

ANALISIS PROBABILISTICO POR FLUJOS PIROCLASTICOS EN EL AREA DE
INFLUENCIA DEL VOLCAN AZUFRAL – DEPARTAMENTO DE NARIÑO

OSCAR DAVID CHAMORRO MONTENEGRO
IVAN DARIO MORILLO CORAL

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2013

ANALISIS PROBABILISTICO POR FLUJOS PIROCLASTICOS EN EL AREA DE
INFLUENCIA DEL VOLCAN AZUFRAL – DEPARTAMENTO DE NARIÑO

OSCAR DAVID CHAMORRO MONTENEGRO
IVAN DARIO MORILLO CORAL

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Civil

Director,
PhD. GUSTAVO CÓRDOBA GUERRERO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2013

“ Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado, son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1 966, emanado por el Honorable consejo directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado A

Jurado B

San Juan de Pasto, Septiembre de 2013

DEDICATORIA

A nuestros padres, hermanos, familiares y amigos, que con su apoyo, paciencia y cariño constante fueron el motor para nuestro desarrollo personal y académico en el transcurso de nuestra vida.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Gustavo Córdoba Guerrero por su tiempo, su valiosa asesoría y su apoyo constante para la realización del presente proyecto.

A la Universidad de Nariño, por la financiación total del proyecto por medio de la convocatoria “Alberto Quijano Guerrero”.

A la alcaldía de Túquerres, por el interés prestado en el desarrollo del proyecto y el suministro de información para la consecución del mismo.

A Mauricio Morillo Rosero, Álvaro Polo Bolaños y Jorge Dávila por su contribución en las salidas de campo durante el desarrollo del proyecto.

A todas y cada una de las personas que aportaron su granito de arena para alcanzar el objetivo de terminar este trabajo de grado.

RESUMEN

La construcción de un modelo de análisis probabilístico de la amenaza por flujos piroclásticos de un volcán presenta un gran desafío desde todos los puntos de vista. La dinámica de estos flujos es tan compleja que su modelación todavía es materia de investigación, debido a que sus condiciones iniciales son inciertas. A partir de los registros geológicos se puede evaluar un rango de volúmenes y el tipo de material depositado, que puede proporcionar una idea de la reología del flujo. Las alturas de colapso, las velocidades iniciales, las direcciones e incluso el lugar por donde serán expulsados son desconocidos. Sin embargo, existen métodos que permiten aproximarse a la realidad del comportamiento de dichos flujos, los cuales emplean datos estadísticos, basados en registros geológicos de un volcán y pueden ser aplicados en otros volcanes de similares características. En este trabajo se presenta una aplicación del modelo de línea de energía para estimar las probabilidades de que un flujo piroclástico pueda llegar a una red de puntos topográficos en un modelo de elevación digital de un volcán. En cada punto de la red se calcula el coeficiente de Heim y luego se usan los datos de probabilidad para flujos piroclásticos recogidos por Sheridan y Macías en el volcán de Colima, México, y de esta manera se encuentra la probabilidad de dicho punto. Por lo tanto, se ofrece una herramienta programada en Octave / Matlab de bajo costo computacional, para producir un modelo de amenaza probabilístico en cualquier tipo de estratovolcán. La herramienta se aplica en el volcán Azufral, Nariño, Colombia, para originar su primer modelo probabilístico de amenaza por flujo piroclásticos.

ABSTRACT

The construction of probabilistic hazard models for pyroclastic flows on a volcano presents a big challenge from many viewpoints. The dynamics of such flows is so complex that their modeling still is a research matter because their initial conditions from the crater (dome or column collapses) are uncertain. Geological records can yield a range of volumes and the kind of deposited material which can provide an idea of the rheology of the flow. The collapse heights, initial velocities, directions and even vent locations of future flows are unknown. However, there are statistical methods to approximate the actual behavior of these flows, based on geological records of a volcano. This technique can be applied to other volcanoes of similar characteristics. In this paper, an application of the model of the energy line is presented to estimate the likelihood that a pyroclastic flow can reach a network of survey points on a digital elevation model of a volcano. In each point of the network, the Heim coefficient is calculated. Then, the pyroclastic flow probability is collected with the method of Sheridan and Macias for the Colima volcano in Mexico. In this way, the probability of any and every point is found. Therefore, it provides a tool programmed in Octave / Matlab with low computational cost. Produces a probabilistic hazard model to stratovolcanoes. The tool is applied to Azufral volcano in Colombia, to produce its first probabilistic by pyroclastic flows hazard model.

CONTENIDO

	pág.
1.	18
1.1.	18
1.2.	18
1.3.	18
1.4.	18
1.5.	21
1.5.1.	21
1.5.2.	21
1.5.2.1.	21
1.5.2.2.	22
1.5.2.3.	22
1.5.2.3.1.	23
1.5.2.3.2.	23
1.5.2.3.3.	23
1.5.2.3.4.	24
1.5.2.3.5.	24
1.5.3.	27
2.	29
2.1.	29
2.2.	29
2.3.	30
2.3.1.	30
2.3.2.	30
2.3.3.	30
2.4.	30
2.4.1.	30
2.4.2.	31
2.4.3.	31
2.4.4.	32
2.4.5.	33
2.4.6.	33
2.4.7.	34
2.5.	34
2.5.1.	34
2.5.2.	37
2.6.	38
2.6.1.	39
2.6.2.	39

2.6.3.	INGEOMINAS (1997)	40
3.	PROGRAMAS DE ANALISIS Y DESPLIEGUE	43
3.1.	GRASS	43
3.2.	OCTAVE O GNU OCTAVE	43
4.	ANALISIS PROBABILISTICO	45
4.1.	TOPOGRAFIA	45
4.2.	DISTANCIA HORIZONTAL	47
4.3.	ALTURA	48
4.4.	RUTINA EN OCTAVE PARA CALCULAR LOS COEFICIENTES DE HEIM	51
5.	RESULTADOS	54
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	60
6.1.	MUNICIPIO DE SANTACRUZ DE GUACHAVEZ	60
6.2.	MUNICIPIO DE TUQUERRES	63
6.3.	MUNICIPIO DE SAPUYES	66
6.4.	MUNICIPIO DE MALLAMA	69
7.	CONCLUSIONES	71
8.	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFIA	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Municipios, Corregimientos y Veredas en el área de influencia del Volcán Azufra.	19
Tabla 2. Rango de Probabilidades y su relación con los coeficientes de Heim en el Volcán de Colima.	52

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Entorno geográfico volcán AzufraI.	20
Figura 2.1: Depósitos piroclásticos y de cenizas en el sendero de ascenso al cráter.	25
Figura 2.2: Depósitos piroclásticos y de cenizas en el sendero de ascenso al cráter.	25
Figura 3.1: Depósitos piroclásticos en el corregimiento del Espino.	26
Figura 3.2: Detalle de depósitos piroclásticos en el corregimiento del Espino.	26
Figura 4: Laguna cratérica Volcán AzufraI.	27
Figura 5: Edificio volcánico reciente del AzufraI.	28
Figura 6: Tipos de Amenazas Volcánicas.	32
Figura 7: Ecuación de la energía en una tubería.	35
Figura 8: Esquema del concepto de línea de energía.	37
Figura 9: La línea de energía para un flujo que se detiene.	38
Figura 10: Estimación del área de influencia de flujos piroclásticos según Sheridan y Malin.	39
Figura 11: Gráfico que muestran las distribuciones del coeficiente de Heim trazados en papel de probabilidad aritmética.	41
Figura 12: Mapa de Amenaza por flujos piroclásticos del volcán Galeras usando la metodología de la línea de energía.	42
Figura 13: Modelo Digital de Elevación con resolución de 30x30m del Volcán AzufraI y de su Área Influencia.	46
Figura 14: Mapa Vectorial de la Topografía del Volcán AzufraI con una vista superior de la línea de Energía entre el Cráter y la Cabecera Municipal de Túquerres.	49
Figura 15: Perfil Topográfico desde el Cráter hasta la Cabecera Municipal de Túquerres.	50

Figura 16: Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 0 metros.	57
Figura 17: Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 500 metros.	58
Figura 18: Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 1000 metros.	59
Figura 19: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, Vistos desde la cabecera Municipal de Guachavéz.	61
Figura 20: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, Vistos desde la cabecera del corregimiento de Balalaika.	62
Figura 21. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para corregimientos del municipio de Túquerres.	64
Figura 22. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la cabecera del municipio de Túquerres.	65
Figura 23. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la cabecera del corregimiento del Espino.	67
Figura 24. Depósitos de oleadas y Flujos Piroclásticos en el corregimiento del Espino.	68
Figura 25. Depósitos de Flujos Piroclásticos en el corregimiento del Espino debido al colapso de un domo.	69
Figura 26: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la Cabecera del municipio de Mallama.	70

INTRODUCCION

En el suroriente del departamento de Nariño, entre los municipios de Túquerres, Sapuyes, Mallama y Santa Cruz de Guachavez, se encuentra ubicado el volcán Azufral con una elevación de 4070 m s.n.m., posee un cráter con un diámetro aproximado de 3 km, en donde se encuentra la Laguna Verde, es del tipo estratovolcán calderico, lo que significa que está compuesto por múltiples capas de lava endurecida, flujos piroclásticos alternantes y cenizas volcánicas. Los estratovolcanes por lo general se caracterizan por tener una forma cónica de perfil escarpado, presentan erupciones periódicas y explosivas con un magma rico en sílice, fenómenos que indican potenciales amenazas para la población y la infraestructura (INGEOMINAS, 1989).

Los flujos piroclásticos son una mezcla de gases volcánicos, sólidos calientes y aire atrapado que se mueve a nivel del suelo y a altas velocidades, liberados típicamente en erupciones explosivas. Este tipo de flujos son extremadamente peligrosos puesto que las temperaturas alcanzan hasta 900 grados y una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora, son completamente letales, destruyen todo lo que se encuentra a su paso y es prácticamente imposible sobrevivir a ellos. Se estima que en América Latina y el Caribe, aproximadamente 60% de las muertes por erupciones volcánicas son causadas por este tipo de flujos. (OMS, OPS, 2005).

El volcán Azufral presenta el registro de depósitos asociados con flujos de lava, flujos piroclásticos de gran magnitud y depósitos de caída de ceniza. En la actualidad existe actividad fumarólica, algunas manifestaciones sísmicas y de pequeñas erupciones freáticas. Se dispone de algunos registros sísmicos de eventos de largo periodo y algunas señales vulcano tectónicas (INGEOMINAS, 1989). Según Espinosa (2001), no se conocen erupciones históricas, sólo actividad fumarólica de varios siglos atrás. Por su parte, el Servicio Geológico Colombiano realiza un monitoreo permanente de la actividad del volcán Azufral en las estaciones La Roca y Chaitán, cuentan con sensores sísmicos e inclinómetros electrónicos. Es de resaltar que el 24 de noviembre se instaló hacia el sector sur de la Laguna Verde, una estación sísmica, como complemento a las ya instaladas y una cámara Web, para el seguimiento de la actividad superficial que pueda presentarse. (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, 2012).

Conociendo de antemano que en los municipios de la zona de influencia del volcán Azufral habitan alrededor de 80000 personas (DANE, censo 2005) y que la naturaleza del planeta y su dinámica garantiza que todo lugar este sujeto en algún momento de sufrir algún evento físico potencialmente peligroso, en este caso particular la amenaza de erupciones futuras con presencia de flujos piroclásticos, se busca caracterizar dicha amenaza y plasmar en una serie de mapas los resultados obtenidos en las distintas modelaciones hechas sobre la topografía de la zona de influencia del volcán.

Este trabajo pretende describir las características de la zona de estudio, además explicar los conceptos y términos usados a lo largo de la investigación para facilitar la

comprensión a los lectores. En la segunda parte se analiza el concepto de línea de energía desde el punto de vista hidráulico y su aplicación a modelos de flujos de masa sedimentarios como también algunos antecedentes relacionados con los mapas de amenaza. Después de describir el proceso de obtención de datos, los cálculos con ayuda de Octave y la visualización de los resultados en Grass procede a analizar los resultados, sacar conclusiones y hacer las respectivas recomendaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un mapa de amenaza probabilístico por flujos piroclásticos para la zona de influencia del volcán Azufra.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar información histórica sobre la actividad del volcán Azufra.
- Obtener un modelo digital de elevación de la zona de influencia del volcán Azufra al menos con una aproximación de 30m.
- Aplicar el método de las líneas de energía usado por Sheridan y Macías (1995) en el volcán Colima (México) en el modelo digital obtenido.
- Sistematizar el uso de una herramienta SIG (sistema de información geográfica) para determinar el alcance máximo del flujo en una nube de puntos determinada, de manera aleatoria con ayuda de Matlab u Octave.
- Plasmar los resultados en un mapa, para facilitar la identificación de las zonas con diferente nivel de amenaza.
- Identificar el nivel de amenaza de centros poblados cercanos.
- Proporcionar una herramienta para la estimación de la amenaza por flujos piroclásticos para los países latinoamericanos y de habla hispana.

1. CARACTERIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el área de influencia del volcán Azufral (ver figura 1) se encuentran 4 municipios, 7 corregimientos y 20 veredas (Ver tabla 1), a continuación se nombran los datos más relevantes para cada municipio:

1.1. Municipio de Túquerres

Extensión total: 221.4 km²

Población área urbana: 17 090 habitantes. (DANE, 2005)

Población área rural: 23 956 habitantes. (DANE, 2005)

Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 3 104

1.2. Municipio de Sapuyes

Extensión total: 133 km²

Población área urbana: 1 534 habitantes. (DANE, 2 005)

Población área rural: 5 369 habitantes. (DANE, 2 005)

Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 2 900

1.3. Municipio de Santacruz de Guachavéz

Extensión total: 527 km²

Población área urbana: 5 602 habitantes. (DANE, 2 005)

Población área rural: 18 528 habitantes. (DANE, 2 005)

Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 2 000 a 3 000 metros

1.4. Municipio de Mallama

Extensión total: 626, km²

Población área urbana: 1 331 habitantes. (DANE, 2 005)

Población área urbana: 7 162 habitantes. (DANE, 2 005)

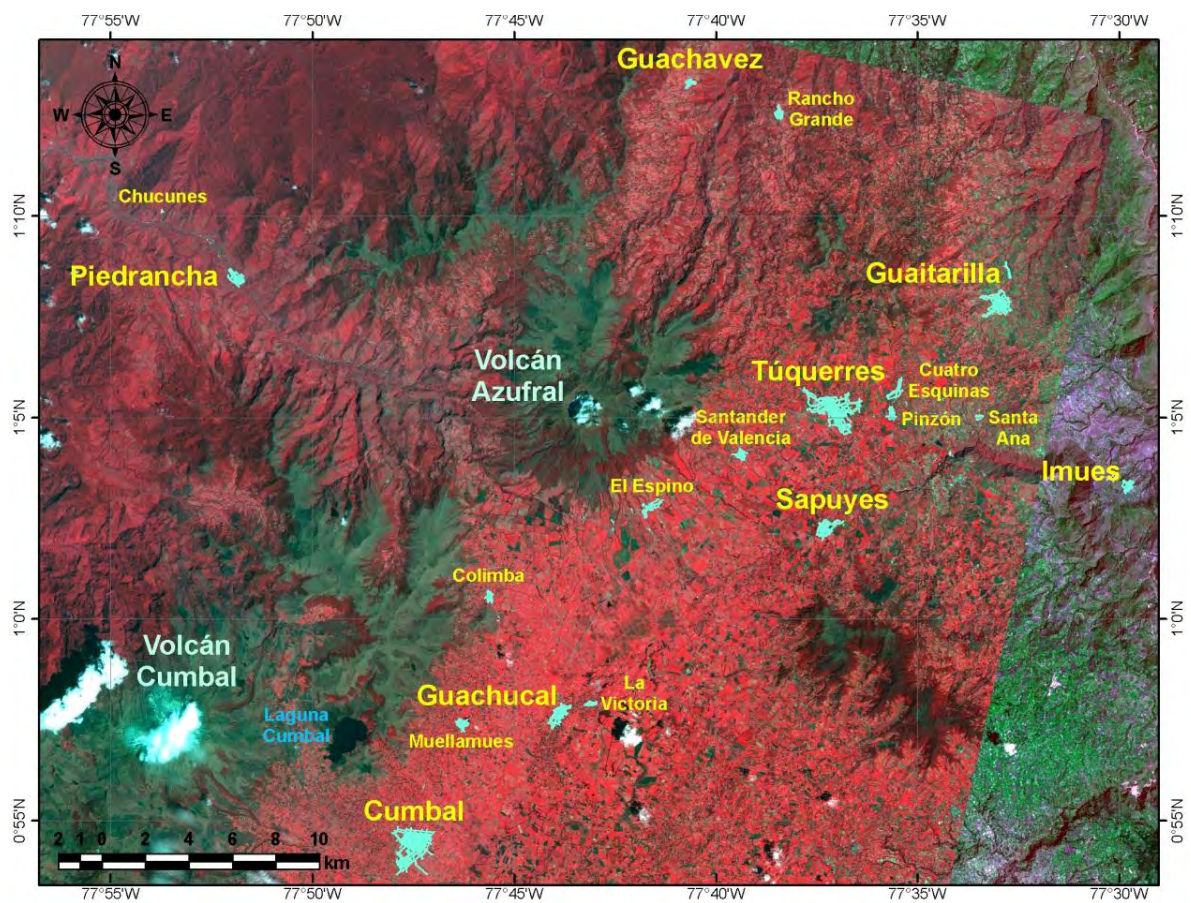
Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 1 809

Tabla 1: Municipios, Corregimientos y Veredas en el área de influencia del Volcán Azufral.

Municipio	Corregimiento	Veredas
Mallama	Chambu	Chambu, Guaises, Pueblo Viejo, Tercan
	El Guabo	El Guabo, El Paramillo, El Verde, pueran, San Jorge
	Especial	Betania, Piedrancha, oataquer, Carmelo, El Arco, El Rosal.
	Puspued	La Oscurana, Puspued y Malama
	Pususquer	Andalucia, Cabuyal, Pusuesquer
	San Miguel	Curcuel, piluales, providencia, san Miguel.
	Chucunes	Chucunes, arenal, Los Dos Rios
Santacruz	Balalaica	San José, Cuesta de la Cruz, Porvenir, Chaguez, Ipala, Guarango.
	Manchag	Inga, Peña Blanca, Guamanchag.
	Santa Rosa	Brisas, Changua, Puspan, Cundes, Pedregal.
	El Edén	El Edén, la Montaña
	Piaramag.	Taquelan, Cualchag, Candagan.
	Sande	Florida, Tabano, Madroño
	Chapuesquer	Arrayan, Piaramag, Chapuesquer, Chipacued, la Montaña y El Diamante
Túquerres	Albán	Alban, Guaramuez, Payacas
	Cuatro esquinas	La Guayaquilla, El Obrero, San Carlos Cuatro Esquinas, El Socorro, Santa Isabel, Cofradia.
	Olaya	Vereda Olaya, Vereda Nangan, Loma Larga, Hueco De Moras, Santa Rosa, Las Delicias, Taindez.
	Pinzón	Muerchag, Igua Libertad, La Floresta, San Jose, Puente Alto.
	La Laguna	La Laguna, La Flor, El Escritorio.
	Santander	La Florida, El Chungel, El Manzano Alto, El Manzano Bajo, La Palma, La Cienaga.
	Tutachag	Vereda Tutachag Bajo, Chanarro Alto, Vereda Chanarro Bajo, Vereda Tutachag Alto, Vereda La Jardinera.
	Yascual	Cuetampe, Pueranquer, Buenavista, La Acequia, El Pescadillo, Santa Cecilia Panamal, Michul, Guasamira, Guanguezan, San Antonio, Pueblo Nuevo, San Jose El Partidero, Arrayan De Yascual.
	Rancho Grande	Rancho Grande, Guasi, El Salado, Esnambu.
	San Carlos Quebrada Oscura	Quebrada Oscura, Vereda La Encillada, Dos Quebradas, El Placer, Corregimiento Los Arrayanes, Los Arrayanes, San Sebastian Alto Y Bajo, Chalitala.
	Guanama	Guanama, El Cerrito Quitasol, Alpan Potrerillos, San Gabrie, San Jose De Alpan.
	Polachayan	Polachayan, Villa Nueva, Nueva Granada.
	Las Minas	Las Minas, Rosario Pamba

	San Roque	San Roque Bajo, San Roque Alto, Pescadillo De Tuquerres.
Sapuyes	El Espino	Panamal y El Chungel.
	Los Monos	La Verbena, Cualanquizan, Cuarriz, Chunchala, La Campana y Los Monos
	Uribe	Malaver, San Ignacio y La Floresta.
	Sapuyes Centro especial	San Jorge Alto San Jorge Bajo, Marambá Alto y Marambá Bajo.

