) son más involucrados, por la forma de su escarpe abrupto que corta al Mombacho hasta su núcleo; donde se piensa que la intensa facturación y fallas antiguas profundas permiten la circulación de fluidos hidrotermales que progresivamente debilita el flanco (Pilato, 2005).

#### **4.1.4 Simulación numérica**

##### **4.1.4.1 Mapa de factor de seguridad- volcán Mombacho**

En las zonas más altas del volcán Mombacho, que corresponde a sus laderas y cumbre, se observa que el factor de seguridad varía entre 3 – 6, considerándose relativamente estable. Para que un área sea catalogada como inestable debe de presentar un factor de seguridad menor a 1.5 y como zona crítica no mayor a 0.5. Sin embargo, esto es una primera aproximación en la cual el análisis de la estabilidad de las laderas del Mombacho se realiza desde un punto de vista morfológico primordialmente, ya que no se ha tomado en cuenta otros parámetros como aquellos, correspondientes a las condiciones hidrogeológicas del volcán, estructurales, entre otros.

A como es de esperarse, el factor de seguridad aumenta (las pendientes se hacen más estables) a medida que nos alejamos de la cumbre del volcán.

Dado el caso que factores secundarios (agua, sismicidad, etc.) interfieran en la estructura del volcán, cualquier parte de la cumbre del Mombacho tiene la misma probabilidad de colapsar en el futuro. Para tener una idea del volumen y zonas particulares que pudieran colapsar de las laderas del Mombacho, se muestra el mapa de volumen potencial de colapso, también obtenido con Scoops3D.

##### **4.1.4.2 Mapa de volumen potencial- volcán Mombacho**

En el mapa de volúmenes se observa que en el caso de un colapso en la cumbre del volcán, aproximadamente 500,000,000 m<sup>3</sup> (0.5 km<sup>3</sup>) de material podrían desprenderse, es decir un poco menos de la mitad del volumen que se desprendió durante la avalancha de escombros de “las isletas” (1.2 km<sup>3</sup> aproximadamente), a medida que va descendiendo, la cantidad en volumen va aumentando, esto se debe a que el resultado se basa únicamente en la morfología actual del edificio volcánico, sin incluir datos geofísicos ni geotécnicos.

Estos resultados nos ayudan a zonificar por avalanchas de escombros el volcán Mombacho.



