



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de
lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y
código abierto**

Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio
Ambiente

Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, Ph.D.

01 de septiembre de 2020



Urkund AnalysisResult

Analysed Document: Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto.pdf (D77264801)

Submitted: 7/28/2020 9:53:00 PM

Submitted By: ovpadilla@espe.edu.ec

Significance: 1 %

Sources included in the report:

Capítulo 1.docx (D22383401)

<https://www.igepn.edu.ec/servicios/listado-de-articulos-cientificos>

https://www.researchgate.net/publication/279177444_DETERMINACION_DE_PUNTOS_DE_EVACUACION_VERTICAL_Y_HORIZONTAL_EN_CASO_DE_UNA_ERUPCION_DEL_VOLCAN_COTOPAXI_EN_EL_VALLE_DE_LOS_CHILLOS_SANGOLQUI_ECUADOR

publication/279177444_DETERMINACION_DE_PUNTOS_DE_EVACUACION_VERTICAL_Y_HORIZONTAL_EN_CASO_DE_UNA_ERUPCION_DEL_VOLCAN_COTOPAXI_EN_EL_VALLE_DE_LOS_CHILLOS_SANGOLQUI_ECUADOR

Instances where selected sources appear:

3

Firma:
 Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla
 Nombre de reconocimiento (DN):
 cn=Oswaldo Padilla, o=Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ou, email=ovpadi@gmail.com, c=ES
 Fecha: 2020.07.29 15:27:27 -05'00'

Oswaldo
Padilla

PhD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto”** fue realizado por el señor **Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 02 de septiembre de 2020

Firma:

Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, Ph.D.

C. C. 1709776650



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle**, con cédula de ciudadanía n°1723955769, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 01 de septiembre de 2020

Firma

Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle

C.C.: 1723955769



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle**, con cédula de ciudadanía n° 1723955769, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 23 de septiembre de 2020

Firma

Bucheli Valenzuela, Sebastian Marcelle

C.C.: 1723955769

Dedicatoria

Dedico este logro alcanzado en mi vida a quien me permite levantarme cada día para seguir siendo mejor, Jehová, mi Dios, que merece toda la honra de las metas que cumpla en mi vida. Además de mi Madre, mis hermanos, mi tío, mi abuela y mi abuelo (Q.E.P.D.) que me han apoyado incondicionalmente, tanto los están presentes como los que ya están durmiendo en la muerte.

A mi madre Alexandra Valenzuela, que ha estado siempre para levantarme en mis derrotas y todo el tiempo que ha dedicado para hacerme un hombre de bien, que siempre tuvo el valor para llevarme por el buen camino incluso cuando se sintiera desanimada, ha dado más de lo que ha estado en sus manos por mí y por mis hermanos en todos los aspectos de nuestra vida.

A mi abuelo Rodrigo Valenzuela (Q.E.P.D.), mi abuela Nelba Cedeño y a mi tío Ivan Valenzuela, que fueron un pilar fundamental para mi formación académica y fueron mis primeros ejemplos, que se privaron de muchas cosas tal vez por ayudarme a lograr mis metas y que sin ellos fuera imposible que me encuentre este momento en este preciso lugar.

A mis hermanos Diana, Jeremy y Michael, que han sido un apoyo como hermanos mayores, que los respeto y admiro a cada uno por sus diferentes formas de ser y por su gran ayuda en los momentos que lo he requerido. Y a mis hermanos Pamela y Diego que son los menores y son una gran motivación.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente y sus respectivas autoridades por darme la oportunidad de desarrollar una carrera profesional donde he logrado crecer académicamente y desarrollar habilidades que me permiten dar soluciones a los diferentes problemas del mundo.

A mi estimado tutor de tesis, el PhD. Oswaldo Padilla, que con su estudio constante sobre la gestión de riesgos del volcán Cotopaxi, ha abierto la puerta a múltiples investigaciones que van complementándose poco a poco, y que además siempre está abierto a nuevas ideas y a la expectativa de la tecnología que es lo único que podrá llevar al país al desarrollo completo.

Un agradecimiento especial a DLR y a su equipo SUMO, que apoyan el desarrollo de la geografía a través de las diferentes herramientas tecnológicas.

Al ingeniero César Leiva que siempre ha estado disponible para resolver dudas y brindar su apoyo, que tiene una visión tecnológica amplia y que es un gran ejemplo de profesional, tanto en el aspecto ético como académico.

A mi padre Guillermo Bucheli, que ha hecho lo que ha estado a su alcance por apoyar mis estudios.

A mi novia Dasiel Romo, que es una compañera de verdad, con quien sé que puedo contar en todo momento de manera incondicional y que siempre está dispuesta a dar una ayuda a quien lo necesite.

A mis familiares: Daisy Valenzuela, Mauricio Rivadeneira, Johana Rivadeneira, Alejandro Villacís, Edgar Rivadeneira, Wilman Valenzuela, Gerardo Valenzuela, Marco Valenzuela, Santiago Valenzuela, Pilar Bucheli. Que han sido de gran apoyo en esta etapa.