Figura 1: Entorno geográfico volcán Azufral.



Tomado de: <http://www.ingegominas.gov.co/>

1.5. VOLCÁN AZUFRAL

1.5.1. Generalidades. El Volcán Azufral, anteriormente conocido como Chaitán, vecino a la población de Túquerres, se localiza al sur de la cadena volcánica en el sector suroriental del Departamento de Nariño a 1° 05' N y 77° 43'W y con una elevación de 4070 msnm.

A este volcán se puede acceder por su parte baja por la carretera que conduce desde Túquerres hacia Samaniego; a unos 7 km de la primera ciudad se toma el desvío a mano izquierda y de ahí en adelante se continúa por la carretera hasta la cabaña de Corponariño.

En la región de influencia del volcán Azufral se localizan varios municipios entre los que se mencionan a Mallama, Sapuyes, Túquerres y Santa Cruz. En siglos pasados, estas poblaciones correspondían a sencillos caseríos, sin embargo, con el tiempo se ha ido incrementado el número de habitantes así como la cantidad de poblaciones asentadas en sus faldas y la frontera agrícola.

El volcán Azufral es un estrato-volcán, con un diámetro del cráter estimado en 3 Km, en donde se encuentra la laguna cratérica llamada Laguna Verde, no registra la presencia de glaciares, y presenta el registro de depósitos asociados con flujos de lava, flujos piroclásticos de gran magnitud y depósitos de caída (cenizas y pumitas). En la actualidad existe actividad fumarólica y algunas manifestaciones sísmicas. Se dispone de algunos registros sísmicos de eventos de Largo-periodo y algunas señales Volcano-tectónicas. Debido a la existencia de páramos en la cima se propicia condiciones para el nacimiento de fuentes de agua que esencialmente exhiben un patrón radial de drenaje. (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, 2012).

1.5.2. Geología.

1.5.2.1. Generalidades. De manera general, el Sector Andino Suroccidental del departamento de Nariño, donde se encuentra localizado el volcán Azufral, hace parte de los terrenos geológicos de Cajamarca y Cauca-Romeral. El primero de ellos está compuesto por intercalaciones de sedimentitas políticas, sedimentitas calcáreas con derrames básicos; volcanoclásticas básicas metamorfasadas en facies, esquistos verde a angibolita. (CORPONARIÑO-UDENAR, 2008).

En cuanto al terreno Cauca-Romeral, que está limitado hacia el Occidente por el sistema de fallas del río Cauca y hacia el Oriente por el sistema de fallas Romeral, INGEOMINAS (1983), establece que dicho terreno está compuesto por una mezcla estructural con predominio de basaltos de afinidad toleítica, cherts, turbiditas siliclásticas fino a grueso granulares y olistrotomas de caliza. Así mismo, existen cuñas de metagabros y esquistos, fragmentos de secuencias ofiolíticas y plutones calcoalcalinos e intrusivos subvolcánicos.

Lo anterior es una evidencia de la colisión de la corteza oceánica contra la continental, en una antigua área de subducción que ha evolucionado en diversos períodos geológicos.

Para el área del Volcán Azufra, existen diversos tipos de formaciones, la mayor parte de ellas correspondientes a rocas ígneas. Según INGEOMINAS 1983, el Azufra, Pajablanca, Cumbal y Chiles son estrato volcanes formados por lavas de composición andesítica, localmente lavas vítreas e intercalaciones de aglomerado volcánico y pumita originados posiblemente por flujos piroclastos. Alrededor de éstos se encuentran tobas, aglomerados, ignimbritas y capas de ceniza y lapilli, entre los cuales se identifican suelos fósiles o paleosuelos e intercalaciones locales de lava andesítica. Hacia el oriente de los volcanes Azufra, Cumbal y Chiles, se encuentran depósitos cuaternarios de tipo lacustre y fluvio-glaciario cuya acumulación dio origen al altiplano que se extiende entre Túquerres y Cumbal.

1.5.2.2. Estratigrafía. El volcán Azufra se encuentra situado en la cordillera occidental, la que está constituida por rocas volcánicas y sedimentarias de edad cretácica que han sido divididas en dos grupos: el Grupo Diabásico y el Grupo Dagua. El Grupo Diabásico conforma la parte oriental de la cordillera y está compuesto por rocas basálticas masivas o lavas almohadilladas, con microgabros relacionados e intercalaciones tobáceas y de rocas sedimentarias. El Grupo Dagua aflora hacia el occidente y está constituido por sedimentitas con intercalaciones volcánicas afectadas por metamorfismo dinámico y localmente por eventos térmicos relacionados a la intrusión de plutones epizonales paleógenos y neógenos. (ARANGO, J; PONCE, A. 1980)

Las características geológicas del área están asociadas al desarrollo de la actividad volcánica del Azufra que se forma en el Holoceno, y comienza con derrames lávicos de composición andesítica y pasa a una actividad explosiva de composición riodacítica, durante la cual se generan depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleadas asociadas al emplazamiento de un complejo de domos de igual composición y fragmentos, los cuales se encuentran en algunos de los depósitos piroclásticos, y permiten su localización temporal en la estratigrafía del volcán. Los depósitos piroclásticos recubren las rocas más antiguas de la Cordillera Occidental que constituyen el basamento del volcán Azufra (Plancha 428, Túquerres). (Gonzales H. et al. 2002).

1.5.2.3. Cenozoico. El registro estratigráfico de la era Cenozoica en el área de la Plancha 428 Túquerres (Ibid) se inicia en el Paleógeno con la generación y emplazamiento de las rocas granitoides de la Granodiorita de Piedrancha, que intruye las rocas cretácicas de la Cordillera occidental con formación de una amplia y bien definida aureola de contacto, y se prolonga al Neógeno y Cuaternario con rocas volcánicas efusivas y piroclásticas, que constituyen gran parte del altiplano Nariñense al occidente de Túquerres y de la Cordillera Occidental hasta la quebrada La Calera; estas rocas recubren las rocas cretácicas y paleógenas y modifican las características morfológicas desarrolladas sobre éstas para alcanzar la configuración actual del área de trabajo.

GONZÁLEZ, H. et al. 2002, describe varias formaciones geológicas para el área del Azufra las cuales se describen a continuación:

- Depósitos glaciares.
- Lavas recientes del volcán Azufra.
- Depósitos Piroclásticos
- Domo del volcán Azufra

1.5.2.3.1. Depósitos glaciares. Morrenas de bloques de lavas andesíticas en disposición caótica; sin selección en matriz areno – arcillosa de color amarillo – crema, incluye depósitos flujo – glaciares y lacustres.

Estas evidencias de glaciaciones, se encuentran en los alrededores del volcán Azufra y al Suroccidente de la población de Túquerres en una estructura semicircular abierta hacia el Noreste, donde se aprecia una geoforma que corresponde a un circo glaciar. Depósitos piroclásticos recientes relacionados al Volcán Azufra pueden estar cubriendo evidencias de antiguas glaciaciones en el área, y han modificado las geoformas pleistocénicas alrededor del volcán donde se tienen las alturas máximas por encima de los 4 000 m. La erupción de hace más de 17 000 años, según Calvache, produjo un colapso del edificio volcánico con la formación de montículos al Sur del Azufra, formando un anfiteatro que se modificó por la acción glaciar, quedando algunas morrenas dentro de esta estructura, como las quebradas El Común y Chungel. Esto confirmaría la extensión de las lenguas glaciares en el Pleistoceno tardío-Olioceno a estas elevaciones. (CALVACHE, Martha, 2008).

1.5.2.3.2. Lavas y cenizas. Los depósitos de lavas corresponden al terciario y cuaternario, se trata principalmente de flujos masivos de forma tubular, lavas en bloques; son rocas porfíricas con fenocristales, principalmente andesitas de dos piroxenos y plagioclasas cálcicas y dacitas con anfíbol y plagioclasa sódica. Hacia el norte esta unidad se encuentra limitada con un complejo de lavas y cenizas características del volcán Azufra. Los depósitos de lavas y cenizas corresponden al terciario y cuaternario, se localizan alrededor del volcán Azufra, demarcando el extremo del altiplano de Túquerres - Cumbal. Esta unidad se encuentra conformada por lavas y flujos y/o caída de ceniza no diferenciables. Generalmente hay predominio de lavas que se hallan cubiertas por cenizas o tienen intercalaciones de ellas (CORPONARIÑO-UDENAR, 2 008).

1.5.2.3.4. Lavas recientes del volcán Azufra. Depósitos lávicos predominantemente andesíticos. De acuerdo con la composición mineralógica se reconocen dos grupos: Lavas andesíticas a dacíticas piroxénicas con olivino y lavas andesíticas con biotita y hornblenda. Los depósitos lávicos de composición andesítica constituyen la base del edificio volcánico actual del Azufra, compuesto por lavas andesíticas masivas asociadas a depósitos laháricos y flujos piroclásticos. Según Fortaine (1 994), estos depósitos

representan la etapa inicial de la actividad actual del volcán Azufra, que se inicia con coladas masivas y posteriormente con erupciones que producen coladas de lava en bloques, lavas masivas y piroclásticas de composición andesítica, produciendo los depósitos laháricos; en gran parte estas formaciones se hallan cubiertas por depósitos piroclásticos riolíticos que representan la actividad más reciente del volcán.

1.5.2.3.5. Depósitos piroclásticos. Depósitos sin consolidar o poco consolidados de flujos, oleadas y caída, conformados por proporciones variables de pómez, líticos y cristales; el tamaño de los constituyentes así como su distribución varía lo largo del depósito (CORPONARIÑO – UDENAR, 2008). Ejemplos de estos depósitos pueden ser observados en el sector del Espino; municipio de Sapuyes y en el camino de ascenso al cráter (Ver figuras 2.1, 2.2, 3.1 y 3.2).

1.5.2.3.6. Domos del volcán Azufra. Rocas dacíticas o riolíticas, microporfidíticas con fenocristales de plagioclasa, cuarzo biotita – hornblenda y opacos en matriz hipocristalina. Algunos eventos explosivos que caracterizan la actividad reciente del volcán Azufra, estuvieron relacionados al emplazamiento de un complejo de domos al interior del cráter. Este complejo cóncavo está compuesto por cuatro generaciones; la más antigua forma el borde occidental del cráter y está separado actualmente de las otras tres por una zona lacustre de color verde, denominada Laguna Verde. La presencia de una laguna cratérica puede indicar una probable amenaza futura por lahares (Ver figura 4).

Los domos presentan una mineralogía similar y sólo se observan diferencias menores en la proporción relativa de los minerales presentes, están constituidos por rocas porfídicas con un 30 a 40% de fenocristales de plagioclasas, cuarzo, biotita, hornblenda y opacos, en una matriz hipocristalina formada por vidrio y microcristales de los mismos minerales que aparecen en los fenocristales y predominan microlitos de plagioclasas.

Según Fortaine, los domos más antiguos serían anteriores o sinténicos con el flujo de detritos y el flujo piroclástico de 3.600 años. La segunda generación de domos se emplazó con posterioridad al flujo piroclástico de 3 600 años y antes del flujo de detritos de El Espino (Fortaine, 1994) y fue seguido por el emplazamiento de dos nuevas generaciones de domos de las cuales la última se relaciona la actividad fumarólica actual.

Figura 2.1: Depósitos piroclásticos y de cenizas en el sendero de ascenso al cráter.



Figura 2.2: Depósitos piroclásticos y de cenizas en el sendero de ascenso al cráter.



Figura 3.1: Depósitos piroclásticos en el corregimiento del Espino. Nótese que hay más de 10 capas de cenizas, pómez, oleadas y flujos piroclásticos.



Figura 3.2: Detalle de depósitos piroclásticos en el corregimiento del Espino. Se puede observar que no se evidencian depósitos de caída.



Figura 4: Laguna cratérica Volcán Azufra. Nótese las formaciones dómicas que separan las lagunas.



1.5.3. Edificio volcánico reciente del Azufra. El edificio volcánico del Azufra ocupa un área de 20 km², se caracteriza por presentar un cráter con un ancho de 1 km, dentro del cual se encuentran los lagos conocidos como Laguna Verde y Laguna Negra, a la cual llegan numerosos drenajes subparalelos, si bien muchos cuerpos de aguas se denominan "lagunas", en sentido científico son "lagos" puesto que son continentales; las lagunas tienen conexión con el mar.

Se puede considerar como edificio volcánico, la estructura que se encuentra por encima de la cota 3 400 m, ligeramente por encima de la carretera Túquerres – Tumaco (Ver figura 5). El cráter está parcialmente abierto hacia el sur y en él se observan varias geoformas dómicas y una superficie que corresponde, tal vez, a un edificio volcánico anterior, localizado al Noreste del cráter actual. Al este del cráter principal se observa otro más antiguo, con un ancho de 1 km en la parte más ancha y longitud de 1,5 km, abierto al Suroeste y el cual presenta mayor grado de incisión. Los filos principales son largos, redondeados y escalonados, y responden a la superposición de edificios volcánicos. Las vertientes son escarpadas, rectas y cortas; a mitad de las vertientes presenta remanentes de flujos piroclásticos recientes a manera de terrazas que no se separaron de la unidad

debido a su poca extensión, como se observa al Oeste del volcán Azufra, en las proximidades del río Verde. Los valles son estrechos, en forma de V, rectos, de fondo estrecho con cauces de pendiente fuerte típicos de ríos de montaña. No se desarrolla un perfil de meteorización debido a su edad reciente, pero presenta un suelo incipiente de 5 a 10 cm del horizonte A, que descansa directamente sobre la roca. Esta unidad geomorfológica se desarrolla sobre lavas andesíticas correspondientes a edificios volcánicos antiguos y el edificio reciente serían los flujos piroclásticos y los domos. Los procesos morfodinámicos asociados a esta unidad tienen que ver esencialmente con la profundización de los cauces y la erosión de sus márgenes, a partir de los cuales se generan cárcavas y surcos, tal como se puede observar en la parte alta del volcán. (CORPONARIÑO-UDENAR, 2008).

Figura 5: Edificio volcánico reciente del Azufra.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. DEFINICIÓN BÁSICA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

En términos generales el SIG, es un “sistema de información computacional, por el cual se almacena, organiza, manipula, analiza y despliega información referenciada espacialmente que se encuentra asociada a datos o atributos tabulares” (Becker en GIS Development Guide²⁷) y por tanto se convierte en una herramienta extremadamente útil para apoyar investigaciones, proyectos, procesos, etc., que impliquen planeación, manejo y consulta de información espacial y la solución de problemas dentro del ámbito del análisis geográfico y/o ambiental a escala global, regional y local.

Así, la ventaja del SIG, es su “capacidad de realizar todas estas tareas en un tiempo corto al apoyarse en las nuevas tecnologías computacionales y así la labor de análisis de información espacial a diferentes escalas se convierte en una labor más eficiente” (Becker en GIS Development Guide²⁸) y veraz, siempre y cuando se desarrolle e implemente bajo parámetros, estándares y etapas organizadas. (Tomado de www.geog.buffalo.edu/ncgia/sara/volumei/pdf).

2.2. CONCEPTO DE PROBABILIDAD:

Entre los diversos conceptos de probabilidad, el más favorecido es la interpretación de la frecuencia o interpretación clásica, *según la cual la probabilidad de un evento (resultado o acontecimiento) es la proporción de veces en que ocurrirá a la larga, eventos del mismo tipo.* (VELASCO Y MARIAN, 2001). Si se dice que la probabilidad de que un flujo piroclástico llegue a la cabecera municipal de Túquerres es de 0.07, se refiere (según la interpretación de frecuencia) a que el flujo podría llegar el 7% de las veces que suceda un evento, o que cada 100 erupciones 7 llegarían a la cabecera. De la misma manera si esta investigación dice que hay 0.85 de probabilidad de que la cabecera del corregimiento del Espino podría ser alcanzada por un flujo piroclástico, esto quiere decir que en una erupción con las mismas condiciones el 85 % de las veces la cabecera sería alcanzada. Por ejemplo, en términos más generales, se dice que un evento tiene una probabilidad de 0.07, en el mismo sentido en que se podría decir que Piedrancha sería alcanzado el 7% de las veces. No se puede garantizar lo que sucederá en una ocasión cualquiera específica (el flujo piroclástico puede llegar una vez y otra vez ya no); pero si se recopila registros durante un tiempo largo, se debe advertir que la proporción de aciertos está muy próxima a 0.07.

2.3. AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

Para estar al tanto sobre estos 3 conceptos claves se recurre a la ley 1 523 de 2 012 emanada por el Honorable Congreso de la República de Colombia, que los define así:

2.3.1. Amenaza. Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

2.3.2. Vulnerabilidad. Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

2.3.3. Riesgo de desastres. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

2.4. AMENAZAS VOLCÁNICAS

Los volcanes son capaces de producir una gran cantidad de amenazas geológicas e hidrológicas, capaces de matar gente y destruir propiedades. Las grandes erupciones explosivas pueden poner en peligro a la población y a las propiedades a cientos kilómetros de distancia, y afectar incluso, el clima global. A continuación, se describen los distintos tipos de amenazas volcánicas tanto las que se producen en el momento de una erupción como flujos piroclásticos y ceniza como las avalanchas o los flujos de lodo o lahares que pueden ocurrir mucho después de una erupción. (Ver figura 6)

2.4.1. Columnas y nubes eruptivas. La erupción explosiva de un volcán despiden hacia la atmosfera una gran cantidad de tefra, que no es más que fragmentos de roca sólida y

fundida, así como gases volcánicos con una fuerza colosal. Las bombas o proyectiles balísticos, que son los fragmentos más grandes de roca pueden caer a distancias de 4 kilómetros del cráter o centro de emisión. Por su parte, la ceniza consistente en fragmentos menores a 2 mm de diámetro, de vidrio volcánico, minerales y roca, se elevan muy alto en el aire, formando una enorme y turbulenta columna eruptiva.