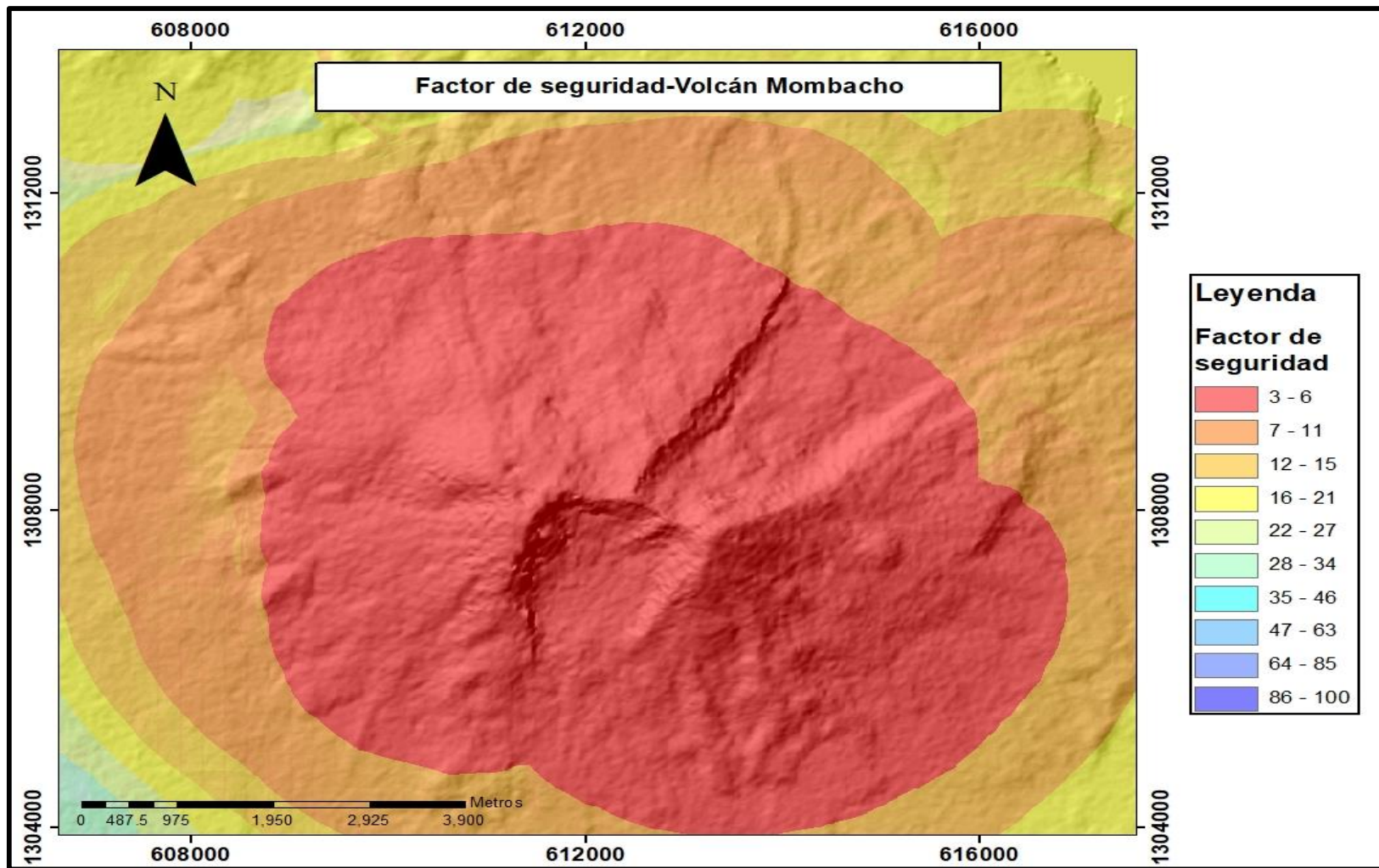
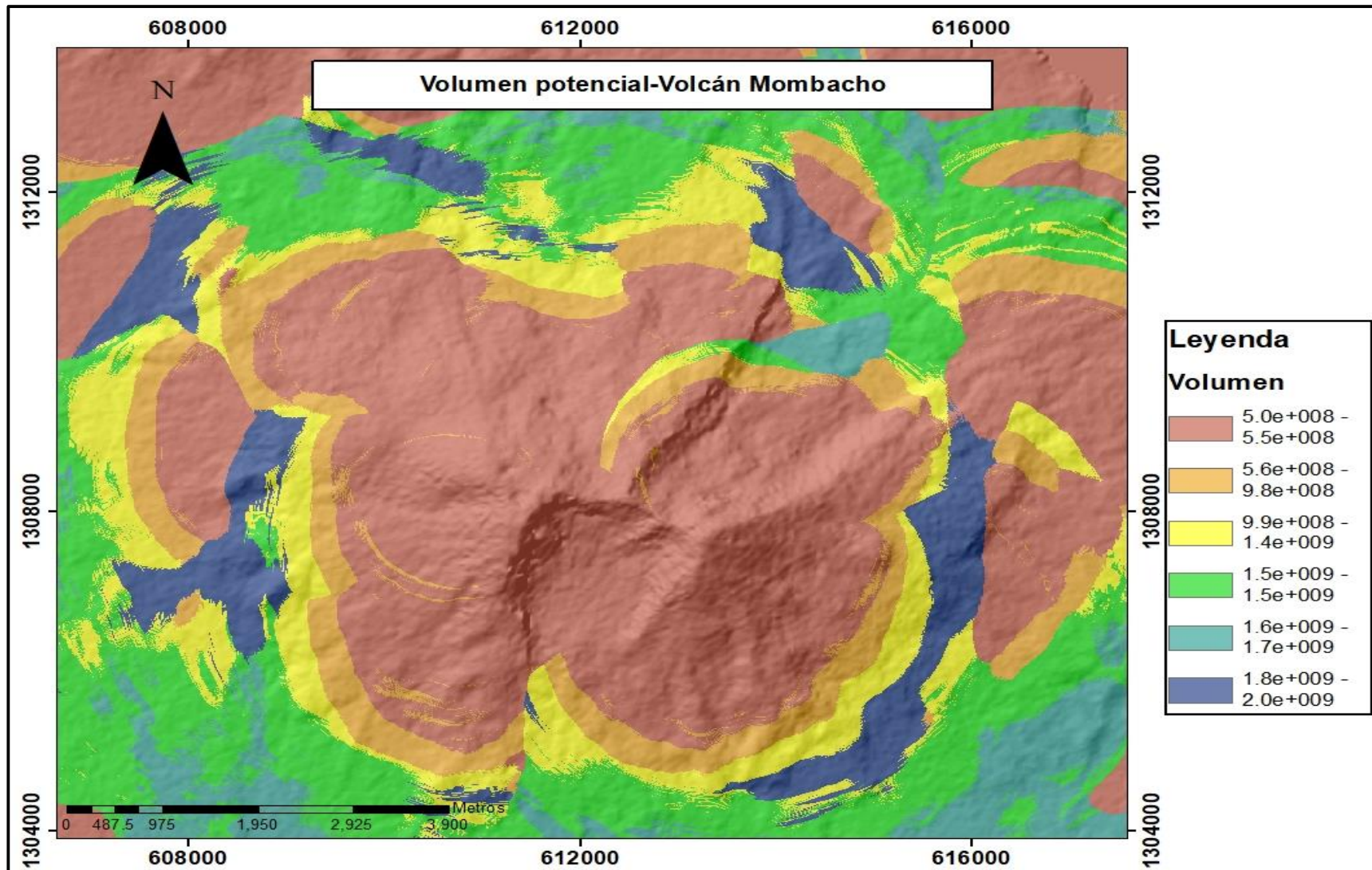