A mis amigos y colegas: Ronny Viera, Sebastián Utreras, Henry Huertas, Wilson Suquillo, Jair Suquillo, Jordan Suquillo, Norman Díaz, Antonio Sarango, Abigaíl García, Alexander Saravia, Christian Pazmiño, Mateo Mejía. Que son excelentes personas y su apoyo me ha sido muy grato.

Índice de Contenido

Simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos, área de influencia de lahares por erupción del volcán Cotopaxi, utilizando herramientas geoinformáticas y código abierto	1
Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Índice de Contenido	9
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	14
Índice de Ecuaciones	16
Resumen	17
Abstract	18
Capítulo I	19
Aspectos Generales	19
Antecedentes	19
Planteamiento de problema	21
Justificación e importancia del problema	21
Área de influencia	23

	10
Objetivos _____	27
Objetivo general _____	27
Objetivos específicos _____	28
Metas _____	28
Capítulo II _____	29
Marco teórico _____	29
Volcán Cotopaxi _____	29
Periodos eruptivos del volcán Cotopaxi _____	29
Riesgos ante una erupción volcánica _____	30
Ceniza volcánica _____	31
Lahar _____	32
Movimiento sísmico _____	33
Índice de Explosividad Volcánica (VEI) _____	33
Evacuación _____	34
Tecnologías de la Información Geográfica _____	34
Cartografía Colaborativa _____	34
Sistema de información geográfica (SIG) _____	35
Análisis de redes _____	36
Algoritmo de Dijkstra _____	38
Matriz de Origen y Destino (O/D) _____	39
Modelo de evacuación ante flujo de lahares (Cantón Rumiñahui) _____	41
Simulación informática _____	42
Simulación informática de tránsito peatonal _____	42
Simulation of Urban MObility (SUMO) _____	43
Python _____	44

	11
CMD (Símbolo del Sistema) _____	44
Editor de texto _____	45
Lenguaje de Marcado Extensible (XML) _____	45
Demanda peatonal _____	45
Capítulo III _____	47
Metodología _____	47
Recolección de datos _____	48
Red vial _____	48
Ortofoto Rumiñahui _____	49
Rutas de evacuación _____	50
Densidad poblacional _____	51
Archivo de red vial _____	52
Agregación de aceras y cruces peatonales a la red vial _____	53
Simulación aleatoria a partir de la aplicación randomTrips.py _____	54
Creación de Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ) _____	56
Creación de la matriz O/D _____	58
Creación de viajes con OD2TRIPS _____	59
Generación de la demanda peatonal _____	60
Simulación en SUMO-GUI _____	61
Generación del archivo de resultados _____	62
Archivo de densidad peatonal _____	63
Mapa de calor _____	64
Capítulo IV _____	71
Resultados _____	71
Obtención de datos _____	71

	12
Simulación _____	71
Archivos de densidad peatonal _____	74
Mapa de calor con la información de densidad peatonal _____	74
Comparación entre mapa de densidad poblacional con mapas de densidad peatonal _____	77
Capítulo V _____	81
Conclusiones y Recomendaciones _____	81
Conclusiones _____	81
Recomendaciones _____	82
Capítulo VI _____	84
Bibliografía _____	84
Anexos _____	89

Índice de Tablas

Tabla 1 Rango y características del índice de explosividad volcánica (VEI) _____ 33

Tabla 2 Tabla de densidad peatonal de las dos simulaciones _____ 74

Índice de Figuras

Figura 1 Población probablemente amenazada _____	20
Figura 2 Ubicación del área de estudio _____	24
Figura 3 Mapa de áreas de inundación por lahares en caso de una eventual erupción del volcán Cotopaxi en la zona del Valle de los Chillos _____	25
Figura 4 Arquitectura de la hacienda Cotopaxipungo _____	26
Figura 5 Gran cascada del Pita _____	27
Figura 6 Cara norte del volcán Cotopaxi _____	29
Figura 7 Peligros de una erupción volcánica _____	31
Figura 8 Tiempos de llegada del lahar a la zona de Sangolquí y San Rafael _____	32
Figura 9 Herramientas de los SIG _____	36
Figura 10 Diferencia entre distancia Euclidiana y distancia de Manhattan _____	37
Figura 11 Ruta de menor costo desde el nodo 1 hacia todos los nodos _____	38
Figura 12 Algoritmo de Dijkstra en Python _____	39
Figura 13 Puntos de evacuación en la red _____	41
Figura 14 Tiempos de evacuación de la población en la zona de riesgo _____	42
Figura 15 Diagrama de la metodología aplicada _____	47
Figura 16 Red vial de la zona de estudio _____	48
Figura 17 Ortofoto de Rumiñahui _____	49
Figura 18 Rutas de evacuación en zona de lahares _____	50
Figura 19 Densidad poblacional del área de estudio _____	51
Figura 20 Agregación de aceras y cruces peatonales a la red vial _____	54
Figura 21 Archivo de configuración para simulación aleatoria en SUMO _____	55
Figura 22 Advertencias de SUMO al ejecutar la simulación aleatoria _____	56
Figura 23 Corrección de conexiones viales en NETEDIT _____	56
Figura 24 Fragmento del archivo TAZ _____	57