Las columnas eruptivas pueden crecer rápidamente y alcanzar más de 20 Kilómetros sobre el volcán en menos de 30 minutos, formando una nube eruptiva. La ceniza volcánica de la nube puede poner en serio peligro a la navegación aérea ya que pueden provocar serios daños en los motores de las aeronaves. Las nubes eruptivas grandes pueden extenderse cientos o miles de kilómetros en la dirección del viento, y producir lluvias de ceniza sobre áreas de gran extensión; el viento transporta las partículas de ceniza más pequeñas a mayores distancias. La ceniza de la erupción de 1 982 del volcán mexicano El Chichón cayó sobre un área de más de 30 000 kilómetros cuadrados en el sur de ese país. La lluvia de ceniza intensa puede colapsar o derribar edificios, e incluso la lluvia menor de ceniza puede dañar cultivos, sistemas electrónicos y maquinaria. (USGS, 1 998).

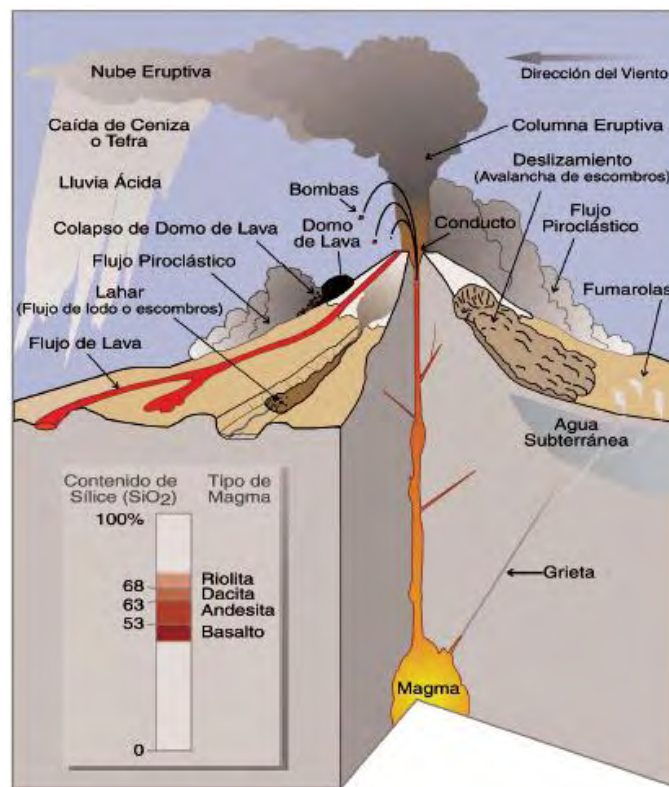
2.4.2. Gases volcánicos. Los gases en los volcanes pueden ser emitidos durante una erupción o bien en su actividad regular fluyendo por las grietas del subsuelo hacia la superficie a través de pequeñas aberturas llamadas fumarolas. La composición de estos gases emitidos por los volcanes son principalmente (90%) vapor de agua. En menor proporción se producen el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el anhídrido sulfhídrico y el flúor. El dióxido de azufre puede reaccionar con las gotas de agua de la atmósfera y producir lluvia ácida, lo cual ocasiona corrosión y daños a la vegetación. El dióxido de carbono es más pesado que el aire, por lo que puede asentarse o mantenerse en áreas bajas en concentraciones letales para la gente y los animales. El flúor, que en altas concentraciones es tóxico, puede ser adsorbido por partículas de ceniza volcánica que caen más tarde sobre el suelo. El flúor sobre las partículas puede envenenar el ganado que se alimenta de pastos cubiertos de ceniza y también puede contaminar los suministros de agua potable. Las erupciones cataclísmicas como la de 1982 del volcán El Chichón (México), inyectan enormes cantidades de gas dióxido de azufre en la estratósfera, donde se combina con el agua para formar un aerosol (niebla) de ácido sulfúrico. Al reflejar la radiación del sol, estos aerosoles son capaces de bajar varios grados centígrados (°C) la temperatura promedio del planeta por largos períodos de tiempo. Estos aerosoles de ácido sulfúrico también contribuyen a la destrucción de la capa de ozono, ya que alteran los compuestos de cloro y nitrógeno de la atmósfera alta. (USGS, 1998).

2.4.3. Flujos y domos de lava. Los volcanes en su interior contienen roca fundida conocida como magma, este fluye y se derrama sobre la superficie de la tierra y pasa a llamarse lava. De acuerdo con el contenido de sílice la lava tendrá mayor o menor fluidez.

Por ejemplo, la lava basáltica con bajo contenido de sílice puede formar corrientes de movimiento rápido (de 16 a 48 kilómetros por hora) o se puede esparcir en amplias capas delgadas de hasta varios kilómetros de amplitud. Desde 1983, el volcán Kilauea de la Isla de Hawai ha estado erupcionando flujos de lava basáltica que han destruido casi 200 hogares y han afectado las carreteras costeras aledañas.

En contraste, los flujos de lava de andesita y dacita, más altos en sílice, tienden a ser espesos y lentos, viajando solamente distancias cortas desde el punto en que son emitidos. Las lavas de dacita y riolita son frecuentemente estrujados fuera del conducto volcánico para formar montículos irregulares llamados domos de lava. Entre 1980 y 1986, se formó un domo de lava de dacita en la cima del Monte Santa Elena (Mount St. Helens), Estados Unidos. Este domo alcanzó más de 300 metros de altura y 1,000 metros de diámetro. (USGS, 1998).

Figura 6. Tipos de amenazas volcánicas



Tomado de: USGS Fact Sheet 002-97 (edición de junio 1998)

2.4.4. Flujos piroclásticos. Los flujos piroclásticos son avalanchas de alta velocidad de ceniza caliente, fragmentos de roca y gas, que pueden descender por los flancos de un volcán durante erupciones explosivas o cuando un domo de lava que está creciendo se colapsa y se rompe en pedazos. Estos flujos piroclásticos pueden alcanzar temperaturas

de 900 °C y moverse a velocidades de 160 a 240 kilómetros por hora. Estos flujos tienden a seguir el curso de los valles, cauces, barrancas y quebradas, y son capaces de derribar y quemar todo en su camino. Los flujos piroclásticos de densidad menor, llamados oleadas piroclásticas, pueden cubrir o saltar fácilmente crestas de más de 100 metros de altura.

La poderosa erupción del 18 de mayo de 1980 del Monte Santa Elena generó una serie de explosiones que formaron una enorme oleada piroclástica. Esta también llamada “ráfaga lateral,” destruyó un área de 370 kilómetros cuadrados. Los árboles de 2 metros de diámetro fueron talados como pasto (césped) a distancias de 24 kilómetros. (USGS, 1998).

2.4.5. Deslizamientos o derrumbes volcánicos. Un deslizamiento de tierra en un volcán consiste en una extensa masa de roca y suelo que cae, se desliza de forma rápida debido a la fuerza de la gravedad, se desatan cuando las erupciones, la lluvia intensa o los terremotos de gran magnitud causan que estos materiales se rompan y se muevan pendiente abajo. La mezcla de material volcánico puede estar seco o en estado húmedo, o ambos. Los deslizamientos volcánicos varían en tamaño, desde movimientos pequeños de escombros poco consolidados hasta colapsos masivos de la cima completa o de los flancos de un volcán (BLAST). Los volcanes de pendientes inclinadas son propensos a los deslizamientos o derrumbes porque están contruidos parcialmente de capas de fragmentos de roca suelta. Por lo general, provoca avalanchas, deslizamientos masivos de rocas que se desintegran durante su movimiento en pequeñas partículas. Por lo general, el deslizamiento se suele transformar en un lahar y circular ladera abajo del volcán, llegando a alcanzar incluso los 100 km. de distancia del volcán.

Durante los últimos 10 000 años, por lo menos 2 grandes deslizamientos de escombros provenientes del colapso de una buena parte del volcán que antes ocupaba el lugar del actual Volcán de Colima (México), descendieron violenta y estrepitosamente, cubriendo con sus depósitos el área donde actualmente se encuentran las ciudades de Colima, Comala, y Villa de Alvarez (más de 300 000 habitantes). El mayor deslizamiento volcánico registrado en tiempos históricos ocurrió durante el inicio de la erupción del Monte Santa Elena (Estados Unidos) el 18 de mayo de 1980. (USGS, 1998).

2.4.6. Lahares. Los lahares comprenden una mezcla de materiales volcánicos (rocas, ceniza, pómez, escoria), mayoritariamente cenizas, movilizadas por el agua proveniente de la fusión del casquete glaciar, de un lago cratérico o por fuertes lluvias. El agua se mezcla con el material volcánico suelto que se encuentra en su camino y se transforma rápidamente en un flujo muy móvil con características similares al concreto utilizado en la industria de la construcción.

Son fenómenos muy destructivos, que pueden recorrer distancias muy grandes, pudiendo superar fácilmente los 100 km, se han observado velocidades de 40 a 100 km/h en lahares históricos. El principal peligro para la vida humana es el enterramiento o el impacto de bloques y otros escombros. Las edificaciones y otros bienes que estén en el camino del flujo son destrozados, enterrados o arrasados. Se debe evacuar, aunque en ocasiones basta subir unos cuantos metros para estar a salvo (CMVS, 2 013). Un ejemplo de este fenómeno se dio en la población de Armero a causa del derretimiento del glaciar del nevado del Ruiz por el incremento en su actividad volcánica.

2.4.7. Sismos volcánicos. Los sismos volcánicos son de magnitudes pequeñas y raras veces ocurren en sitios alejados del volcán. Cuando un sismo es de origen volcánico, el movimiento de la tierra es rápido. Los daños producidos por ellos son insignificantes. Pero es importante destacar que muchas zonas volcánicas también son zonas sísmicas. Los efectos dañinos de los sismos volcánicos generalmente se detectan en las áreas aledañas, cerca de 10 km del cráter. Sin embargo estos pueden tener como consecuencia eventos tales como avalanchas de escombros, o contribuir en eventos como el colapso estructural del volcán mismo. (CMVS, 2 013)

2.5. LINEAS DE ENERGIA

2.5.1. Líneas de energía desde el punto de vista hidráulico. Son líneas que permiten visualizar los componentes de la energía hidráulica de un fluido en movimiento a lo largo de un conducto, representan la elevación de la altura total del flujo.

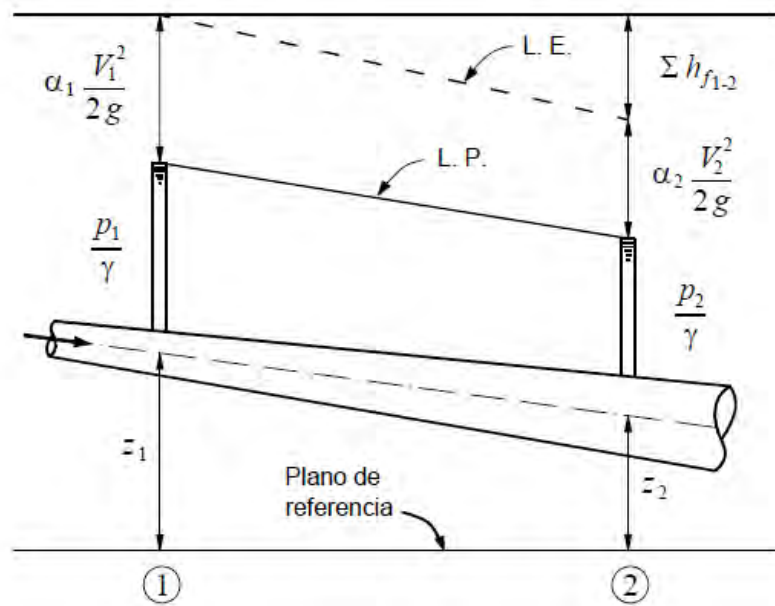
Para entender mejor el concepto se acude a una explicación gráfica:

Sea una tubería de sección variable como la mostrada en la figura 7. Si se aplica la ecuación de energía entre las secciones 1 y 2 se tiene:

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum h_{f_{1-2}} \quad (Ec. 1)$$

Es decir, que al pasar de 1 a 2 hay una parte de la energía que “se pierde”: que no se transforma en presión, velocidad o elevación. Es la energía consumida en forma de fricción y que denominamos hf , pérdida de energía o pérdida de carga.

Figura 7. Ecuación de la energía en una tubería.



Tomado de: Hidráulica de Tuberías y Canales, Arturo Rocha. 2002.

Para el movimiento uniforme, la sección transversal es invariable, por lo tanto la velocidad también lo es y la energía de velocidad es constante.

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (Ec. 2)$$

α es el coeficiente de coriolis.

Entonces la ecuación de la energía es:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum h_{f1-2} \quad (Ec. 3)$$

A la línea que resulta de unir las elevaciones a las que sube un líquido en una serie de piezómetros instalados a lo largo de la tubería se le denomina línea piezométrica o línea de gradiente hidráulica (L.P.).

Si en cada sección se adiciona a la cota piezométrica el valor correspondiente a la energía de velocidad se obtiene la línea de energía. En el movimiento uniforme la línea de energía y la línea piezométrica son paralelas.

Con respecto a la línea de gradiente o piezométrica conviene ordenar los siguientes conceptos:

- La línea de gradiente indica por medio de su altura sobre el eje de la tubería la presión en cualquier punto de ella.
- En una tubería, o en tuberías de igual rugosidad y diámetro, cuanto mayor es la pendiente o inclinación de la línea de gradiente tanto mayor será la velocidad del fluido.
- La línea de gradiente hidráulica indica por su descenso vertical la energía perdida entre dos secciones (para movimiento uniforme).
- La gradiente hidráulica es recta para tuberías rectas de sección transversal constante y para tuberías cuya longitud sea aproximadamente igual a la línea que une sus extremos.

La línea de energía siempre desciende en la dirección del escurrimiento, salvo que se coloque una bomba.

La línea de gradiente hidráulica no siempre desciende en la dirección del escurrimiento.

La línea de energía y la del gradiente coinciden con la superficie libre para un líquido en reposo. Tal sería el caso de un estanque.

En la ecuación de la energía (Ec.3) se ha designado como $\sum hf_{1-2}$ a la suma de todas las pérdidas de carga (de energía) que ocurren entre 1 y 2.

Estas pérdidas de carga son fundamentalmente de dos tipos: continuas y locales.

Las pérdidas de carga continuas se deben a la fricción y se calculan por medio de la fórmula de Darcy:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (Ec.4)$$

Las pérdidas de carga locales dependen de las características de cada singularidad, válvula, codo, etc. Las pérdidas de carga locales se expresan genéricamente en función de la altura de velocidad en la tubería:

$$h_{loc} = K \frac{V^2}{2g} \quad (Ec.5)$$

Expresión en la cual h_{loc} es la pérdida de carga local expresada en unidades de longitud, K es un coeficiente adimensional que depende de las características de la singularidad que genera la pérdida de carga (codo, válvula, etc.) así como del número de Reynolds y de la rugosidad, V es la velocidad media en la tubería.

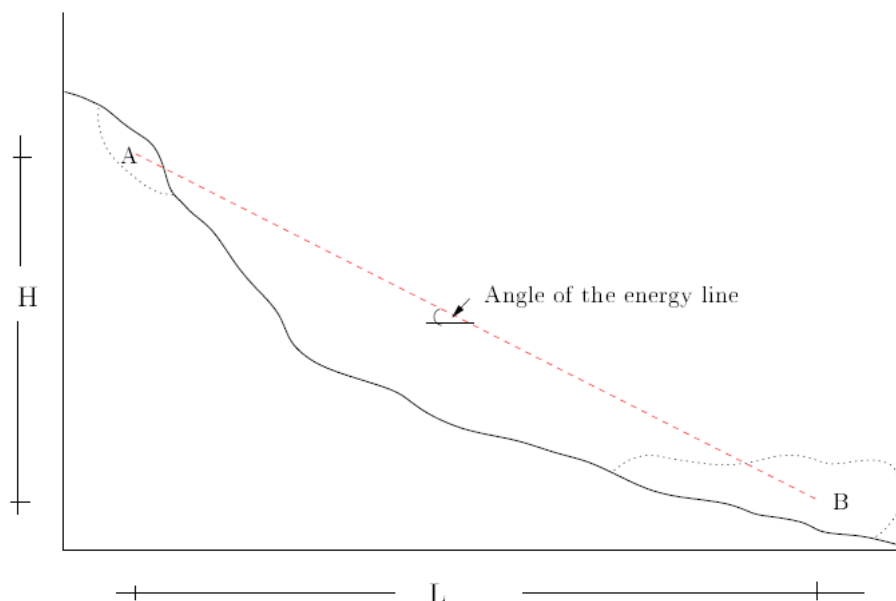
A las pérdidas de carga locales también se les denomina perdidas menores. Esto en razón que en tuberías muy largas la mayor parte de la pérdida de carga es continuo. Sin embargo en tuberías muy cortas las pérdidas de carga locales pueden ser proporcionalmente muy importantes. (ROCHA, Arturo, 2002).

2.5.2. LÍNEAS DE ENERGÍA PARA FLUJOS DE MASA SEDIMENTARIOS

Para el caso de los flujos de masa sedimentarios, la aplicación de las líneas de energía viene de las ideas derivadas de Heim (1882) y Hsu (1975), que establecieron que la distancia máxima que una avalancha podría viajar a partir de un deslizamiento, es la distancia que intercepta la línea proyectada desde el punto del origen del deslizamiento y el suelo, con un ángulo típico alrededor de 30° . (Ver Figura 8). Esta línea se ha denominado la línea de energía.

El ángulo puede ser visto como equivalente al que necesita un bloque sólido para deslizarse por una pendiente inclinada (ϕ = ángulo crítico de fricción). Sin embargo, las avalanchas y otros flujos de masas no se comportan idealmente en un deslizamiento, ya que se deforman internamente a medida que fluyen. Además, el ángulo de fricción dinámico en una avalancha puede ser muy diferente al ángulo de rozamiento estático para iniciar el deslizamiento del bloque. Heim llegó a la conclusión de que la distancia de viaje para este tipo de eventos depende de: el volumen del deslizamiento, la altura de la caída, y la regularidad del trayecto (Córdoba, 2007).

Figura 8. Esquema del concepto de línea de energía. La línea roja entre el punto inicial A y el punto final B es la línea de energía. El ángulo de fricción típico de un deslizamiento en pequeñas avalanchas es de unos 30° , pero las avalanchas grandes de flujos piroclásticos y los ángulos de visualización están muy por debajo de 30° . El flujo tiende a detenerse cuando el centro de masa del deslizamiento llega a la línea.



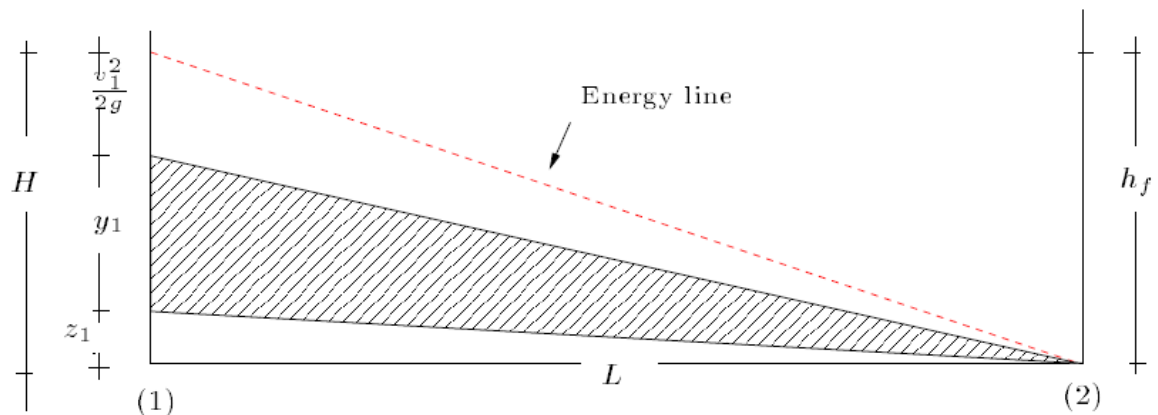
Tomado de CORDOBA GUERRERO, Gustavo, Dilute particle-laden currents: dynamics and deposit patterns, 2007.