Figura 12- Factor de seguridad para el volcán Mombacho obtenido por el método simplificado de Bishop





*Figura 13- Mapa de volúmenes potenciales a colapsar del volcán Mombacho*

#### 4.1.4.3 Mapa de zonificación de peligro por avalanchas de escombros en el volcán Mombacho

El mapa de zonificación de peligro por avalanchas de escombros del volcán Mombacho, (**Ver Figura N<sup>o</sup>. 13**), fue generado combinando los resultados del software Scoops3D, precisamente el factor de seguridad y volúmenes más grandes probables a colapsar.

De dicho mapa podemos ver que la cumbre del volcán es la zona más peligrosa, a como es de esperarse, pero un aspecto muy interesante es que el peligro intermedio está ubicado en los flancos noreste-este y oeste del volcán. Esto puede servir como sugerencia para implementar sistemas de monitoreo por inestabilidad de laderas en esas partes del volcán Mombacho.

Los poblados o comunidades que quedan dentro de la zona de peligro por inestabilidad de las laderas del volcán Mombacho son las siguientes:

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| La Esperanza   | Las Esmeraldas       |
| El Camelo      | Santa Margarita      |
| La Chuscada    | Las Colinas          |
| La Asunción    | Pancasán (El cráter) |
| Germán Pomares | San Joaquín          |
| El Progreso    | La Luz               |
| Las Delicias   | Santa Ana            |