	15
Figura 25 TAZ de salida _____	58
Figura 26 Fragmento de la matriz O/D _____	59
Figura 27 Proceso para la generación de viajes _____	60
Figura 28 Archivo de configuración de od2trips _____	60
Figura 29 Archivo de configuración para DUAROUTER _____	61
Figura 30 Elementos que intervienen directamente en la simulación _____	62
Figura 31 Archivo de configuración de SUMO _____	62
Figura 32 Script para transformar XML a CSV _____	63
Figura 33 Script para obtener un archivo de densidad peatonal por segundo _____	64
Figura 34 Modelo cartográfico para la creación de mapa de calor _____	64
Figura 35 Parámetros para QChainage _____	65
Figura 36 Parámetros de la herramienta Buffer _____	66
Figura 37 Parámetros para unir por localización _____	67
Figura 38 Parámetros para transformar polígonos en centroides _____	68
Figura 39 Parámetros para el mapa de calor _____	69
Figura 40 Red vial en NETEDIT (.net.xml) _____	71
Figura 41 Simulación en SUMO _____	72
Figura 42 Peatones que no completan la evacuación _____	73
Figura 43 Mapa de densidad peatonal al final de la evacuación fuera de horario comercial _____	76
Figura 44 Mapa de densidad peatonal al final de la evacuación en horario comercial_	77
Figura 45 Mapa de densidad poblacional vs densidad peatonal fuera de horario comercial _____	78
Figura 46 Mapa de densidad poblacional vs densidad peatonal dentro de horario comercial _____	79

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Definición matemática del Riesgo _____	30
Ecuación 2 Distancia Euclidiana _____	37
Ecuación 3 Distancia de Manhattan _____	37
Ecuación 4 Matriz de Origen y Destino _____	40
Ecuación 5 Ecuación para el periodo en SUMO _____	55
Ecuación 6 Error Mínimo Admisible (EMA) _____	69
Ecuación 7 Unidad Mínima de Resolución (UMR) _____	69

Resumen

Ecuador es uno de los países en la región que se encuentra atravesada por la Cordillera de los Andes, donde los principales problemas son las erupciones volcánicas y todas las consecuencias que puedan causar. Actualmente, el volcán Cotopaxi se ha reactivado y los ingenieros geógrafos y geólogos han concluido que su erupción generaría lahares que sigan el curso de los ríos y destruirían todo en la cuenca baja. Para prevenir la mayor cantidad de pérdidas humanas debido a este problema podemos utilizar herramientas geoinformáticas que permitan analizar y obtener soluciones para estos problemas. El crecimiento de la gestión de riesgos demanda varias herramientas (software) que permitan hallar una solución con el menor contacto posible con el campo. En este contexto, se realizó una simulación peatonal microscópica en SUMO (Simulation of Urban MObility) como una evacuación determinística. La demanda peatonal fue generada con el método DUAROUTER que permite obtener las rutas que los flujos de personas deberían seguir, desde un punto de entrada -que debe estar en la zona de riesgo- hasta un punto de salida que pertenece a la zona segura. Entonces se obtiene una simulación y un archivo de salida que contiene información sobre densidad peatonal. En conclusión, SUMO y Código Abierto son herramientas adecuadas para tomar decisiones, porque con los resultados arrojados por la simulación podemos relacionar la distancia y tiempos de viaje con la capacidad de evacuar.

PALABRAS CLAVE:

- **LAHAR**
- **EVACUACIÓN**
- **SIMULACIÓN PEATONAL**
- **SUMO**
- **CÓDIGO ABIERTO**

Abstract

Ecuador is one of the countries in the region crossed by “La Cordillera de los Andes” and the main problems are volcanic eruptions and all the consequences that they may cause. Actually, Cotopaxi volcano has been reactivated and the geologists and geographers engineers have concluded that the eruption would generate lahars that follow the river’s course and would destroy everything in the lower basin. To prevent the most human losses due to this issue exist geoinformatics tools that allow to analyze and get solutions for this problem. The growth of risk management demands several tools (software) that allow to find a solution with the less field contact. In this context, a microscopic pedestrian simulation was performed in SUMO (Simulation of Urban MObility) as a deterministic evacuation. The pedestrian demand was generated with the DUAROUTER method that allows to obtain the routes that the personflows should follow from a source point -that must be in the risk zone- to a sink point that belongs to the safe zone. Then we get a simulation and an output file that contains information of pedestrian density. In conclusion, SUMO and Open Source are suitable tools for take decisions because with the results of the simulation we can relate the distance and trips time with the capability of evacuate.