En el caso de un flujo completo que se detiene en una distancia finita L (Figura 9), la velocidad y la profundidad en el punto 2 será igual a cero y si se tiene asignado el dato en el punto 2 ($Z_2 = 0$) se convierte en la ecuación de Bernoulli:

$$H = z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_f \quad (\text{Ec. 7})$$

Esto significa que toda la energía inicial se consume por la fricción y por lo tanto $H=h_f$ (note que si los dos puntos corresponden a las posiciones inicial y final, $h=H$ y $L=l$) y el flujo se detiene (Córdoba, 2007)

Figura 9. La línea de energía para un flujo que se detiene. El origen de la avalancha está en el punto 1 y finaliza el recorrido en el punto 2. Tenga en cuenta que toda la energía se consume por la fricción. La línea roja punteada es la línea de energía y el área rayada el fluido.



Tomado de CORDOBA GUERRERO, Gustavo, Dilute particle-laden currents: dynamics and deposit patterns, 2007.

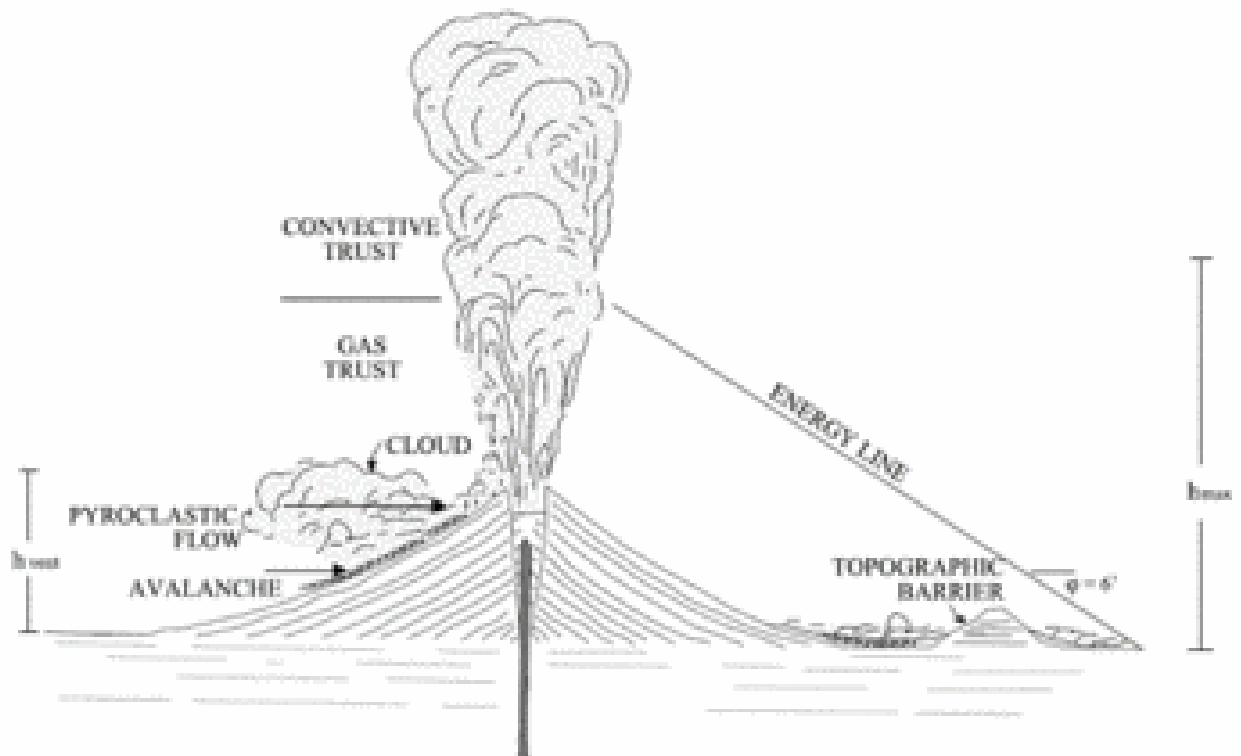
2.6. ANTECEDENTES

En el pasado los estudios concernientes a la evaluación de la amenaza por flujos piroclásticos se hacían de manera puntual para cada caso, principalmente con datos de evidencia histórica de actividad eruptiva, en volcanes que poseían dichos registros. En la actualidad se pueden aplicar modelos generales de evaluación que se han desarrollado para evaluar la amenaza por flujos piroclásticos, que se basan en el estudio del comportamiento propio del flujo, independientemente a algunas de las características del volcán.

2.6.1. Sheridan y Malin. En 1983 propusieron un método para la evaluación del área de influencia de flujos piroclásticos debidos a una erupción volcánica. En dicho método la energía de la nube de gases y partículas que colapsa desde la columna creada por la erupción, disminuye con la distancia desde el punto de eyección con la diferencia entre la línea de energía y la topografía.

La línea de energía se define por la altura de la columna de erupción y el ángulo de inclinación de la misma. Dicho ángulo se estima a partir de estudios estadísticos realizados sobre flujos piroclásticos estudiados en erupciones observadas. La figura 10, presenta un esquema de las consideraciones principales del modelo.

Figura 10. Estimación del área de influencia de flujos piroclásticos según Sheridan y Malin.



Tomado de SHERIDAN, y MALIN, 1983.

3.6.2. Sheridan y Macías. En el año de 1995 aplicaron una metodología basada en el uso de las líneas de energía con el objeto de determinar la amenaza probabilística en los centros poblados provocada por los flujos piroclásticos del volcán Colima en el estado de Jalisco (México).

Estos autores consiguieron construir un mapa probabilístico para el área de influencia del volcán Colima, México, que indica las zonas con mayor riesgo de ser alcanzadas por

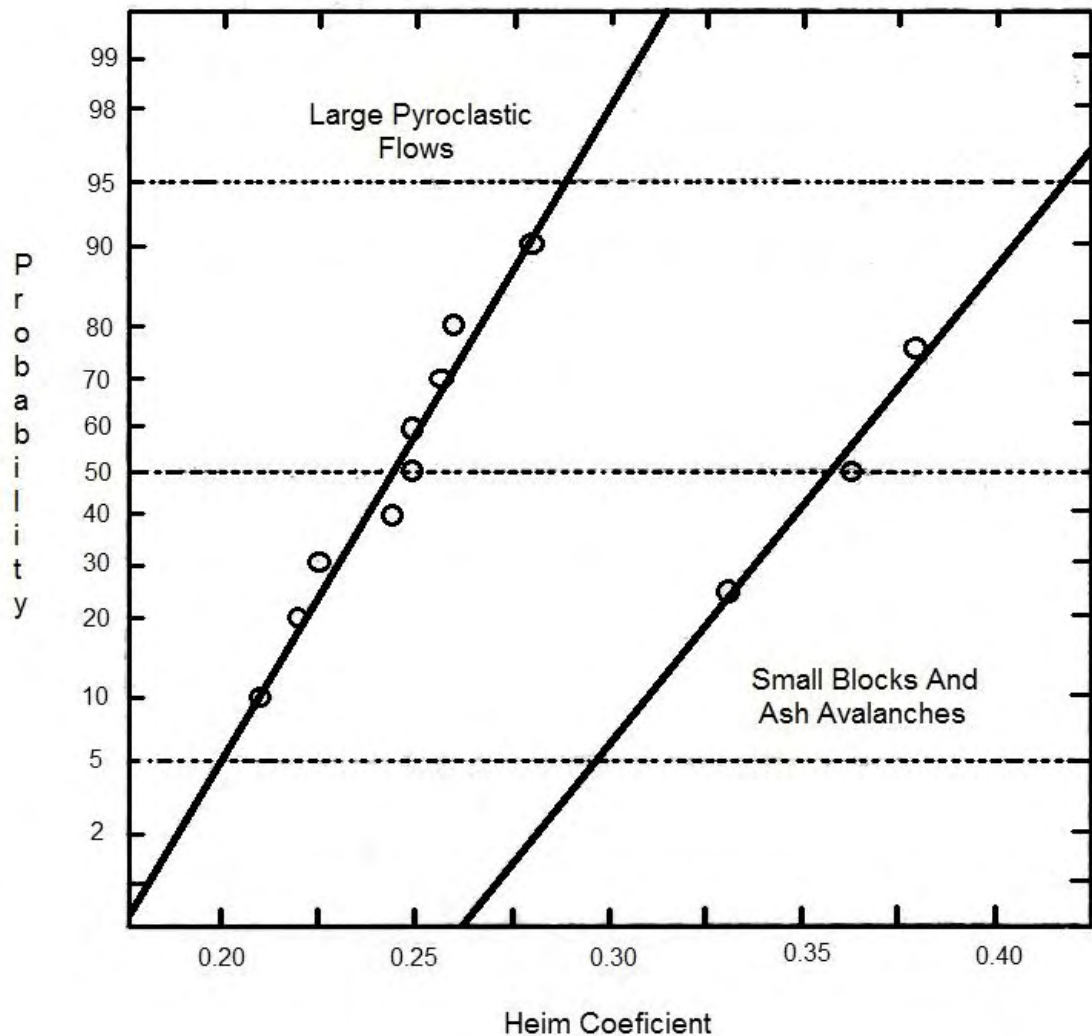
flujos piroclásticos. Para determinar el lugar de llegada de un flujo piroclástico utilizaron líneas de energía asumidas como rectas y con una velocidad inicial de flujo cero, partiendo el movimiento desde la cima del volcán. La relación entre la altura (H) y la longitud (L) de la línea de energía proyectada se conoce como el coeficiente de Heim (μ); este coeficiente fue utilizado para clasificar los flujos piroclásticos en dos grupos principales, Uno corresponde a los grandes flujos piroclásticos (flujos de pómez y flujos de bloques y cenizas) para los que el rango de coeficientes va de 0,22 a 0,28. Este grupo tiene un valor promedio de 0,24 y una desviación estándar de 0,021. La otra modalidad corresponde a pequeños flujos de bloques y cenizas, que tienen coeficientes de Heim, que van desde 0,33 hasta 0,38, un valor medio de 0,35 y una desviación estándar de 0.025. Hay que notar que a mayor número de Heim, menor será el avance del flujo. (Ver Figura 11.).

Para el cálculo de los coeficientes de Heim y la construcción de la figura 11, se tuvieron en cuenta los registros geológicos de la actividad del Colima y los mapas por flujos piroclásticos realizados previamente.

Los valores de los coeficientes obtenidos fueron graficados por los autores en papel de probabilidad aritmética donde pudieron aproximar funciones de probabilidad para los dos tipos de flujo. Los coeficientes de Heim de las líneas de energía que conectan la cima del volcán con centros poblados fueron utilizados para estimar la probabilidad de que cualquier tipo de flujo piroclásticos pueda llegar al sitio. Con esta técnica determinaron las poblaciones que tenían mayor amenaza en las inmediaciones del volcán Colima, con probabilidades que van desde el 6% al 99% de ser alcanzadas por grandes flujos piroclásticos. Un suceso que pudo probar la confiabilidad del mapa fue la pequeña avalancha producida por el colapso de la cima de Colima el 16 de abril 1991 la cual viajó a lo largo de la barranca El Cordobés hacia el área de la probabilidad más alta estimada en el mapa construido por Sheridan y Macías.

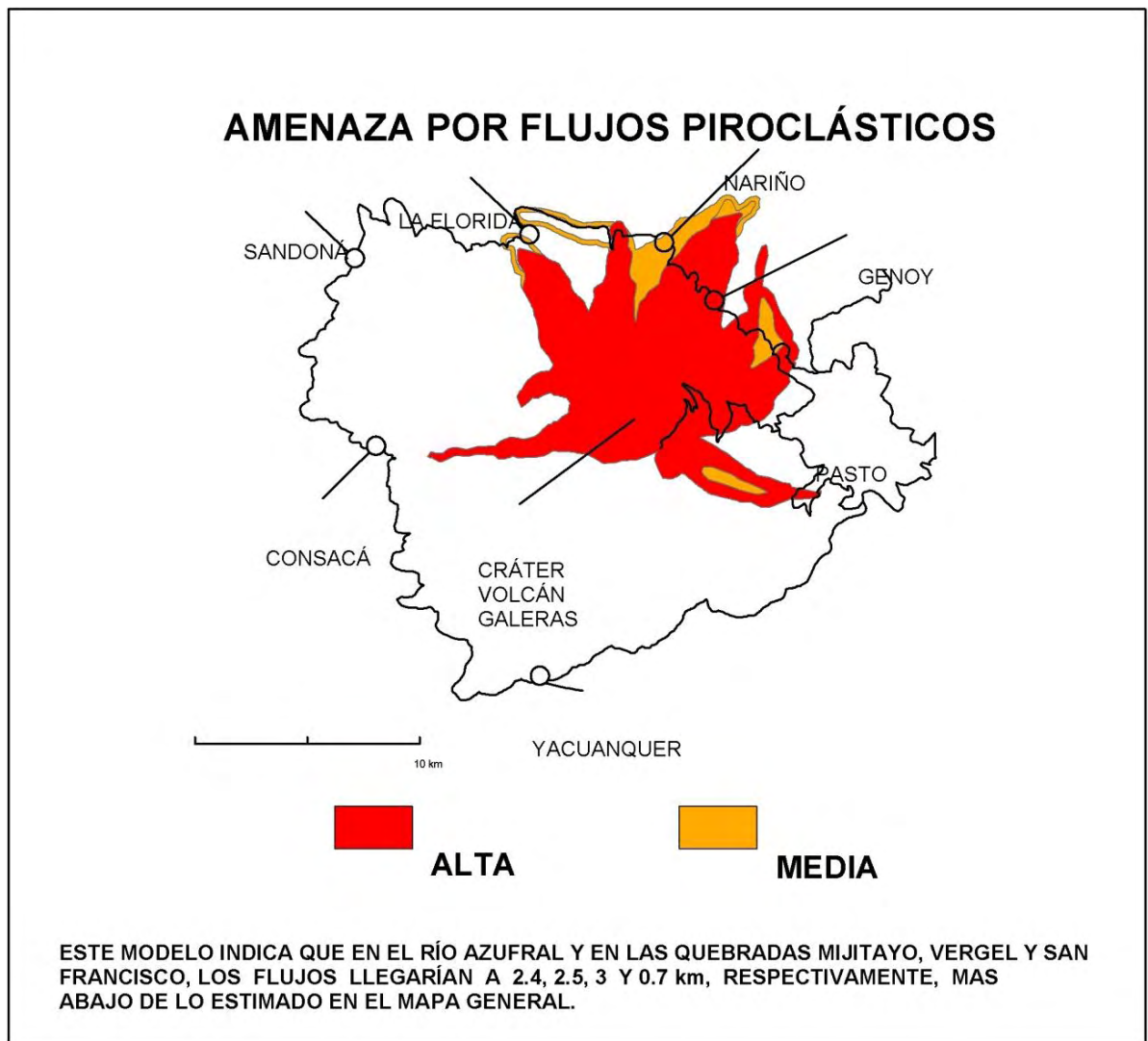
2.6.3. INGEOMINAS (1 997). Para construir el mapa de amenazas por flujos piroclásticos del Volcán Galeras en su Tercera versión (Hurtado y Cortes, 1 997), aparte del estudio geológico de depósitos de los flujos, el servicio geológico colombiano realizó el modelamiento para determinar la amenaza por flujos piroclásticos en dos y tres dimensiones, utilizando la metodología de la línea de energía para el emplazamiento de flujos piroclásticos (Malin y Sheridan, 1 982). Se encontró que el alcance o distribución de los depósitos de flujos piroclásticos es mayor en el modelamiento que el observado por la geología. Adicionalmente, comparando la zonificación de la amenaza por flujos piroclásticos con el máximo alcance del modelamiento, se observó que teóricamente la evaluación de la amenaza estaría subvalorada en causas tales como el del río Azufral y las quebradas Mijitayo, Vergel y San Francisco, en los cuales la diferencia es del orden de 2 km, 4 km, 2 km, 5 km, 3 km y 0.7 km, respectivamente (Ver figura 12).(INGEOMINAS,1 997).

Figura 11. Gráfico que muestra las distribuciones del coeficiente de Heim trazados en papel de probabilidad aritmética. Cada conjunto de puntos (grandes flujos piroclásticos, pequeños bloques y avalanchas de ceniza) presentan un buen ajuste con la línea recta que representa una función de Gauss. Este gráfico se puede utilizar para estimar la probabilidad de riesgo de las ciudades mediante el coeficiente de Heim calculado para determinados lugares en los mapas de Colima.



Tomado de SHERIDAN, Michael F y MACIAS, José Luis, Estimation of risk probability for gravity-driven pyroclastic flows at volcan Colima, Mexico, 1994.

Figura 12. Mapa de Amenaza por flujos piroclásticos del volcán Galeras usando la metodología de la línea de energía.



Tomado de: <http://www.ingegominas.gov.co/>

3. PROGRAMAS DE ANALISIS Y DESPLIEGUE

3.1. GRASS

El sistema de información geográfica GRASS (Acrónimo inglés de Geographic Resources Analysis Support System) Es un software SIG bajo licencia GPL (General Public License), que puede soportar información tanto raster¹ como vectorial² y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes.

En sus inicios, en 1982, el software fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de los Estados Unidos (USA-CERL) como herramienta para la supervisión y gestión medioambiental de los territorios bajo administración del Departamento de Defensa, al no encontrar ningún GIS en el mercado que satisficiera estas necesidades. En 1991 se pone a disposición pública a través de Internet. Su popularidad se incrementa en universidades, empresas y agencias gubernamentales. En 1997, ante el anuncio de USA-CERL GRASS de que dejaría de dar soporte al programa, la Universidad de Baylor se hace cargo de su desarrollo. A partir de esta fecha aumenta su aceptación dentro del mundo académico. El 26 de octubre de 1999, con la versión 5.0 se libera el código del programa bajo licencia GNU (*GNU is Not Unix*).

3.2. GNU OCTAVE

Es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte de proyecto GNU. MATLAB es considerado su equivalente comercial. Entre varias características que comparten se puede destacar que ambos ofrecen un intérprete permitiendo ejecutar órdenes en modo interactivo. Nótese que Octave no es un sistema de álgebra computacional, sino que usa un lenguaje que está orientado al análisis numérico.

El proyecto fue creado alrededor del año 1988 pero con una finalidad diferente: ser utilizado en un curso de diseño de reactores químicos. Posteriormente, en el año 1992, se decide extenderlo y comienza su desarrollo a cargo de John W. Eaton. La primera versión alpha fue lanzada el 4 de enero de 1993. Un año más tarde, el 17 de febrero de 1994 aparece la versión 1.0. El nombre surge de Octave Levenspiel, profesor de unos de los autores, conocido por sus buenas aproximaciones por medio de cálculos mentales a problemas numéricos en ingeniería química.