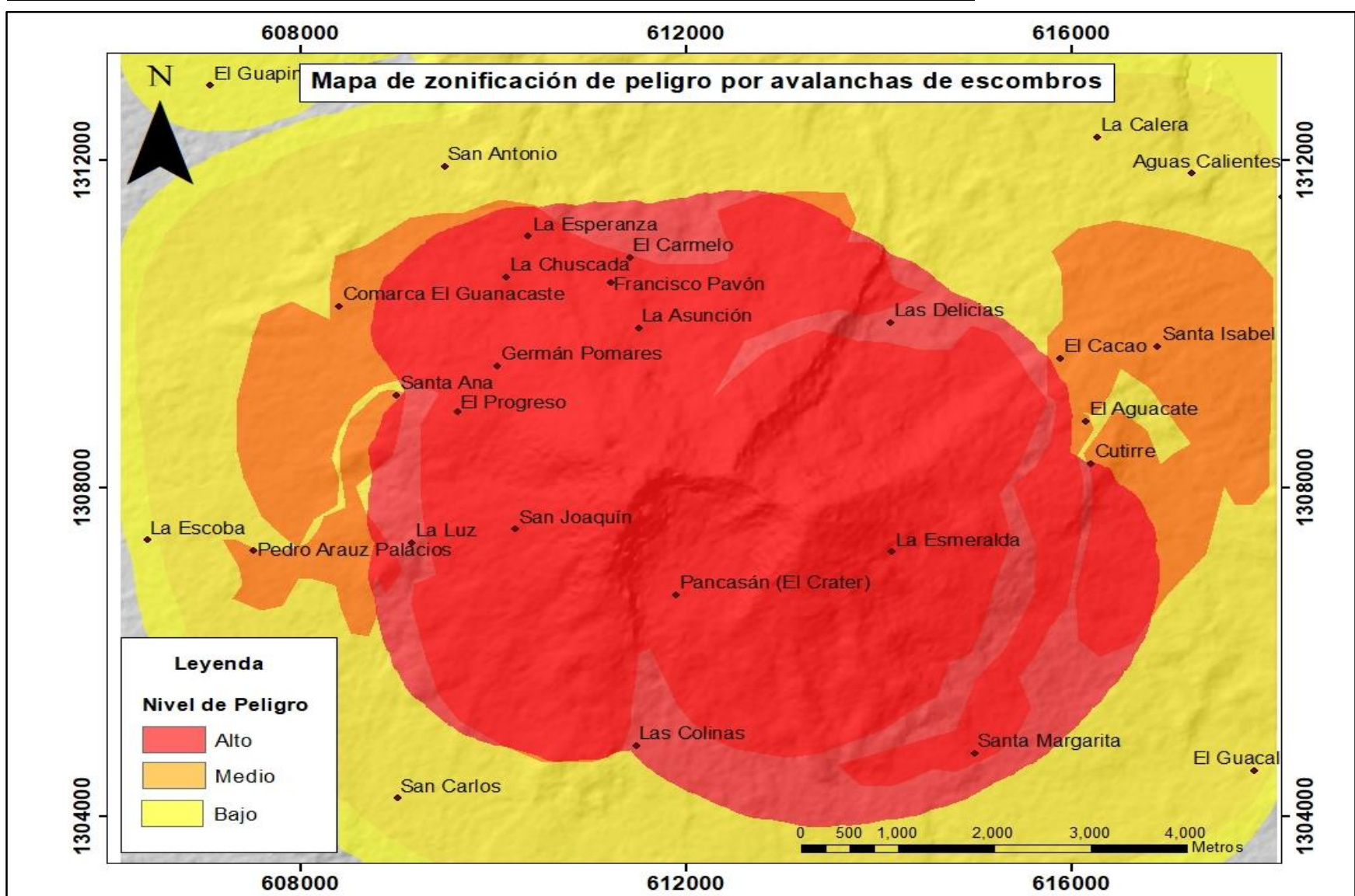


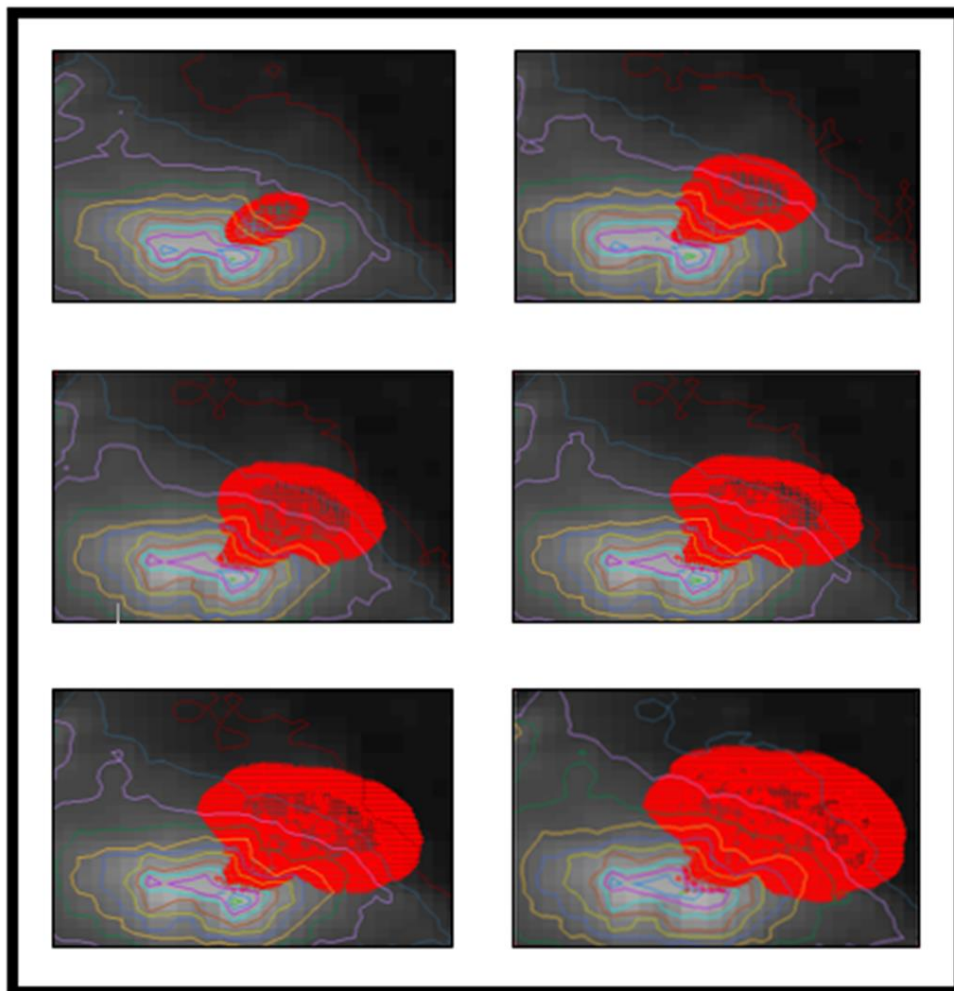
Figura 14- Mapa de zonificación por avalancha de escombros