KEYWORDS:

- **LAHAR**
- **EVACUATION**
- **PEDESTRIAN SIMULATION**
- **SUMO**
- **OPEN SOURCE**

Capítulo I

Aspectos Generales

Antecedentes

El Ecuador, al encontrarse en una zona de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, es un país de alto riesgo en lo que respecta a peligro volcánico y sísmico (Ortiz Panchi, 2013).

El volcán Cotopaxi es un estratovolcán activo con magmatismo riolítico y andesítico (Hall & Mothes, 2008), que forma parte de la cadena de volcanes en la cordillera de los Andes en Ecuador y tiene una altura de 5897m de altura siendo uno de los volcanes más altos del mundo (Carrillo Gallegos, 2013). El volcán Cotopaxi ha presentado períodos eruptivos de 300 a 3600 años (Hall & Mothes, 2008) y según datos históricos que datan desde 1532, ha tenido sus mayores períodos eruptivos (de tipo andesítico y con flujos piroclásticos y de largos lahares) en: 1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877; estas erupciones han sido cataclísmicas con Índices de explosividad volcánica de 4 (VEI=4), con excepción de la erupción de 1853 (Gaunt et al., 2016).

La reactivación de los volcanes andesíticos cuenta con una fase previa de algunos meses de sismos, emisiones de CO₂ e incluso presentan pequeñas explosiones y emisión de cenizas. Tal fue el caso del volcán Cotopaxi que al estar monitoreado por el Instituto Geofísico se pudo obtener datos de los primeros movimientos en abril de 2015, el aumento de hasta 24000 ton/día de emisiones de CO₂ en agosto de ese mismo año, explosiones y emisiones de ceniza que cubrieron más de 500 Km²; estas mismas explosiones produjeron movimientos sísmicos repetitivos durante varias semanas en agosto, septiembre y octubre del mismo año (Gaunt et al., 2016).

Gaunt, et al. (2016) afirman que una erupción del Cotopaxi, por el análisis textural de su ceniza, no generaría expulsión de rocas a grandes distancias. Pero hay que tomar

en cuenta que la mayor exposición a la que se encuentran las poblaciones cercanas es el flujo de lahares que sigue el curso de los principales drenajes del Cotopaxi; uno de estos drenajes es el Pita – Guayllabamba – Esmeraldas, que se convierte en una vía para los lahares del Cotopaxi en la cuenca norte, donde se encuentra el Valle de los Chillos, entre otras poblaciones (Carrillo Gallegos, 2013).

La Secretaría de Gestión de Riesgos (2015), en su Plan de Contingencia ante una posible erupción del volcán Cotopaxi, cuantificó la vulnerabilidad considerando el crecimiento urbano, donde se determinó que dentro de un área de 913,57 Km², aproximadamente 93.412 (Figura 1) habitantes están expuestos a la amenaza de lahares por erupción del Cotopaxi, siendo Cotopaxi y Pichincha las provincias más afectadas.

Figura 1

Población probablemente amenazada

PROVINCIA	CANTÓN	PARROQUIA	POBLACIÓN	VIVIENDAS	HOGARES	VIVIENDAS COLECTIVAS
COTOPAXI	LATACUNGA	ALAIQUES (ALAIQUEZ)	1673	503	402	0
		GUAITACAMA (GUAYTACAMA)	1581	222	185	1
		JOSEGUANGO BAJO	399	112	80	1
		LATACUNGA	41505	14297	11266	25
		MULALO	1419	413	344	0
		SAN JUAN DE PASTOCALLE	498	149	116	0
		TANICUCHI	1419	449	352	1
	SALCEDO	PANSALEO	834	295	219	0
		SAN MIGUEL	8798	3021	2492	4
Total COTOPAXI			58126	19461	15456	32
NAPO	ARCHIDONA	ARCHIDONA	167	53	37	0
Total NAPO			167	53	37	0
PICHINCHA	MEJIA	MACHACHI	24	15	9	0
		ALANGASI	6315	2077	1755	3
	QUITO	CONOCOTO	4784	1694	1357	4
		CUMBAYA	3927	1353	1097	0
		GUANGOPOLO	306	102	81	0
		TUMBACO	399	121	116	0
		RUMIPAMBA	41	15	11	0
	RUMIÑAHUI	SANGOLQUI	19323	6383	5385	6
		Total PICHINCHA			35119	11760
Total			93412	31274	25304	45

Nota. Recuperado de (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).

Padilla & Bosque (2014) determinaron los puntos de evacuación ante la llegada de los flujos de lahares en determinados tiempos, además generaron simulaciones para modelar posibles evacuaciones y plantearon dos tipos de soluciones: la evacuación horizontal y la evacuación vertical. Dado el caso de que habrá grupos de personas que

no puedan salir a zonas seguras, pues tendrán que realizar evacuaciones hacia las partes altas de los edificios.