¹ Una imagen de tipo "raster" o "mapa de bits" es una imagen formada por una gran matriz de puntos (pixels) muy pequeños de diferentes colores, como por ejemplo las fotografías de una cámara digital. Un mapa raster es una imagen que normalmente ha sido escaneada a partir de un mapa en papel (aunque también puede ser una foto de satélite o una foto aérea).

² Una imagen vectorial es una imagen digital formada por objetos geométricos independientes (segmentos, polígonos, arcos, etc.), cada uno de ellos definido por distintos atributos matemáticos de forma, de posición, de color, etc.

Detalles técnicos

- Octave está escrito en C++
- Tiene un intérprete de su propio lenguaje (de sintaxis similar a Matlab), y permite una ejecución interactiva o por lotes.
- Puede extenderse el lenguaje con funciones y procedimientos por medio de módulos dinámicos.
- Utiliza otros programas GNU para ofrecer al usuario crear gráficos para luego imprimirlos o guardarlos (Grace).
- Dentro del lenguaje también se comporta como una consola de órdenes.
- Además de correr en plataformas Unix también lo hace en Windows.
- Puede cargar archivos con funciones de Matlab de extensión .m.
- Ayuda en español.

El lenguaje Octave

- La sintaxis es similar a la utilizada en MATLAB.
- Es un lenguaje interpretado.
- No permite pasar argumentos por referencia. Siempre se pasan por valor.
- No permite punteros.
- Se pueden generar scripts.
- Soporta gran parte de las funciones de la biblioteca estándar de C.
- Puede extenderse para ofrecer compatibilidad a las llamadas al sistema UNIX.
- El lenguaje está pensado para trabajar con matrices y provee mucha funcionalidad para trabajar con éstas.

Al ser su licencia pública, puede ser compartido y utilizado libremente.

4. ANALISIS PROBABILISTICO

El Azufra! es un volcán que actualmente se encuentra activo, y presenta un comportamiento estable, su actividad se reduce a la emisión de gases y azufre, aunque esto no descarta la posibilidad de que un evento eruptivo con presencia de flujos piroclásticos ocurra, amenazando a los municipios que se encuentran en sus alrededores.

Para hacer el análisis probabilístico por flujos piroclásticos en Azufra!, se utilizó la investigación de Sheridan y Macías (Ver Antecedentes 2.6.2) sobre la elaboración de un mapa de Amenaza probabilístico por flujos piroclásticos en el Volcán de Colima en México. Los datos arrojados por dicha investigación (la relación del coeficiente de Heim y la probabilidad) fueron usados para aplicarse en Azufra! (Ver Figura 11).

Luego de establecer estos parámetros, se utilizó el software GRASS (Ver numeral 3.1), para trabajar todo lo correspondiente a la topografía y para realizar análisis numérico se usó OCTAVE (Ver numeral 3.2) con el cual se elaboró una rutina que realiza todos los cálculos.

Los parámetros tenidos en cuenta para hacer el análisis probabilístico fueron: la topografía, la distancia horizontal de las coordenadas, la altura sobre el nivel del mar de cada punto y el coeficiente de Heim.

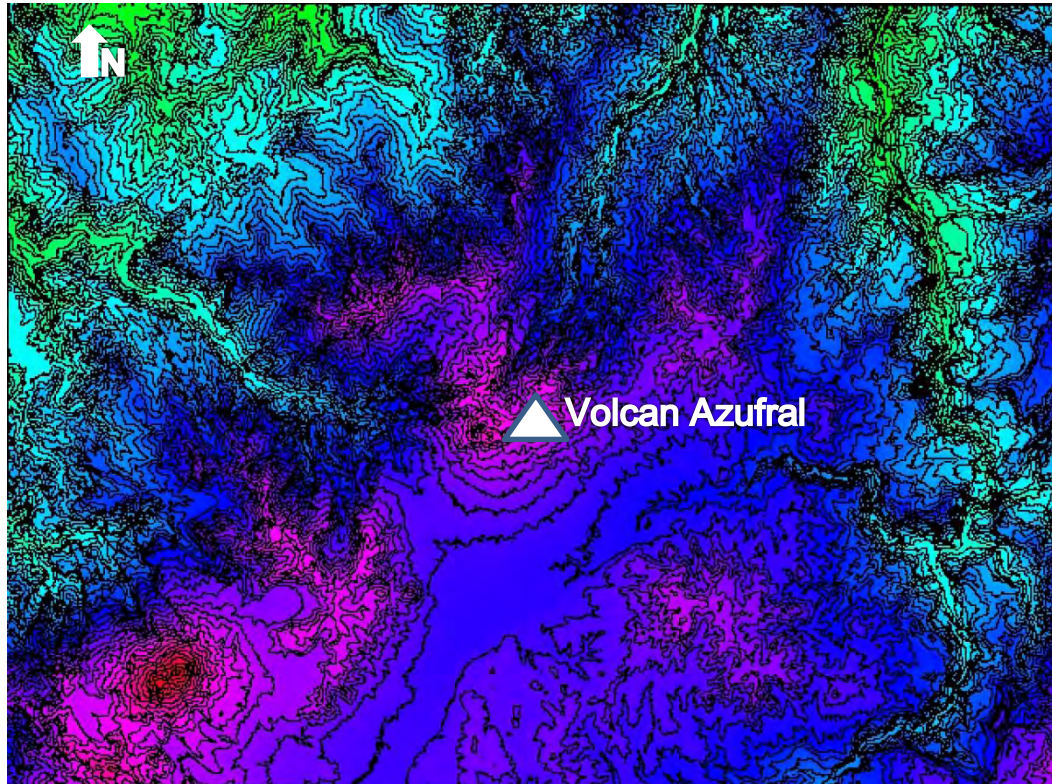
4.1. TOPOGRAFIA

La topografía es el principal parámetro para el desarrollo de los cálculos necesarios en la elaboración del mapa probabilístico por flujos piroclásticos, esto se debe a que proporciona las coordenadas y la altura sobre el nivel del mar, de una grilla de puntos alrededor del cráter del volcán.

Debido a que la región que abarca el área de influencia del volcán es grande, y que no se cuenta con levantamientos topográficos detallados, fue necesario recurrir a un modelo digital de elevación en formato raster. Este tipo de modelos fueron puestos a disposición del público el 29 de junio de 2009 por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI, por sus siglas en ingles) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA, por sus siglas en ingles) a través de la página de internet (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>). Empezaron la distribución libre del mapa topográfico digital con medidas recogidas por el instrumento radiométrico espacial avanzado de misiones térmicas y reflexión (ASTER, por sus siglas en ingles) Modelo Global de elevación digital (GDEM), que se encuentra a bordo del satélite TERRA de la NASA. Este mapa abarca un 99% de la superficie terrestre y es la representación más extensa y precisa que se ha realizado. Para la realización de este trabajo se descargó una zona que abarca el sur de Colombia y parte del Ecuador y que tiene una resolución de 30 x 30 pixeles. Posteriormente, se procedió a leer el modelo digital de elevación con GRASS, para así poder recortar un área alrededor del volcán Azufra! (ver figura 13), que abarcara todos los municipios. Luego de esto se tuvo que exportar el área seleccionada en formato TIFF. Cabe aclarar que el modelo digital de elevación tiene por defecto el

sistema de coordenadas geográficas, pero para este trabajo, se cambió al sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator). Este sistema se divide en 60 husos nombrados del 1 al 60 y en 20 zonas que se denominan con letras desde la C hasta la X; siendo la zona 18N la que corresponde al sur occidente colombiano.

Figura 13. Modelo Digital de Elevación con resolución de 30x30 pixeles del Volcán Azufral y su Área de Influencia.



El cambio del sistema de coordenadas se hizo utilizando la aplicación GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) que es una biblioteca de software para la lectura y escritura de formatos de datos geospaciales. GDAL lee el archivo con formato TIFF y una vez especificada la zona que corresponde a las coordenadas, procede a cambiar el sistema de coordenadas geográficas por coordenadas UTM, generando un nuevo archivo TIFF.

Después de hacer el cambio en el sistema de coordenadas se procede a ejecutar GRASS, pero en esta ocasión, se debe especificar una nueva ubicación para el proyecto, esto se debe a que hay que hacer un cambio en el sistema de coordenadas del software, ya que este por defecto trabaja con coordenadas geográficas, entonces al iniciar GRASS se debe ir a la opción crear una nueva localización, y en ella se define la localización del proyecto y el nombre de este, luego se elige la opción de seleccionar el sistema de coordenadas de una lista, el paso siguiente es elegir el tipo de coordenadas, en este caso UTM, para después proceder a elegir la zona de proyección, 18 Norte en el caso de del sur occidente de Colombia, inmediatamente se especifica el datum geodésico WGS 84 y

se finaliza la creación de la nueva localización. Una vez hecho esto se procede a importar el archivo raster con la opción múltiples formatos para GDAL, luego de importar el archivo, se puede cargar el modelo digital de elevación como cualquier archivo raster.

Debido a que el modelo digital de elevación posee algunos errores, como alturas cercanas a cero o nulas, se hizo necesario corregir el modelo, en el menú Raster, a través de la opción de interpolación de superficies y en ella se selecciona el relleno de celdas nulas, en la cual se especifica el mapa que se desea parchar y el nombre del mapa de salida; luego de parchar el mapa se obtiene una topografía con alturas corregidas.

Una vez corregidas las celdas nulas, se procede a exportar la topografía, en la opción exportar como mapa raster, se selecciona ASCII xyz, se elige el mapa que anteriormente fue parchado, se le da un nombre al nuevo archivo y se especifica la extensión de este, esto se hace escribiendo ".txt" al final del nombre, esto permite que el archivo pueda ser leído por cualquier editor de textos, finalmente se especifica el tipo de separador, por defecto el programa tiene una barra como separador de los datos, pero se aconseja cambiarlo por un espacio.

4.2. DISTANCIA HORIZONTAL

Para obtener la probabilidad de que un punto cualquiera de los 3'093.200 del modelo digital de elevación, sea alcanzado por un flujo piroclástico, es necesario calcular la distancia horizontal que recorrería el flujo desde la coordenada correspondiente al cráter hasta la coordenada del punto; para esto se usó la expresión matemática, para encontrar la distancia entre 2 puntos en un plano cartesiano.

$$Distancia = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (Ec. 8)$$

Ante la necesidad de agilizar los cálculos, se elaboró una rutina en OCTAVE que calcula la distancia horizontal con la ecuación 8, desde la coordenada correspondiente al cráter a cualquier punto del modelo digital de elevación. Se necesita de un archivo que contenga una matriz, con las coordenadas UTM de todos y cada uno de los puntos además de la altura sobre el nivel del mar, tal y como se explico en el numeral anterior.

OCTAVE, posee la función de leer rutinas que se guarden en un archivo o script³ con la extensión ".m", así que se procedió a escribir todas las ordenes de la rutina para realizar los cálculos en un script; la forma de escribir u programar una rutina en OCTAVE es similar a escribir código en lenguaje C, por lo que muchas de las ordenes de la programación se basan en este lenguaje.

³ En informática, un *script* es un conjunto de instrucciones. Permiten la automatización de tareas, creando pequeñas utilidades. Es muy utilizado para la administración de sistemas Unix. Son ejecutados por un intérprete de línea de órdenes y usualmente son archivos de texto.

4.3. ALTURA

La altura se define como la diferencia entre la cota del cráter o bien la altura de colapso de la nube eruptiva y las cotas del terreno circundante, y esta altura es la que determina la energía que se va a perder durante el recorrido del flujo piroclástico. Para encontrar la altura se necesita hacer la siguiente operación:

$$\text{altura} = \text{Altura en m. s. n. m del Cráter} - \text{Altura en m. s. n. m del Punto Analizado (Ec. 9)}$$

En este estudio se tomaron alturas de colapso de la nube eruptiva de 0, 500 y 1000m a partir del cráter, porque se considera que son los casos que abarcan los rangos más “típicos” en las erupciones explosivas de estratovolcanes.

La rutina que se elaboró toma como término fijo la coordenada del cráter y varía la altura de colapso como la altura y coordenada del punto de análisis dentro del modelo digital de elevación.

A continuación se procede a explicar con un ejemplo, los cálculos necesarios para encontrar la probabilidad que tiene la cabecera municipal de Túquerres de ser alcanzada por un flujo piroclástico.

La cabecera municipal de Túquerres tiene coordenadas UTM (208467.78, 120373.08) y una altura sobre el nivel del mar de 3104 metros, y el cráter del volcán Azufral tiene coordenadas UTM (197643,119877) y una altura sobre el nivel del mar de 4070 metros. Lo primero que se hace, es identificar el entorno topográfico que rodea al cráter, esto se puede hacer con la ayuda de GRASS, ya que este permite generar un mapa vectorial con curvas de nivel con los incrementos de altura a criterio del usuario. En este ejemplo se generó un mapa vectorial a partir del modelo digital de elevación, con curvas de nivel cada 100 metros, y en el cual se establecieron los puntos correspondientes al cráter y la cabecera municipal, que además proporciona una vista superior de la línea de energía que se genera entre estos dos puntos (Ver figura 14).

Como ya se tiene la topografía, el siguiente paso es obtener un perfil del terreno entre el cráter y la cabecera municipal (ver figura 15), en este perfil, se puede observar 3 casos con líneas de energía que se forman entre estos dos puntos, el primer caso es una altura de colapso desde el cráter, el segundo caso es una altura de colapso 500 metros por encima de la cota del cráter y un tercer caso con 1000 metros por encima de esta, además de que muestra que las líneas pueden proyectarse desde el cráter a cualquier punto dentro del área de estudio.

Figura 14. Mapa vectorial de la topografía del volcán Azufra con una vista superior de la línea de energía entre el cráter y la cabecera municipal de Túquerres.

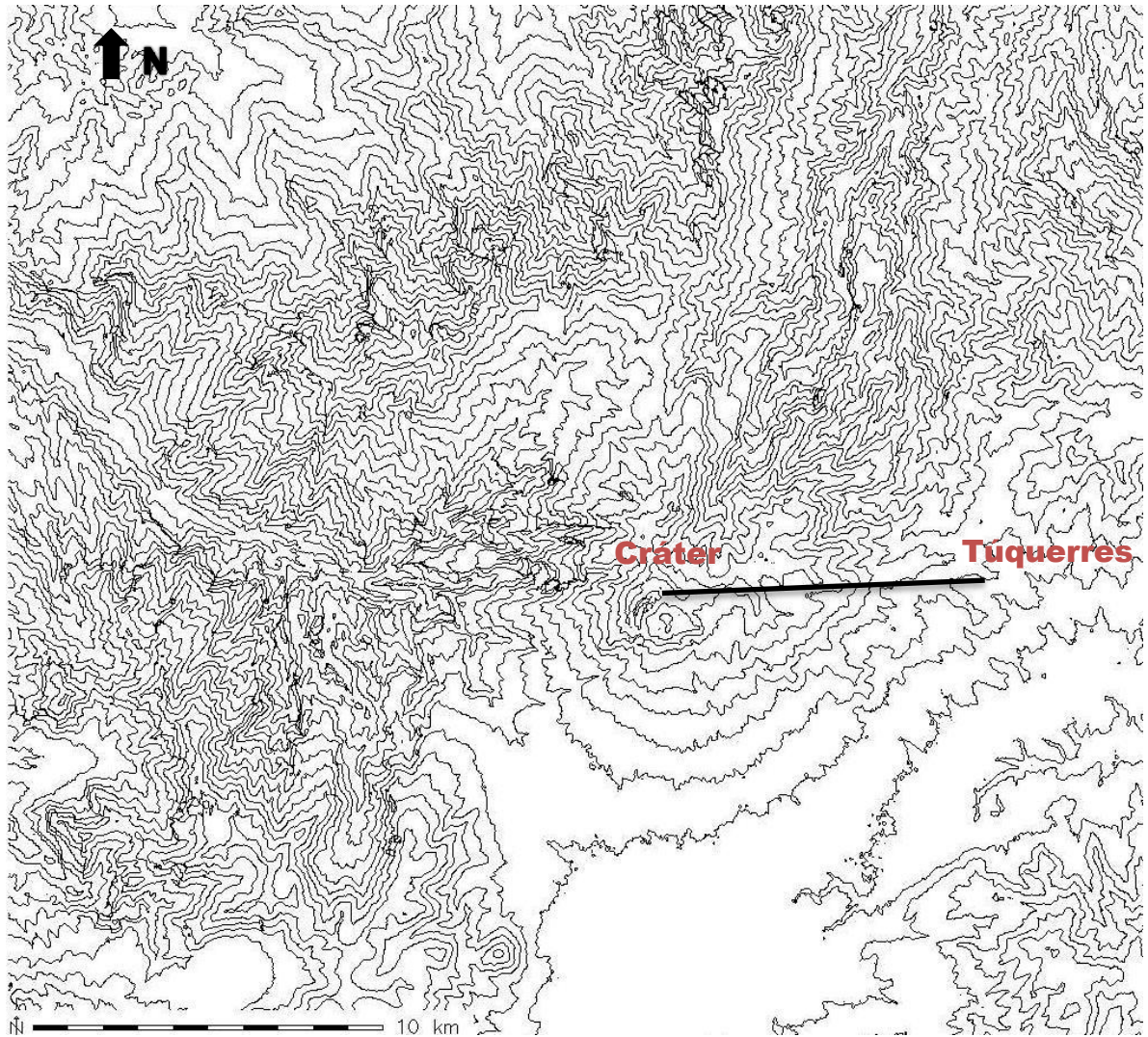
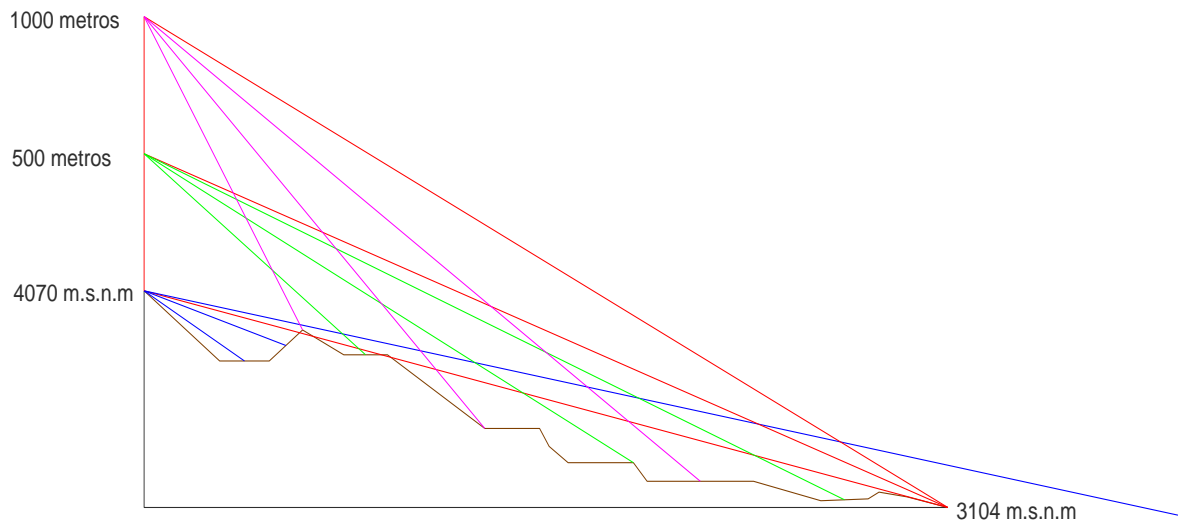


Figura 15. Perfil topográfico desde el cráter hasta la cabecera municipal de Túquerres. Nótese la variación del ángulo de la línea de energía, cada caso representa un coeficiente de Heim. El lugar donde el flujo se detiene puede variar respecto al sitio calculado.