#### 4.1.4.4 Simulación de la avalancha de escombros Las Isletas del volcán Mombacho

Se realizó la simulación de la avalancha de escombros de Las Isletas con el programa TITAN2D, utilizando inicialmente un volumen de  $1.2 \text{ km}^3$ , el cual es el estimado por Shea et al. (2007), Sin embargo, este volumen es demasiado pequeño ya que no logra viajar más allá de la base del volcán, por consiguiente, se incrementando el volumen paulatinamente y finalizando con un volumen de  $5.6 \text{ km}^3$ , el cual es casi 5 veces superior al reportado en artículos científicos, aun así, el flujo de escombros volcánicos no logró llegar hasta donde alcanzó el de Las Isletas. **Ver**

**Figura Nº. 14**



**Figura 15- Simulación numérica obtenida por TITAN 2D con un volumen de  $5.6 \text{ km}^3$ , el contorno en rojo muestra el resultado de la simulación realizada**

Este resultado llama mucho la atención en el sentido que sugiere que el volumen reportado en los artículos científicos para la avalancha de escombros de Las Isletas podría estar subestimado, es decir, podría ser realmente mayor, lo cual tiene importantes implicaciones en la evaluación de peligros por avalanchas de escombros para este volcán.

Se requiere de un volumen significativamente grande para poder reproducir con TITAN2D la avalancha de escombros que dio origen al depósito de Las Isletas (**Ver Figura Nº. 15**). Si uno similar ocurriera nuevamente, como el aquí simulado, borraría del mapa las siguientes comunidades:

|              |                 |
|--------------|-----------------|
| Las Delicias | El Aguacate     |
| El Cacao     | Santa Isabel    |
| Cutirre      | El Tule         |
| El Tulito    | Aguas Calientes |
| La Caldera   |                 |

Este resultado es muy importante y debe ser tomado en cuenta por los planificadores territoriales y tomadores de decisión.