Planteamiento de problema

Ante una posible erupción del volcán Cotopaxi con generación de lahares existe un monitoreo continuo, así como la determinación de puntos y rutas de evacuación. Se han realizado simulacros desde su reactivación en 2015 de tipo regional (Maisanche, 2015) y provincial (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2015). No existe una simulación de evacuación peatonal que permita optimizar tiempos dependiendo del día y hora del día. La simulación evacuación de tránsito vehicular ha sido resuelta (Sánchez Carrasco, 2019), pero no se ha tomado en cuenta la evacuación peatonal ni posibles colisiones que provoquen finalmente que el tránsito vehicular derive en un tránsito peatonal.

Justificación e importancia del problema

La erupción de un volcán como el Cotopaxi puede causar gran destrucción, tomando en cuenta que la fusión del hielo genera lahares en sus drenajes, siendo así que se encuentra una relación directa entre la vulnerabilidad y el crecimiento poblacional que se encuentran cerca de ellos (Vera et al., 2019).

El volcán Cotopaxi, tras su reactivación en 2015, ha sido un foco de atención para varios investigadores tanto nacionales como internacionales, contando así con artículos científicos del análisis de emisiones y riesgo geológico (Instituto Geofísico, 2017), publicaciones sobre evacuación y riesgo de parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas (Padilla & Bosque, 2014). Esta información es difundida a través de las instituciones de gestión de riesgo, entre las cuales se tienen: el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias que ha entregado boletines y ha realizado simulacros

junto con el Servicio Integrado de Seguridad (SIS ECU 911) (Servicio Nacional de Gestión de Riesgo y Emergencias, 2019), y también las Fuerzas Armadas (FFAA) que han mostrado su apoyo en estas actividades. A pesar de que estas instituciones han logrado realizar simulacros de hasta ocho horas (Maisanche, 2015), el escenario difiere en gran medida al de una eventualidad como es la erupción de un volcán.

Por estos motivos se han creado distintas plataformas de software de código abierto y demás herramientas geoinformáticas, para poder simular distintos escenarios realizando modificaciones necesarias que permitan generar un escenario lo más real posible y observar las deficiencias y poder mejorar en este caso los tiempos de evacuación. Este es el caso del software de código abierto SUMO (Simulation of Urban MObility), creado para simular el tránsito vehicular pero que puede ser modificado para simular el tránsito peatonal (Krajzewicz et al., 2012), de tal forma que se pueda tener una visión mucho más real de lo que sería una evacuación de la población, en este caso, en el Valle de los Chillos, Sangolquí, tomando en cuenta a su población flotante es de aproximadamente 223.000 (El Telégrafo, 2016).

En la Constitución de la República del Ecuador (2008) vigente, en el título II, artículo 45, se establece que el Estado ecuatoriano reconoce y garantiza el derecho a la vida en todas sus fases. En la Sección novena del citado documento, referida a la Gestión de Riesgo, el Art. 389 indica que es obligación del Estado proteger a la población y a la naturaleza ante los efectos de eventos negativos de cualquier índole mediante medidas estructurales y no estructurales (mitigación, prevención) tendentes a minimizar las condiciones de vulnerabilidad.

En el mismo cuerpo legal, en su Art. 390, indica que la Gestión del Riesgo es responsabilidad de todas las instituciones, acorde con sus capacidades y su ámbito geográfico, sin perjuicio de recibir apoyo de otras con mayor capacidad y diferente

ubicación geográfica, cuando el caso lo requiera. De esta manera se descentraliza la responsabilidad y se agiliza el proceso (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

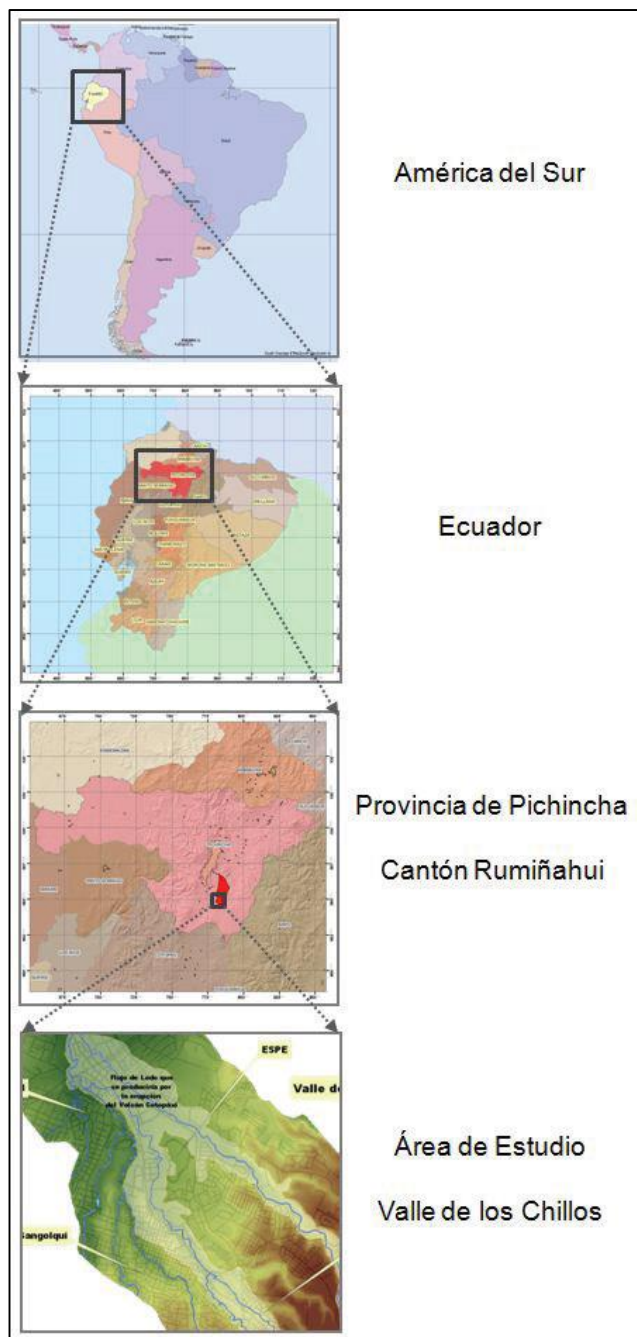
En consecuencia, se vuelve necesario simular la evacuación peatonal en condiciones de caos en el Valle de los Chillos tomando en cuenta el costo de vidas que puede cobrar una posible erupción del Cotopaxi por el efecto de los lahares. El tipo de información resultante de este trabajo de investigación justifica su realización.