Con las coordenadas de los dos puntos de análisis, se procede a calcular la distancia horizontal:

$$Distancia = \sqrt{(197643 - 208467.78)^2 + (119877 - 120373.08)^2}$$

$$Distancia = 10836.14 \text{ metros}$$

Luego de esto se calcula la altura como diferencia de cotas, pero como se tiene 3 escenarios para la formación de las líneas de energía, se tienen que sumar los 500 y 1000 metros de altura de los casos 2 y 3 a la cota del cráter, los resultados son los siguientes:

$$Altura 1 = 4070m - 3104m = 966 \text{ metros}$$

$$Altura 2 = 4570m - 3104m = 1466 \text{ metros}$$

$$Altura 3 = 5070m - 3104m = 1966 \text{ metros}$$

Después se procede a encontrar los coeficientes de Heim para la cabecera municipal en los 3 casos, usando la siguiente fórmula:

$$Heim = \frac{Altura}{Distancia Horizontal} \text{ (Ec. 10)}$$

Los resultados son los siguientes:

$$Heim_{caso 1} = \frac{966 \text{ metros}}{10836.14 \text{ metros}} = 0.089$$

$$Heim_{caso\ 2} = \frac{1466\ metros}{10836.14\ metros} = 0.135$$

$$Heim_{caso\ 3} = \frac{1966\ metros}{10836.14\ metros} = 0.182$$

Una vez calculados los coeficientes de Heim para los 3 casos, se utiliza la figura 11, para encontrar la probabilidad que les corresponde de manera aproximada, los resultados encontrados para la cabecera municipal fueron los siguientes:

- Caso 1= <2%.
- Caso 2= <2%
- Caso 3= <2%

Todos estos cálculos deben repetirse para los 3'.093.200 puntos del modelo digital de elevación, por este motivo tuvo que elaborarse una rutina que hiciera todos estos, para así elaborar un mapa de amenaza probabilístico.

4.4. RUTINA EN OCTAVE PARA CALCULAR LOS COEFICIENTES DE HEIM.

Un coeficiente de Heim es el resultado de dividir la diferencia de alturas de dos puntos, y la distancia horizontal entre estos, que visto de otra manera es la tangente del ángulo de la línea de energía que se forma (Ver figura 8). Luego de calcular los coeficientes de Heim con los resultados de las distancias horizontales y alturas encontradas, se procedió a calcular la probabilidad que representan, tomando como base los resultados de la investigación realizada en el volcán de Colima (Sheridan y Macías, 1995), en el cual para un determinado coeficiente de Heim se obtuvo una correspondiente probabilidad de que un flujo piroclástico proveniente del cráter, alcance un punto en el mapa, los coeficientes y probabilidad fueron plasmados en una gráfica (Ver figura 11).

Para el desarrollo de este trabajo, es necesario conocer los valores de los puntos de la gráfica (Coeficiente de Heim vs Probabilidad), así que, se procedió a encontrar dichos valores y el resultado que obtuvo de esta actividad se plasmó en la tabla 2, que asocia los coeficientes de Heim a una probabilidad y que son empleados en el desarrollo de una rutina de cálculo para este trabajo.

Tabla 2. Rango de Probabilidades y su relación con los coeficientes de Heim en el Volcán de Colima.

Flujos Piroclásticos	
Heim	Probabilidad
0	0%
0.2102	10%
0.2202	20%
0.2250	30%
0.2442	40%
0.2495	50%
0.2495	60%
0.2566	70%
0.2601	80%
0.2806	90%
0.3075	99%

Un análisis fruto del estudio del modelo digital de elevación y de visitas de campo evidenció que debido a la accidentada topografía que rodea al cráter, se pudieron haber obtenido como resultado algunos coeficientes de Heim que están por encima o por debajo de los resultados límite de los coeficientes de obtenidos en Colima, estos límites son:

- Límite inferior: 0.1889
- Límite superior: 0.3075

Entonces, esto sirvió para establecer una condición en la rutina que permitió que todos los coeficientes calculados que sean menores al límite inferior, sean redondeados hasta este, y los coeficientes que superen el límite máximo, se asuman con una probabilidad del 99%.

Los resultados de la investigación hecha en Colima (Sheridan y Macías, 1995) se graficaron en papel de probabilidad aritmética. El conjunto de puntos presentan un ajuste con una línea recta que representa una función de Gauss, obteniendo así la figura 17; por la forma en que están distribuidos los puntos, se asumió que estos presentan una distribución normal.

Una distribución normal se rige por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (Ec.11)$$

Dónde:

- x es una variable aleatoria continua.
- μ es la media aritmética.

- σ es la desviación estándar.

A fin de obtener una función para encontrar las probabilidades, se calcularon la desviación estándar y la media aritmética de los datos de la tabla 2, y estos se reemplazaron en la ecuación 11, dando como resultado la siguiente función:

$$f(x) = \frac{1}{0.077916\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-0.22525}{0.077916}\right)^2} \text{ (Ec.12).}$$

Dónde:

- x es un coeficiente de Heim de los 3'093.200 calculados para Azufra.

Una vez encontrada la función de probabilidad, se procedió a interpolar los coeficientes encontrados en Azufra entre los coeficientes de Heim de Colima y su probabilidad, y de esta manera se hallaron las probabilidades que tienen todos los puntos de la topografía del Volcán Azufra.

5. RESULTADOS

En este capítulo, se procede a mostrar los resultados obtenidos por los cálculos llevados a cabo con los parámetros expuestos en el capítulo anterior y que dieron como primer resultado, la creación de una rutina que calcula la probabilidad que tienen los puntos del modelo digital de elevación. La rutina necesitó de un archivo exportado desde GRASS, en formato ASCII xyz con una extensión “.txt” como se explicó anteriormente, y que contenía la topografía, el archivo que se generó contiene una matriz con 3 columnas y 3'093.200 filas, las 2 primeras columnas contienen las coordenadas UTM de cada fila, y la tercera columna corresponde a la altura sobre el nivel del mar.

Para comprender el funcionamiento de la rutina, hay que entender la forma de programar en OCTAVE, ya que esta es similar a la del lenguaje C, por eso las ordenes que no son de análisis numérico, tienen la misma sintaxis que este lenguaje. Ya definida esta parte, es necesario explicar la forma en que OCTAVE trabaja la parte correspondiente al álgebra lineal (vectores y matrices) ya que la mayor parte de la rutina trabaja con ellas. Para una matriz, se necesita saber el número de filas y columnas que esta tiene, y en OCTAVE se hace de la siguiente manera:

$$M = (f, c)$$

Aquí se le da el nombre de M a la matriz, luego entre paréntesis, f representa el número de filas, y c el número de columnas, una vez entendido esto, se puede proceder a explicar cómo utilizar una fila o una columna en especial de esta matriz.

$$M(n, :)$$

$$M(:, n)$$

En el primer caso, se está diciendo que solo se necesita utilizar toda la fila número n de la matriz M, y en el segundo caso se está dando la orden de utilizar toda la columna número n de la matriz M.

Una vez aclarado esto, procede a ensamblar los pasos descritos en el capítulo anterior, en forma de una rutina:

```
a=load('nombre del archivo con la topografia.txt');
b=[coordenadas y altura sobre el nivel del mar del cráter];
distancia=[(((b(1,1)-a(:,1)).^2)+((b(1,2)-a(:,2)).^2)).^0.5];
altura=[(b(1,3)-a(:,3))];
he=[(h./l)];
li=[0.175];
ls=[0.315];
t=size(a);
for i=1:t(1)
    if he(i)<li
        he(i)=li;
    end
end
```

```

        if he(i)>ls
            he(i)=ls;
        end
    end
    heim=[0.1889;0.2102;0.2202;0.2250;0.2442;0.2495;0.2495;0.2566;0.2601;0.2806;0.3075];
    ave= mean(heim);
    sigma=std(heim);
    p=100*normcdf(heim,ave,sigma);
    probabilidad=interp1(heim,p,he);
    file="azufral_probabilidades.txt";
    fid1=fopen(file,'w');
    A=a(:,1);
    B=a(:,2);
    C=probabilidad(:,1);
    for i=1:t(1)
        if C(i)<2
            C(i)=2;
        end
        fprintf(fid1,"%f %f %f\n",A(i),B(i),C(i));
    end
    fclose(fid1);

```

Lo primero que se hace es cargar el archivo que se exportó desde GRASS, y leerlo como la matriz “a”, la siguiente línea es el vector fila “b” que tiene las coordenadas y altura sobre el nivel del mar del cráter. Luego de que el parámetro inicial que es la topografía, se ha cargado con los términos “a y b”, la rutina hace el cálculo de la distancia horizontal que se almacena en el vector columna que se llama “distancia”, y luego hace el cálculo para encontrar la diferencia de alturas, que al final se almacena en otro vector columna llamado “altura”.

Hasta aquí ya se ha trabajado con los 3 primeros parámetros de cálculo (topografía, distancia horizontal y altura), entonces la rutina puede continuar con la parte correspondiente al cálculo de los coeficientes de Heim para el volcán Azufral, esto lo hace dividiendo cada altura calculada entre la distancia horizontal correspondiente; OCTAVE facilita este cálculo con la opción división punto a punto. En la rutina esta es la quinta línea, en ella “he” es el vector columna que va a almacenar los coeficientes de Heim, en ella la división punto a punto se hace escribiendo “./”, que es la orden que especifica que se va a tomar el primer término del vector “altura” y se lo va a dividir entre el primer término del vector “distancia”, y de esta forma divide todos los datos de estos vectores, resultando en un vector con coeficientes de Heim.

Como ya se tiene calculados los coeficientes de Heim, es necesario revisar si estos no superan los límites que se establecen en el numeral 5.4, para esto la rutina utiliza un ciclo “for” que analizará los datos desde la fila 1 hasta la 3’093.200, y adicionalmente hay dos condicionantes “if” que dicen a la rutina que si un coeficiente esta por fuera del límite inferior, inmediatamente lo lleve a este, y hará lo mismo si el coeficiente esta por fuera del límite superior.

Después de que se corrige el vector “he”, la rutina presenta un vector columna con los coeficientes de Heim obtenidos de Colima (Sheridan Y Macías, 1995). A este vector se le calcula una media aritmética con el comando “mean” y una desviación estándar con el comando “std”, ambos resultados son guardados en los términos “ave” y “sigma”. Luego la rutina procede a calcular las probabilidades corregidas para una distribución normal, en el vector “p”, donde “normcdf” es el comando para especificar a OCTAVE que se trabaja con este tipo de distribución.

Una vez terminado el paso anterior, se procede a calcular la probabilidad del vector de Coeficientes de Heim de Azufra, a la rutina se le ha especificado utilizar el comando “interp1” para interpolar linealmente cada dato del vector “he” entre los coeficientes de Colima y sus probabilidades, el resultado de esto es un vector que se llama “probabilidad” y que almacena las probabilidades de todos los puntos del modelo digital de elevación.

Como ya se ha calculado todas las probabilidades, el siguiente paso en la rutina es almacenar en un archivo la probabilidad con las coordenadas que le corresponden; esto se hace ejecutando la opción “file” y en ella se especifica el nombre del archivo, luego se abre un fichero “fid1” para empezar a grabar los datos. Después se declaran las variables que van a guardarse, en este caso, A y B corresponden a las columnas 1 y 2 de la matriz con la topografía, y C corresponde al vector con las probabilidades calculadas. El ciclo “for” dictamina el número de filas a guardar, pero adicionalmente se ha condicionado el vector C, para que las probabilidades inferiores a 2% por practicidad se igualen a esta; el comando “fprintf” guardará todas las variables declaradas.

Luego de haber creado la rutina, se procedió a hacer el cálculo de cada uno de los modelos propuestos. Los 3 casos que se modelaron varían en 500 metros de altura uno con respecto al otro, en primer lugar se hizo un modelamiento con una altura de colapso de 0 metros, es decir que se considera que el colapso inicia desde la altura del cráter, un segundo cálculo se hizo con una altura de colapso de 500 metros que podría ser la altura típica y un modelamiento final con una altura de colapso de 1000 metros (ver figuras 16, 17 y 18), que es el peor caso analizado, no se hizo un modelamiento con una altura mayor a los 1000 metros porque se considera que una nube eruptiva que supera los 1000 metros puede ser muy poco probable (Córdoba, 2012). Los resultados de estos cálculos fueron plasmados en tres mapas que se crearon en GRASS y que además fueron montados en Google Earth para facilitar la identificación de centros poblados y discriminar el nivel de amenaza probabilística.

Figura 16. Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 0 metros.

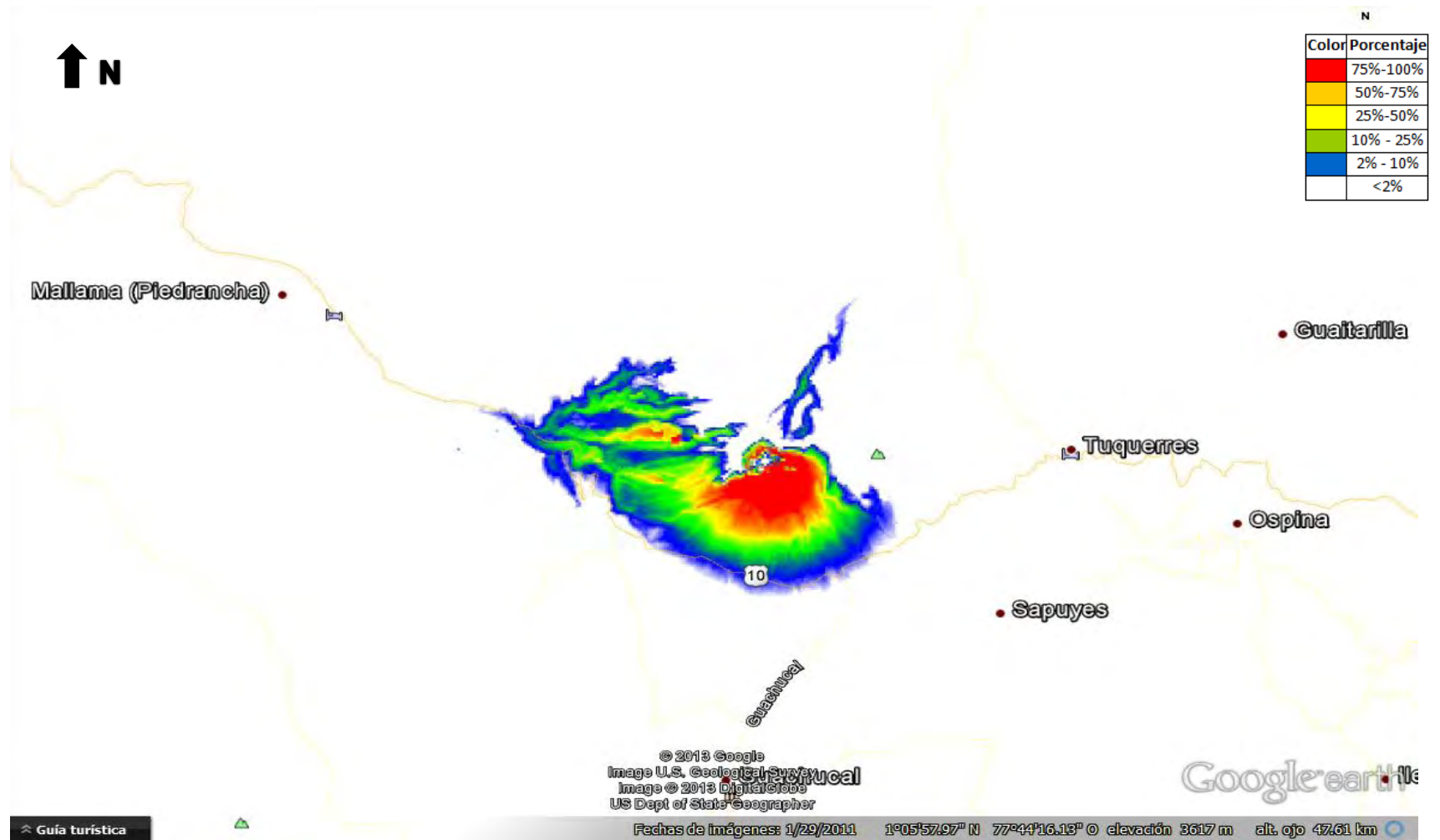


Figura 17. Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 500 metros.