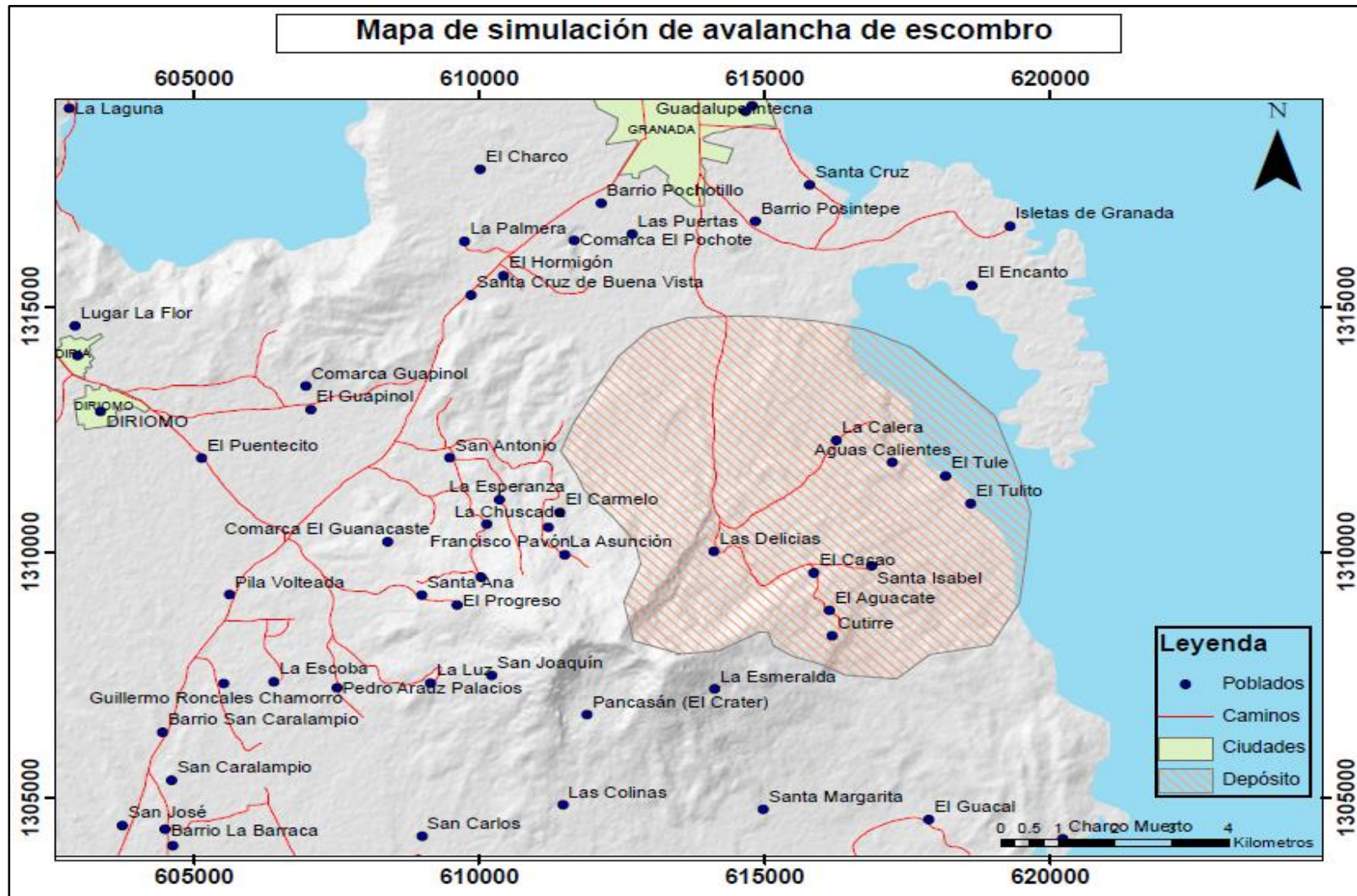


Figura 16- Mapa de cobertura de una nueva avalancha de escombros desencadenada en la cárcava del flanco noreste del volcán Mombacho, simulado con el software TITAN2D

## CAPÍTULO V.

### 5.1 CONCLUSIONES

1. El volcán Mombacho ha sido un lugar geográfico importante en el que se han manifestados dos eventos de avalanchas de escombros, una en el flanco Sur “El cráter” y otra en el flanco Noreste “Las isletas”.
2. El análisis morfoestructural revela una serie de estructuras geológicas, definiendo tres sistemas de fallas en el área con orientación NE-SO, N-S, y algunas NW-SE, estas fallas normales son generadas por el deslizamiento hacia abajo de las zonas inclinadas parcialmente por alteración hidrotermal; y estructuras circulares como maeres, cráteres de explosión y hummocks a lo largo del anfiteatro y península.
3. La distribución geológica del área comprende depósitos recientes.
4. En el colapso de la ladera Noreste interfirieron factores como la morfología del edificio, rasgos estructurales y el spreading, a diferencia del colapso Sur se asocia a un sistema hidrotermal y aun fracturamiento intenso.
5. Los datos obtenidos del software Scoops3D permitió definir los factores de seguridad de todo el edificio volcánico, observando que debido a su morfología actual es estable y la cantidad de volúmenes de material si algún agente secundario interfiere en la estructura del volcán.
6. La zonificación de peligros por avalanchas de escombros del volcán Mombacho muestra que las siguientes comunidades están en peligro: La Esperanza, El Camelo, La Chuscada, La Asunción, Germán Pomares, El Progreso, Las Delicias, Las Esmeraldas, Santa Margarita, Las Colinas, Pancasán (El Cráter), San Joaquín, La Luz y Santa Ana.
7. La simulación de una nueva avalancha de escombros que se desencadene por la cárcava del flanco noreste del volcán Mombacho (la misma que dio origen al depósito de Las Isletas) pone en peligro a las siguientes comunidades: Las Delicias, El Cacao, Santa Isabel, El Aguacate, Cutirre, El Tulito, El Tule, Aguas Calientes y La Caldera.