Área de influencia

Se encuentra ubicada en el Valle de los Chillos, cantón Rumiñahui, en los lugares que se ven afectados por los lahares producidos por la erupción del volcán Cotopaxi, considerando los sectores cercanos como sitios seguros (Figuras 2 y 3).

El cantón Rumiñahui tiene una superficie de 139 Km² y se ubica en la microcuenca del río San Pedro. El cauce principal es el río Pita que se forma desde las partes altas de los volcanes: Rumiñahui, Cotopaxi y Pasochoa (GADMUR - Dirección de comunicación social, 2018).

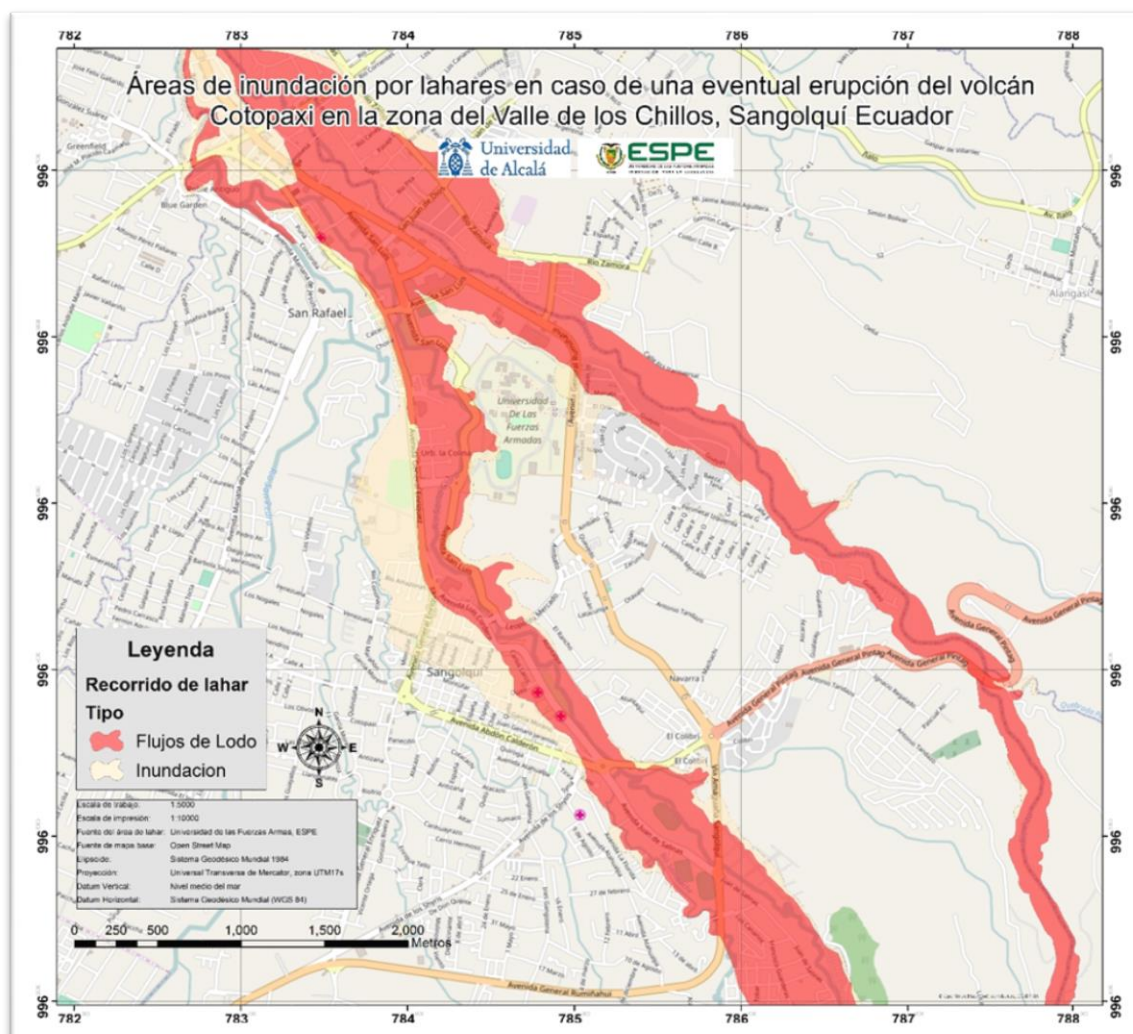
El cantón Rumiñahui está ubicado al sureste de la provincia de Pichincha, está conformada por tres parroquias urbanas y dos parroquias rurales, de las cuales Sangolquí es la capital del cantón, que se encuentra en la zona de mayor afectación, junto con la parroquia de San Rafael, ante los lahares producidos por una erupción del volcán Cotopaxi.