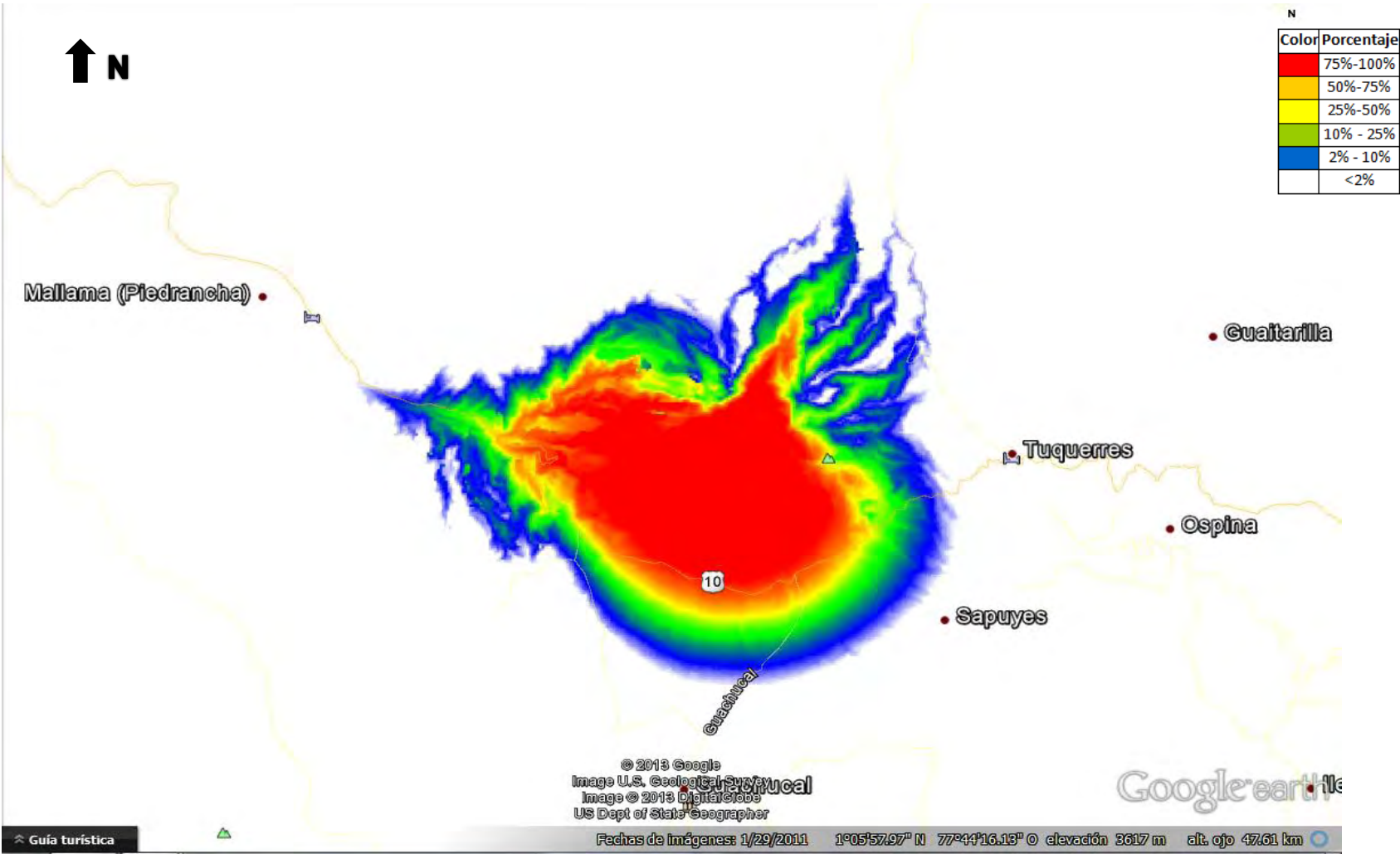
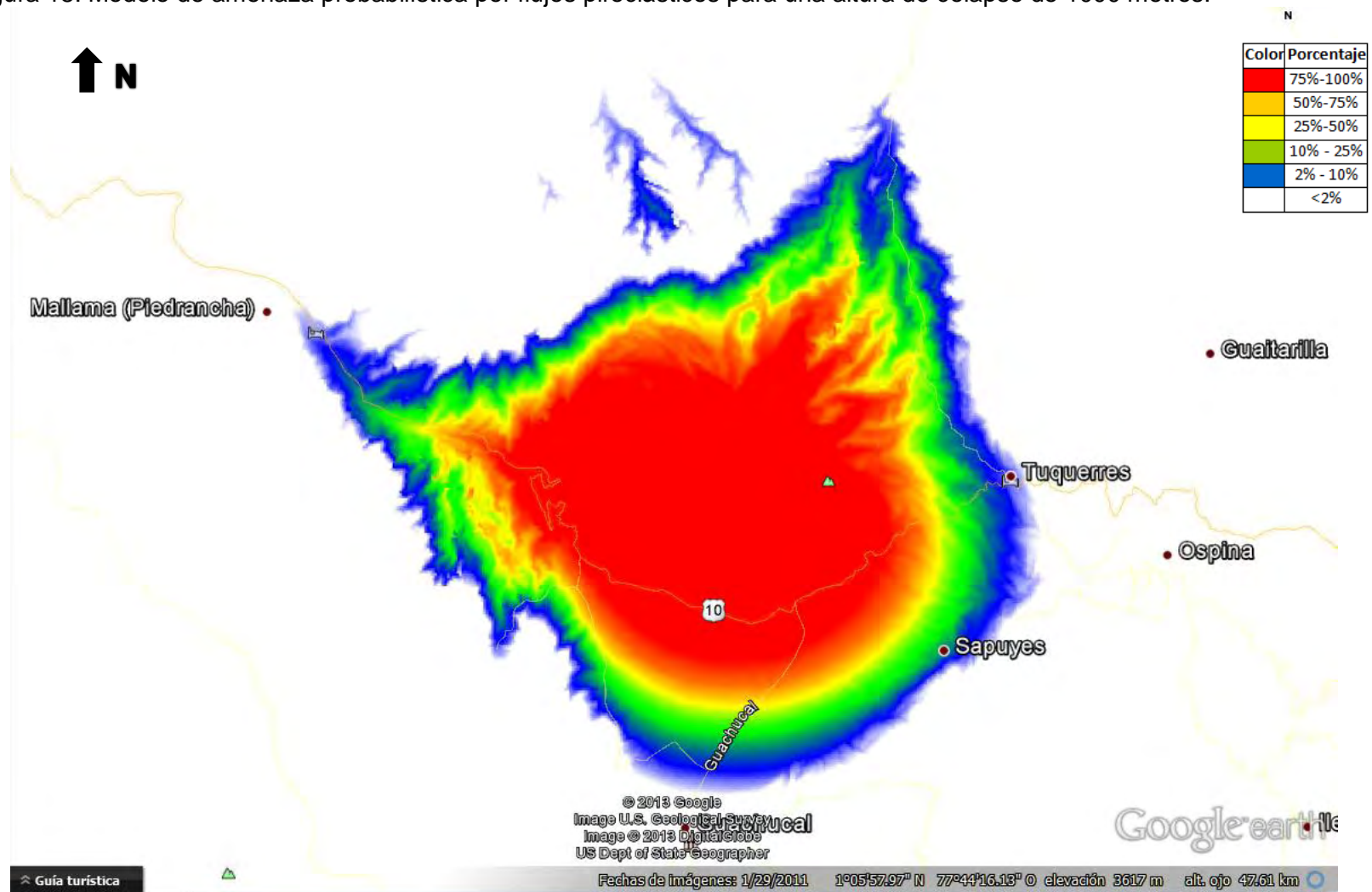


Figura 18. Modelo de amenaza probabilística por flujos piroclásticos para una altura de colapso de 1000 metros.



6. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de los 3 cálculos hechos para el volcán Azufra, con un enfoque desde cada municipio y algunos corregimientos dentro del área de influencia.

6.1. MUNICIPIO DE SANTACRUZ DE GUACHAVEZ

Después de que la rutina hizo el cálculo para las 3 alturas de colapso, y estos resultados se plasmaron en 3 modelos que discriminan la probabilidad de acuerdo al color, para el municipio de Guachavéz, la probabilidad que se calculó resultó ser menor del 2 % en los 3 casos analizados. La figura 19 muestra 3 posibles escenarios, y en ellos la cabecera municipal de Santacruz de Guachavéz tiene una probabilidad baja de ser alcanzada por un flujo piroclástico, esto se debe al efecto que tienen las montañas próximas a esta población, ya que sus alturas son cercanas a la cota del cráter y encausan el flujo por la cuenca del río Azufra, además la distancia horizontal desde el cráter a la cabecera municipal es grande, estos factores provocan que las líneas de energía tengan ángulos bastante bajos, lo que se traduce en que un flujo piroclástico no podría tener un gran recorrido.

Balalaika: es un corregimiento que se encuentra en la vía de acceso a la cabecera municipal ubicada al borde del río Azufra, el cual formar un canal que encausaría un eventual flujo piroclástico hacia este corregimiento. Para el peor caso analizado, Balalaika tendría una probabilidad cercana al 10% de ser alcanzada por un flujo piroclástico (Ver figura 20).

Figura 19. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, Vistos desde la Cabecera Municipal de Guachavez. Nótese que para el caso A donde la altura de colapso es de 0 metros, la probabilidad de que la cabecera sea alcanzada es $<2\%$. En el Caso B y C donde la altura de colapso es de 500 y 1000 metros respectivamente se mantiene una probabilidad $<2\%$.

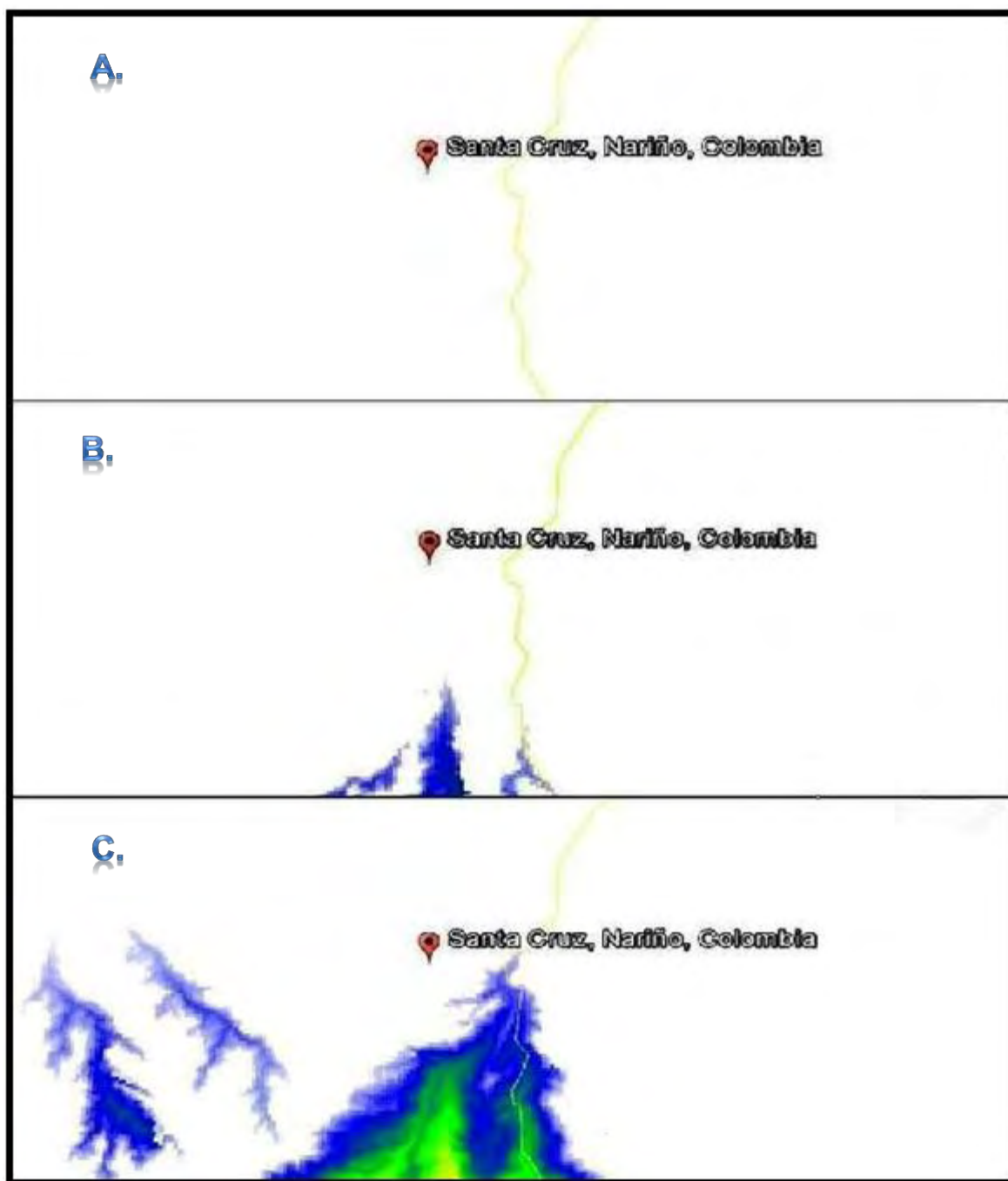
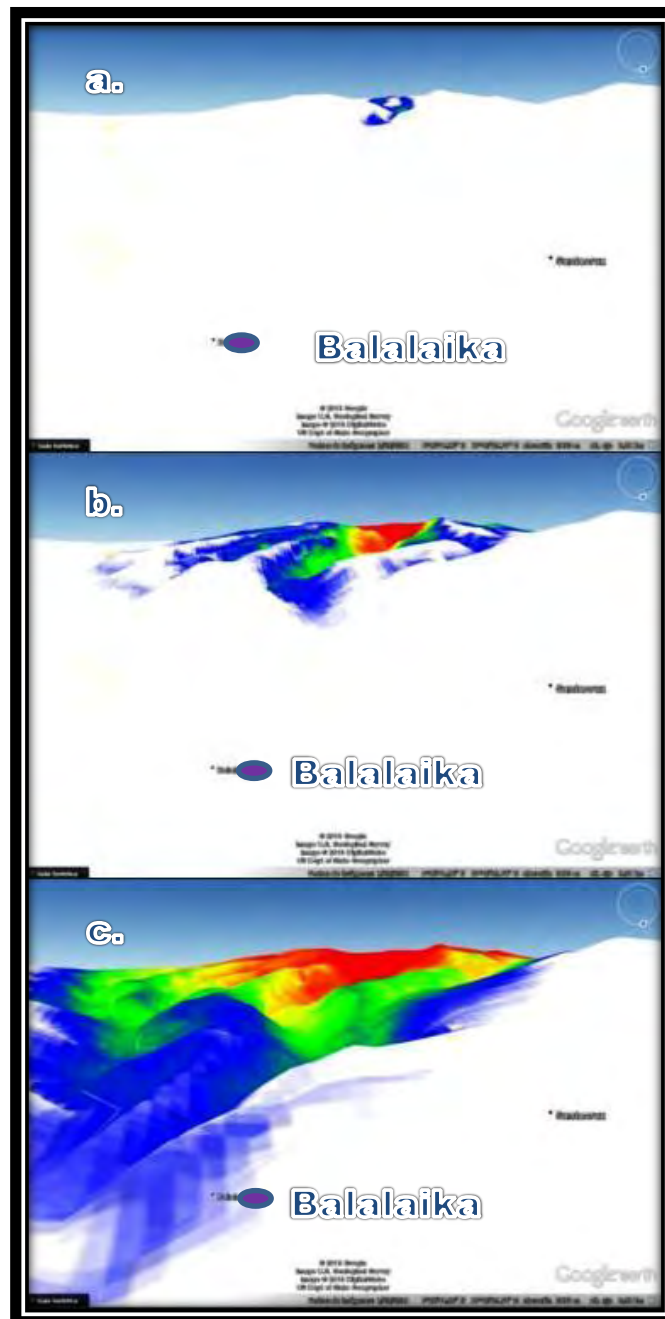


Figura 20: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, Vistos desde la Cabecera del corregimiento de Balalaika. Nótese que para los casos A y B, donde la altura de colapso es de 0 y 500 metros respectivamente, la probabilidad de que la cabecera del corregimiento sea alcanzada es <2%. En C donde la altura de colapso es de 1000 metros la probabilidad aumenta considerablemente hasta alcanzar un valor cercano al 10%.



6.2. MUNICIPIO DE TUQUERRES:

Este municipio es el que mayor población tiene de los 4 que corresponden al área de influencia del Azufral, este sirve además de conexión a municipios como Samaniego, Guachavez, Providencia y Sotomayor, con Pasto, Ipiales y Tumaco. Túquerres es un municipio que basa su economía en la agricultura, gracias a los ricos suelos volcánicos; pero esto ha hecho que algunos de sus corregimientos se asienten cada vez mas cerca del volcán, además hay carreteras secundarias y terciarias que manejan un importante flujo vehicular y que atraviesan estas zonas, que se podrían ver amenazadas.

La imagen 21, muestra el porcentaje de amenaza que tendrían las cabeceras de los corregimientos como Santander de Valencia y Tutachag en los 3 casos que se calculó, para una altura de colapso de 0 metros su probabilidad apenas es del 2%, pero cuando se considera una altura de colapso de 500 metros, la situación cambia, ya que en los corregimientos de Santander y Tutachag, que podrían verse afectados, se obtienen una probabilidad de aproximadamente 12% y menor al 2% respectivamente. Una altura de colapso de 1000 metros arroja una probabilidad de 64 % para Santander de Valencia y de 30% para Tutachag.

Cabecera municipal de Túquerres: como lo muestra la figura 22, se obtiene una probabilidad menor al 2% para los casos 1 y 2 pero en el caso 3, su probabilidad llega a ser de 7%. Túquerres tiene una carretera que se dirige hacia el sector del Espino, que es de jurisdicción de Sapuyes, pero ahí la vía tiene una bifurcación (La "Y" del Espino), una carretera lleva hacia el municipio de Mallama y otra conduce hacia Guachucal (ver figuras 18,19 y 20).En el primer cálculo, la vía que lleva al Espino, obtiene una probabilidad cercana al 10%, pero en el siguiente calculo, que es el caso típico y por ende el más probable, los 11.7 kilómetros de carretera llegan a una probabilidad cercana al 85%, en aproximadamente 3 kilómetros de carretera, que son los más cercanos al Espino. Un cálculo posterior consideró que una altura de colapso desde 1000 metros de altura, vía se encontraría en una zona con probabilidades cercanas al 90%. La siguiente carretera que se analizó fue la que comunica con los municipios de Samaniego y Guachavez, esta se podría ver amenazada en el tercer caso de cálculo, ya que 19.5 kilómetros de esta, se encuentran dentro de una zona con probabilidades entre el 10 y 25%.

Figura 21: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para corregimientos del municipio de Túquerres. El numero 1 representa la cabecera del corregimiento de Santander y el 2 el de Tutachag. Nótese que para el caso A donde la altura de colapso es de 0m las probabilidades son <2% para 1 y 2. En el caso B con una altura de colapso de 500m, las probabilidades obtenidas fueron de 12% para 1 y 2% para 2. En el caso C, el más crítico analizado, con una altura de colapso de 1000m las probabilidades son de 64% y 30% para 1 y 2 respectivamente.