8. La simulación de la avalancha de escombros de Las Isletas con el software TITAN2D, sugiere que esta pudo haber tenido un volumen mucho más grande que el reportado en la literatura científica. Simular esta misma avalancha de escombros con otro software reafirme, o contradiga, esta conclusión particular.
9. Los resultados presentados en esta tesis sirven de base para la elaboración de un mapa de amenazas volcánica completo del volcán Mombacho, un volcán que volverá a colapsar en algún momento debido a que posee todos los parámetros para la ocurrencia de tal fenómeno, ya que presenta laderas inestables, un sistema hidrotermal muy activo y de alta temperatura, y asentamientos humanos dentro de zonas de peligro.



## 5.2 RECOMENDACIONES

Con el propósito de contribuir al conocimiento geo-científico del volcán Mombacho se recomienda:

1. Es necesario un análisis donde se integren todos los parámetros como aquellos correspondientes a las condiciones hidrogeológicas del volcán, estructural, geofísica, lo cual sería un tema de investigación más complejo y de mayor perspectiva temporal, idealmente para estudios de postgrados, ya sea maestría o doctorado.
2. Usar programas computacionales donde se pueda trabajar con todos los datos geotectónicos y geofísicos para obtener resultados más precisos.
3. Es importante contar con un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una alta resolución para garantizar mejores resultados de las simulaciones, dado que la topografía controla en gran medida las velocidades y direcciones que toma la avalancha.
4. Tomar como punto de partida para la elaboración de mapas de amenazas integrales del volcán Mombacho los resultados obtenidos y presentados en este trabajo de tesis.
5. Elaborar tesis de maestría y/o doctoral agregando mayor complejidad al software Scoops3D para obtener una evaluación del factor de seguridad del volcán Mombacho. Al Scoops3D se le puede incorporar para geotécnicos, así como factores de amplificación sísmica del suelo, el cual se obtiene de estudios geofísicos.
6. Realizar más simulaciones de avalanchas de escombros para todos los flancos del volcán Mombacho con el TITAN2D u otro software similar.
7. Extender este tipo de estudio a otros volcanes con pendientes inestables, como El Casitas, por ejemplo.

### 5.3 BIBLIOGRAFÍA

- Avellán L., D. (2004). Estudio geológico de la parte norte del volcán Mombacho y las isletas de Granada. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. UNAN-MANAGUA, 1-97.
- Bernard, B. (2005). Structural analysis and experimental investigation of the Perrier debris avalanche deposits (French Massif Central). *Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*.
- Bonilla, G., Muñoz, A., Cruz, L., & Chávez, G. (2005). *Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenaza por inestabilidad de laderas*. INETER-COSUDE. Proyecto MET-ALARN.
- Borgia, A., Ferrari, L., & Pasquiarè, G. (1992). Importance of gravitational spreading in the tectonic and volcanic evolution of Mount Etna. *Nature*, 357(6375), 231.
- Cecchi, E., de Vries, B. V. W., & Lavest, J. M. (2004). Flank spreading and collapse of weak-cored volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 67(1), 72-91.
- De Vries, B. V. W., & Borgia, A. (1996). The role of basement in volcano deformation. *Geological Society, London, Special Publications*, 110(1), 95-110.
- De Vries, B. V. W., & Francis, P. W. (1997). Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature*, 387(6631), 387.
- De Vries, B. V. W., Kerle, N., & Petley, D. (2000). Sector collapse forming at Casita volcano, Nicaragua. *Geology*, 28(2), 167-170.
- Dengo. (1983). Mid-America: Tectonic setting for the Pacific margin from southern Mexico to northern Colombia. *Cent. Estud. Geol. Am. Cent., Guatemala*, 56.
- Dengo, G. (1973). Estructura Geológica, Historia Tectónica y Morfológica de América Central. ICAITI. Guatemala. Guatemala