Figura 2*Ubicación del área de estudio*

Nota. Se muestra el área de estudio desde distintas escalas. Fuente: (Padilla & Bosque, 2014).

Figura 3

Mapa de áreas de inundación por lahares en caso de una eventual erupción del volcán Cotopaxi en la zona del Valle de los Chillos



Nota. En rojo se muestra el área afectada por lahares y de mapa base se presentan las calles de una plataforma de cartografía colaborativa. Mapa elaborado por: (Padilla & Bosque, 2014)

Rumiñahui tiene una población de 85.852 habitantes según el último censo de 2010, y su población en horario laboral y académico llega a triplicarse (El Telégrafo, 2016).

El clima de Rumiñahui es subtropical de tierras altas, lo que permite que se dé una alta producción de cierto alimentos, entre ellos el maíz, por lo cual aquí se encuentran varias haciendas y tierras que fueron muy productivas desde tiempos históricos, a tal punto de llegar a ser centro de atención para los colonizadores en su tiempo (GADMUR - Dirección de comunicación social, 2018).

El turismo en el cantón Rumiñahui está sustentado sobre un conjunto de atractivos entre los que se tienen: Haciendas, Arquitectura, Paisajes, Parques y Plazas (ver Figuras 4 y 5). Que le dan al cantón valor cultural, histórico y natural, que es apreciado por quienes visitan estos sitios(GADMUR - Departamento de Turismo, 2017).

Figura 4

Arquitectura de la hacienda Cotopaxipungo



Nota. Fotografía de una de las haciendas de Rumiñahui, es un sitio visitado por turistas.

Fuente: (Encalada, 2018)

Figura 5*Gran cascada del Pita*

Nota. Cascada ubicada en las montañas del cantón Rumiñahui, es una zona turística.

Fuente: (GADMUR - Dirección de comunicación social, 2018)

Objetivos**Objetivo general**

Desarrollar una simulación de la evacuación peatonal en el Valle de los Chillos en la zona propensa a inundación por lahares ante una posible erupción del volcán Cotopaxi, mediante el uso de herramientas geoinformáticas y software de código abierto, para encontrar los mejores tiempos de evacuación en un escenario adverso.

Objetivos específicos

- Generar una geodatabase de la zona de estudio con información estructurada de los elementos a ser tomados en cuenta en la evacuación de distintos escenarios.
- Simular el tránsito peatonal hacia los puntos de evacuación más cercanos en el software de código abierto Simulation of Urban MObility (SUMO).
- Adaptar los datos para modelar dos escenarios: 1) horario comercial y 2) fuera de horario comercial.
- Representar gráficamente la densidad peatonal de la evacuación.

Metas

- Una Geodatabase sobre peatones de la zona de estudio en escenarios de las horas más conflictivas del día.
- Una simulación de evacuación de tránsito peatonal en el software de código abierto SUMO.
- Dos mapas a escala 1:25.000 de la densidad peatonal.
- Un mapa de densidad poblacional.

Capítulo II

Marco teórico

Volcán Cotopaxi

El volcán Cotopaxi (Figura 6) se encuentra en la Cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos (Lat. 0 ° 38' S; Lon. 78 ° 26' O), 60 km al sur de Quito y 35 km al noreste de Latacunga, en la provincia de Cotopaxi. Este volcán activo presenta una altura de 5897 metros y se destaca por: su relieve (2.000–3.000 m), forma cónica, gran extensión (22 km de diámetro) y sus flancos empinados cubiertos de glaciares (Hall & Mothes, 2008).