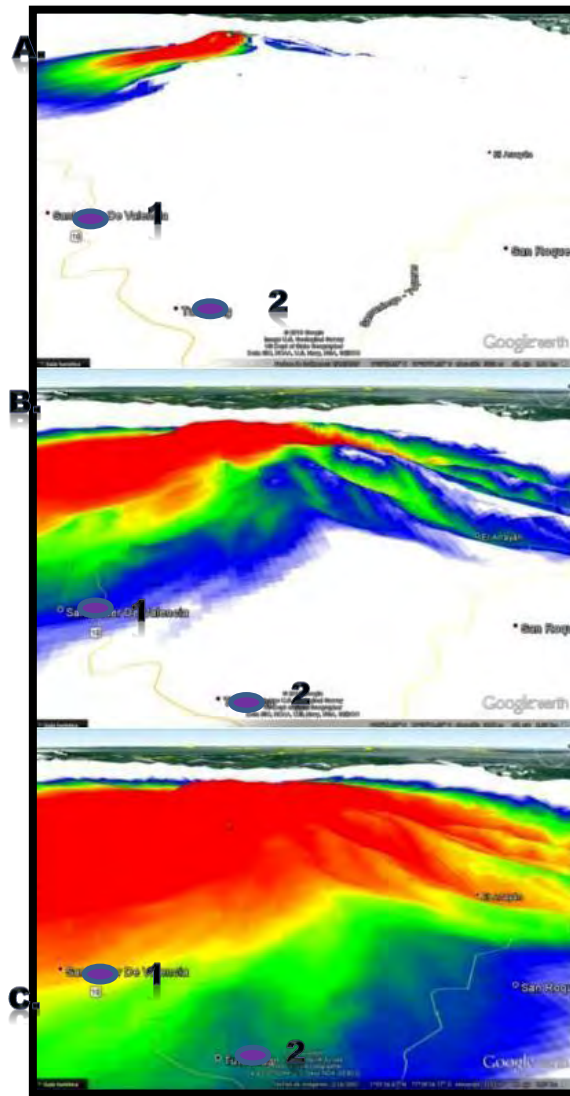
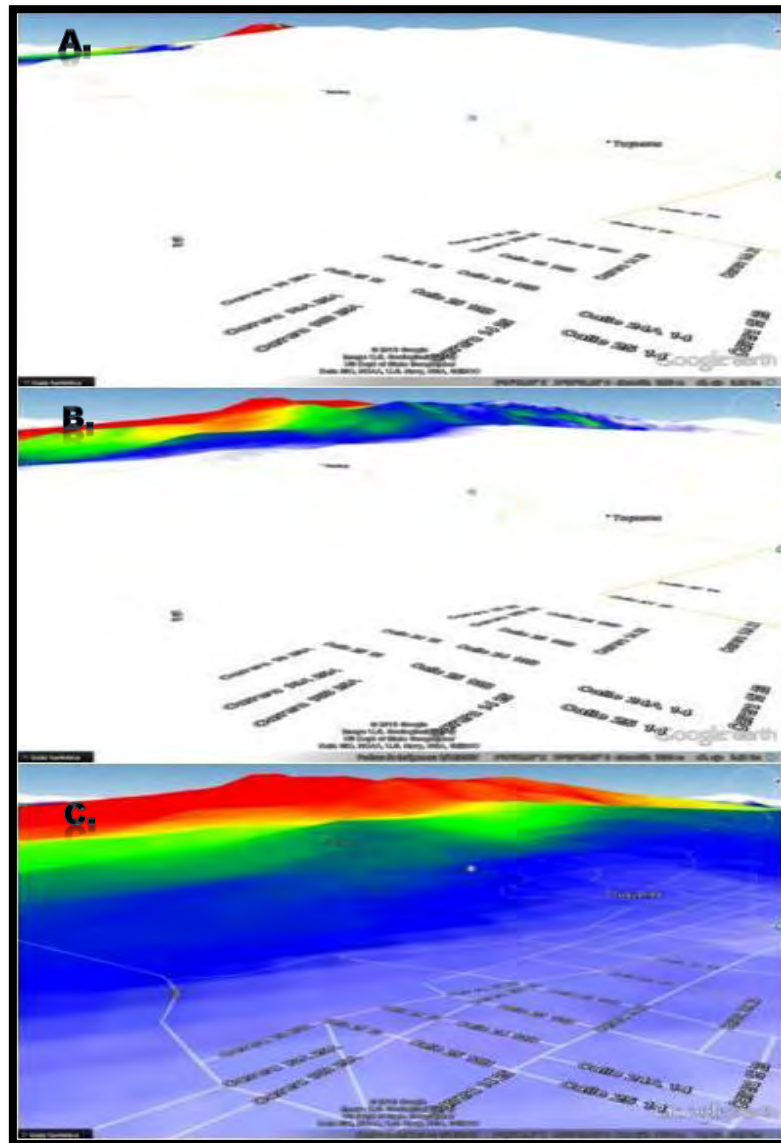


Figura 22. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la cabecera del municipio de Túquerres. Nótese que para el caso A y B donde la altura de colapso es de 0m y 500m respectivamente las probabilidades son <2%. Para el caso C con una altura de colapso de 1000m la probabilidad de que la cabecera municipal sea alcanzada es cercana al 7%.



6.3. MUNICIPIO DE SAPUYES:

El municipio de Sapuyes, es el que presenta zonas con mayores probabilidades, ya que el corregimiento del Espino, que es de su jurisdicción, queda muy cerca del cráter, además de que hay una diferencia de cotas que se traducen en que los flujos piroclásticos tendrán mayor energía para perder; esto se ve reflejado en coeficientes de Heim grandes, que producen probabilidad bastante elevadas para los casos de alturas de colapso de 500 y 1000 metros.

El Espino: analizando los resultados, se encontró que para el primer caso, el corregimiento del Espino, tendría una probabilidad de casi 8%, pero en el segundo caso, la probabilidad aumenta hasta un 86%, y en el tercer caso, que es el peor analizado, la probabilidad sería de 97%. Los resultados obtenidos en los cálculos para 2 y 3,

La imagen 23, es el resultado obtenido al calcular un mapa de amenaza por flujos piroclásticos, para los 3 escenarios, con una perspectiva desde el Espino. En cuanto a la cabecera municipal, la probabilidad es inferior al 2% en los 3 casos de análisis.

En uno de los viajes que se realizaron a este corregimiento, se logró obtener material fotográfico, que evidencia la actividad del Azufral (ver figuras 24 y 25). De estas imágenes se puede analizar, que el sector del Espino, es el mas vulnerable de todos los puntos objeto de análisis, ya que en este sector, los depósitos encontrados pueden avalar las probabilidades calculadas para los casos de 500 y 1000 metros.

Figura 23. Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la cabecera del corregimiento del Espino. Para el caso A con una altura de colapso de 0m, el corregimiento del Espino tiene una probabilidad de ser alcanzado por un flujo piroclástico cercana al 8%. En el caso B para una altura de colapso de 500m se tiene una probabilidad de 86%. Para una altura de colapso de 1000m, caso C, la probabilidad alcanza un valor crítico de 97%.

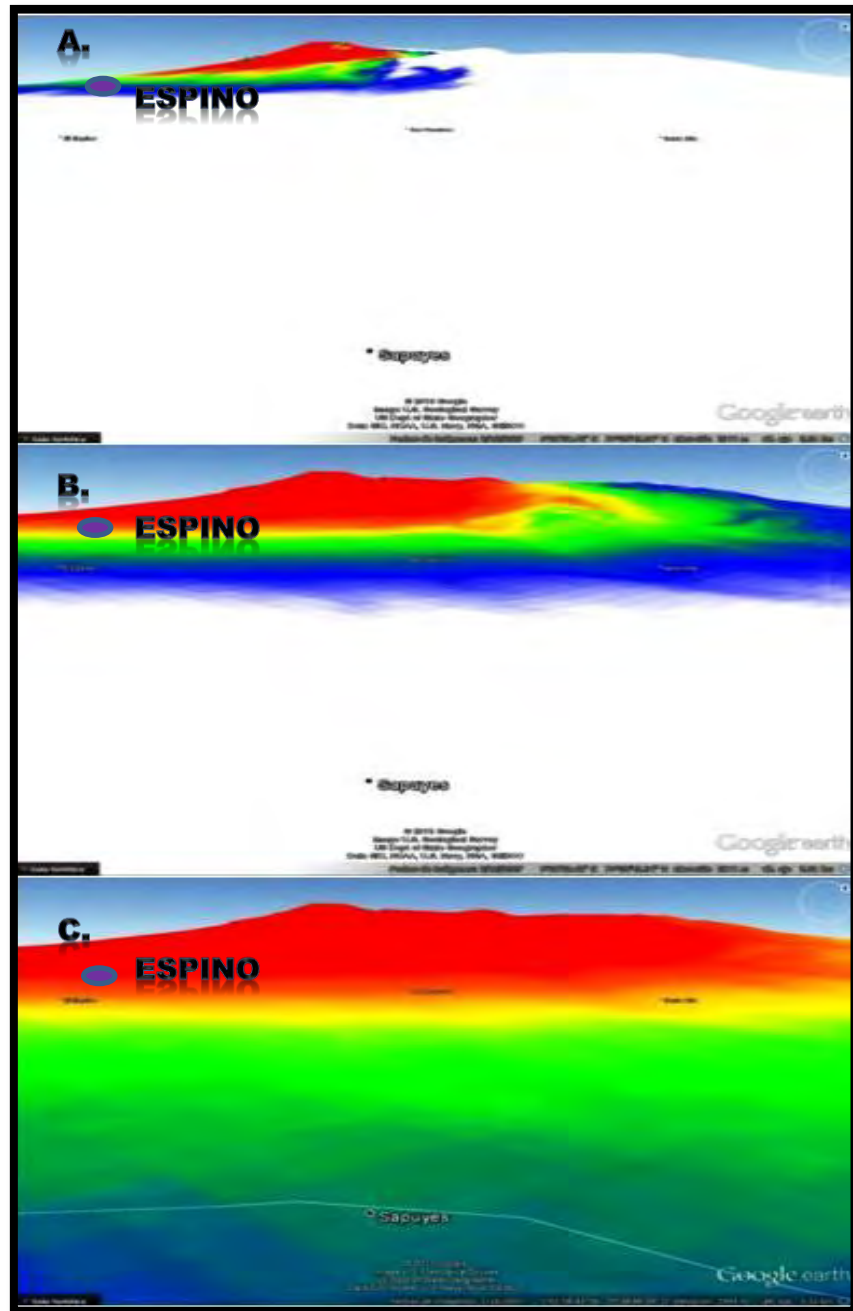


Figura 24. Depósitos de oleadas y Flujos Piroclásticos en el corregimiento del Espino. Nótese que son visibles varios estratos que alternan oleadas y flujos piroclásticos, también tienen la particularidad de que no se evidencian depósitos de caída.



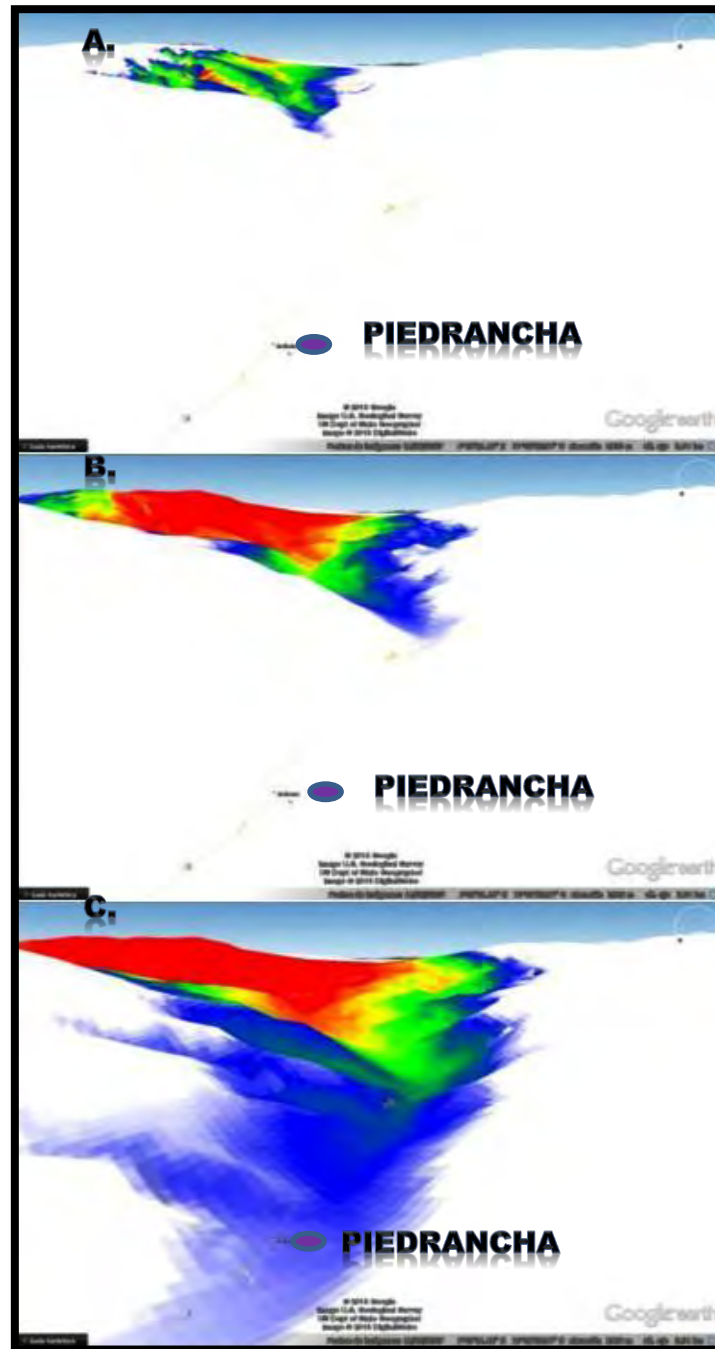
Figura 25. Depósitos de Flujos Piroclásticos en el corregimiento del Espino debido al colapso de un domo. De acuerdo con el Dr. Sheridan estos depósitos poseen características para ser considerados producto del colapso de un domo del volcán Azufra.



6.4. MUNICIPIO DE MALLAMA (PIEDRANCHA)

Este Municipio presenta la particularidad de quedar en el medio de un valle formado por la topografía del terreno, la altura de las montañas que lo rodean, hace que todo este sector se comporte como un canal que encausaría un eventual flujo piroclástico directamente hacia Piedrancha; las probabilidades que se obtuvieron fueron de 2% para los casos 1 y 2, y una probabilidad de 6% para el caso 3. (Ver Figura 26).

Figura 26: Posibles Escenarios de Formación de Un Flujo Piroclástico, para la cabecera del municipio de Mallama. Para los casos A y B con alturas de colapso de 0m y 500m respectivamente, la probabilidad es <2%. Para el caso C donde la altura de colapso es de 1000m la probabilidad llega al 6%. Nótese en el caso C la afectación de la cabecera municipal y a gran parte de la carretera Túquerres – Tumaco.



7. CONCLUSIONES

- La rutina creada para el cálculo del modelo de análisis en el volcán Azufra, utilizando el método de las líneas de energía, puede ser utilizada para calcular modelos de amenaza probabilística en cualquier estratovolcán.
- En caso de que se presente una erupción con una altura de colapso de 1000 metros o más, las probabilidades de que centros poblados puedan ser alcanzados son bastante altas.
- Todas las cabeceras municipales presentan probabilidades inferiores al 10% de ser alcanzadas por un flujo piroclástico en los 3 modelamientos realizados.
- El corregimiento con mayor probabilidad de ser afectado es el Espino, ya que, en el caso 1 presenta una probabilidad de 8% y para los casos 2 y 3 una probabilidad mayor del 86% de ser alcanzado por un flujo piroclástico proveniente del volcán.
- La vía que comunica al municipio de Túquerres con Tumaco, es la vía que presenta las probabilidades más altas de ser alcanzada por un flujo piroclástico de alrededor del 86% para alturas de colapso mayores a 500m.
- La vía desde Túquerres hacia Santacruz, en especial el corregimiento de Balalaika, queda dentro de una zona con probabilidades desde el 7 al 50 % de ser alcanzada por un flujo piroclástico.
- El método empleado para calcular las probabilidades de que un flujo piroclástico alcance un punto determinado, no tiene en cuenta los obstáculos topográficos que podrían obstruir parcial o totalmente la trayectoria teórica del flujo piroclástico.
- Este modelo solo evalúa la probabilidad de uno de los muchos fenómenos potencialmente peligrosos que se pueden presentar en una erupción del volcán Azufra.
- La principal incertidumbre que tiene el mapa es la altura de colapso de la nube eruptiva, de esta depende el alcance del flujo piroclástico de manera proporcional.

8. RECOMENDACIONES

- utilizar un modelo digital de elevación con una mejor resolución a 30*30 pixeles es recomendable, ya que de esta manera se puede tener una mayor certeza de las variaciones que presenta la topografía y se podría obtener un modelo con una mejor aproximación.
- Realizar una segunda versión del modelo teniendo en cuenta los posibles obstáculos topográficos que puedan cortar las líneas de energía provenientes del cráter, siempre y cuando se cuente con un equipo de cómputo lo suficientemente adecuado para soportar el costo de recursos que implica hacer un análisis punto a punto.
- Se pueden hacer complementos a este estudio, analizando los demás peligros asociados con el volcán como son cenizas, proyectiles balísticos y lahares.
- Se deberá trabajar con un sistema de coordenadas UTM, ya que todo el código se escribió teniendo en cuenta fórmulas que solo funcionan con este sistema.
- La rutina es susceptible a ser mejorada continuamente ya que esta se programó bajo formato GNU, así que es de distribución libre.

BIBLIOGRAFIA

ARANGO, J; PONCE, A. Reseña explicativa del mapa geológico del departamento de Nariño. INGEOMINAS, 40 p. Bogotá, 1980.

CALVACHE, Martha, Comunicación escrita a CORPONARIÑO, 2008.

CENTRO DE MONITOREO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO (CMVS), Ciudad Universitaria UNICACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 2013.

COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPUBLICA, Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., No. 48.411. P. 1-16.

CORDOBA GUERRERO, Gustavo, Conferencia de Flujos Piroclásticos, Apuntes curso de vulcanología, UNAM. 2012.

CORDOBA GUERRERO, Gustavo. Diluteparticle - ladencurrents: dynamics and depositpatterns, thesis PhD, 2007.

CORPONARIÑO - UDENAR, Declaratoria y formulación del plan de manejo del área de conservación volcán Azufral, 2008.

ESPINOSA, Armando. Erupciones Históricas de los volcanes Colombianos (1500-1995), Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2001.

FORTRAINE, E. Evolution pétrologique et géoquimique du volcan Azufral, Colombia, Amerique du USd. Tesis Master, U. Montreal, 215 p. 1994.

GONZALES H. et all. Geología, geomorfología de la plancha 428 Túquerres. INGEOMINAS 155p, Medellín. 2002.

HEIM, Der Bergsturz von Elm, Geol.Gessel. Zietschr 37.74-115.1882.

HSÜ, K.J; Catastrophic debris streams generated by rockfalls, Geological Society American Bulletin 86. P 129-140. 1975.

INGEOMINAS. Catálogo de Volcanes Activos de Colombia. 1989.

INGEOMINAS. Geología y sismología hoyo del río Mira. Etapa 1- estudio regional 101 p. Medellín. 1983.

INGEOMINAS. Mapa de Amenaza Volcánica Galeras (Tercera Versión). Publicación Especial de INGEOMINAS. 1997.

MALIN, M.C. Y SHERIDAN, M.F. Computer assisted mapping of pyroclastic surges. Science, 217:637-640.1982.

MYERS, Bobbie, BRANTLEY, Steven R.,STAUFFER Peter y HENDLEY II, James W.USGS, Types of Volcano Hazards. Fact Sheet 002-97 (edición de junio 1998).

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS), ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS).Los Volcanes y la Protección de la Salud. 87 páginas. 2005.

ROCHA, Arturo, Hidráulica de Tuberías y Canales, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. 1ra edición. 499 páginas. 2002.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, Informe técnico mensual de actividad de los volcánes del sur - noviembre de 2012

SHERIDAN, Michael F y MALIN, Application of computer assisted mapping to volcanic hazard evaluation of surge eruptions: Vulcano, Lipari and Vesuvius.1983.

SHERIDAN, Michael F y MACIAS, José Luis, Estimation of risk probability for gravity-driven pyroclastic flows at volcano Colima, Mexico, 1994.

VELASCO, Gabriel y MARIAN, Piotr, Probabilidad y estadística para Ingeniería y ciencias, 2001.

<http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/introduccion.pdf>

<http://www.cmvs.chiapas.gob.mx/Lahares>

http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AColombia_-_Nari%C3%B1o_-_Mallama.svg

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Nari%C3%B1o_-_Santa_Cruz.svg

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Nari%C3%B1o_-_Sapuyes.svg

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Nari%C3%B1o_-_Tuquerres.svg

http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/52838T7T000.PDF

http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/52720T7T000.PDF

http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/52699T7T000.PDF

http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/52435T7T000.PDF

<http://www.geog.buffalo.edu/ncgia/sara/volumei/pdf>

http://www.ingeminas.gov.co/getattachment/Pasto/Volcanes/Volcan-Azufra/Generalidades/Entorno_geografico_volcan_Azufra.jpg.aspx

<http://www.ingeminas.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Azufra/Red-de-Vigilancia.aspx>,
2012

<http://www.mallama-narino.gov.co/index.shtml>

<http://www.santacruz-narino.gov.co/index.shtm>

<http://www.sapuyes-narino.gov.co/index.shtml>

<http://www.tuquerres-narino.gov.co/index.shtml>