- De Vries, B. V. W., Self, S., Francis, P. W., & Keszthelyi, L. (2001). A gravitational spreading origin for the Socompa debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105(3), 225-247.
- Donnadiou, F., & Merle, O. (2001). Geometrical constraints of the 1980 Mount St. Helens intrusion from analogue models. *Geophysical Research Letters*, 28(4), 639-642.
- Elsworth, D., & Voight, B. (1995). Dike intrusion as a trigger for large earthquakes and the failure of volcano flanks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4), 6005-6024
- Frischbutter, A. (2002). Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images. *Geofísica Internacional*, 41(2), 87-102.
- Garayar, J. (1971). *Geología y depósitos de minerales de una parte de las mesas de Estelí, cordillera norte y montañas de Dipilto*. Catastro e Inventario de Recursos, Managua (Nicaragua).
- Glicken, H. (1996). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington* (No. 96-677). US Geological Survey.
- Hodgson, G. (2000). Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua. *Inédito*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 1-184.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.
- Kerle, N., & De Vries, B. V. W. (2001). The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua—investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105(1-2), 49-63
- Kuang, J. (1971). *Estudio geológico del Pacífico de Nicaragua*. Catastro e Inventario de Recursos Naturales.

- Lagmay, A. M. F., de Vries, B. V. W., Kerle, N., & Pyle, D. M. (2000). Volcano instability induced by strike-slip faulting. *Bulletin of Volcanology*, 62(4-5), 331-346.
- López, D. L., & Williams, S. N. (1993). Catastrophic volcanic collapse: relation to hydrothermal processes. *Science*, 260(5115), 1794-1796.
- McBirney, A., & Williams. (1965). Volcanic History of Nicaragua. California: University of California
- McGuire, W. J. (1996). Volcano instability: a review of contemporary themes. *Geological Society, London, Special Publications*, 110(1), 1-23.
- McGuire, W. J., Pullen, A. D., & Saunders, S. J. (1990). Recent dyke-induced large-scale block movement at Mount Etna and potential slope failure. *Nature*, 343(6256), 357.
- McGuire, W. J., Stewart, I. S., & Saunders, S. J. (1997). Intra-volcanic rifting at Mount Etna in the context of regional tectonics. *Acta Vulcanologica*, 9, 147-156.
- Merle, O., Vidal, N., & van Wyk De Vries, B. (2001). Experiments on vertical basement fault reactivation below volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B2), 2153-2162.
- Pilato Q., M. (2005). Avalanchas de Escombros del Volcán Mombacho, Granada – Nicaragua. Tesis Mag. Red Centralrisk, 1-70.
- Reid, M. E., Christian, S. B., Brien, D. L., & Henderson, S. (2015). Scoops3D—Software to Analyze Three-Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. US Geological Survey Techniques and Methods, book, 14.
- Siebert, L., Glicken, H., & Ui, T. (1987). Volcanic hazards from Bezymianny-and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 49(1), 435-459.
- Ui, T. (1983). Volcanic dry avalanche deposits—identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18(1-4), 135-150.

- Vallance, J. W., Schilling, S. P., & Devoli, G. (2001). *Lahar hazards at Mombacho volcano, Nicaragua* (No. 2001-455). US Geological Survey.
- Vallance, J. W., & Scott, K. M. (1997). The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 143-163.
- Van Wyk de Vries, B., & Merle, O. (1996). The effect of volcanic constructs on rift fault patterns. *Geology*, 24(7), 643-646.
- Vidal, N., & Merle, O. (2000). Reactivation of basement faults beneath volcanoes: a new model of flank collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99(1-4), 9-26.
- Voight, B. (2000). Structural stability of andesite volcanoes and lava domes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1770), 1663-1703.
- Voight, B., Glicken, H., Janda, R. J., & Douglass, P. M. (1981). Catastrophic rockslide avalanche of May 18. *US Geological Survey Professional Paper*, 1250, 347-377.
- Zoppis Bracci, L. (1957). Estudio geológico de la region de Palacaguina y de su depósito de antimonio. *Bol. Serv. Geol. Nac. Nicaragua*, 1, 29-34.