Figura 6

Cara norte del volcán Cotopaxi



Nota. En la imagen se pueden observar rocas que fueron expulsadas en una erupción del volcán Cotopaxi. Fuente: (Hall & Mothes, 2008)

Periodos eruptivos del volcán Cotopaxi

El volcán Cotopaxi ha presentado periodos eruptivos de 300 a 3600 años (Hall & Mothes, 2008) y según datos históricos que datan desde 1532, ha tenido sus mayores periodos eruptivos (de tipo andesítico y con flujos piroclásticos y de largos lahares) en:

1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877; estas erupciones han sido cataclísmicas con índices de explosividad volcánica de 4 (VEI=4), con excepción de la erupción de 1853 (Gaunt et al., 2016).

Riesgos ante una erupción volcánica

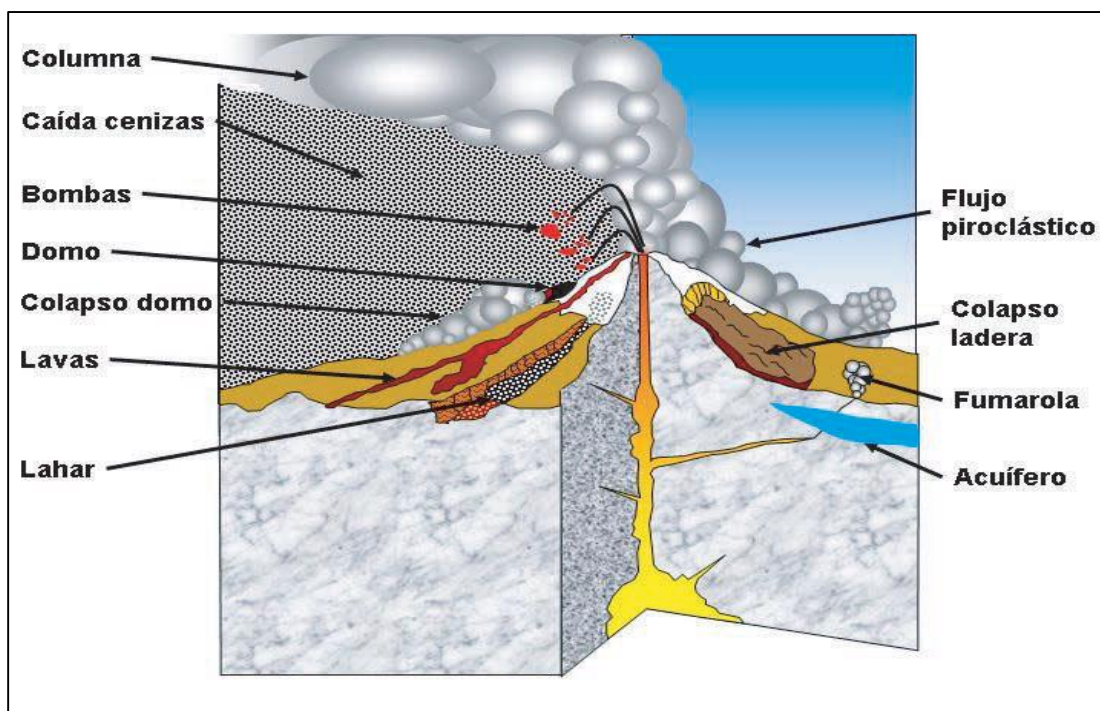
“Riesgo significa el número esperado de vidas perdidas, personas lesionadas, daños a la propiedad y la interrupción de la actividad económica debido a un fenómeno natural particular” (UNDRO, 1979). Por lo tanto, para que haya riesgo deben estar involucradas tanto las personas como infraestructuras, caso contrario no existiría riesgo, y se puede calcular a partir de una función de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición (Ecuación 1) (Llinares et al., 2004):

$$Riesgo = f(\text{Peligrosidad}, \text{Vulnerabilidad}, \text{Exposición}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

La activación de un volcán y su amenaza de erupción generan una serie de riesgos para las poblaciones aledañas. Gaunt et al. (2016) afirman que una erupción del Cotopaxi, por el análisis textural de su ceniza, no vendría provocado por excesivas sobrepresiones lo cual no generaría la expulsión de rocas ni materiales vítreos a grandes distancias, pero hay que tomar en cuenta que la mayor exposición a la que se encuentran las poblaciones cercanas es el flujo de lahares, la caída de cenizas (Figura 7) y movimientos sísmicos.

Figura 7

Peligros de una erupción volcánica



Nota. Se presenta un esquema gráfico de los peligros generales causados por una erupción volcánica. Fuente: (Llinares et al., 2004)

Ceniza volcánica

Corresponden a los piroclastos de menor tamaño (menor a 2mm) (Llinares et al., 2004). Se genera a partir de rocas cuarteadas y debido a su finura son expulsadas por el viento volcánico y pueden llegar a lugares muy alejados del origen (INPI, s.f.).

Tras la reactivación del Cotopaxi y su respectiva monitorización se pudieron obtener datos de emisiones de ceniza que cubrieron más de 500 Km² (Gaunt et al., 2016).

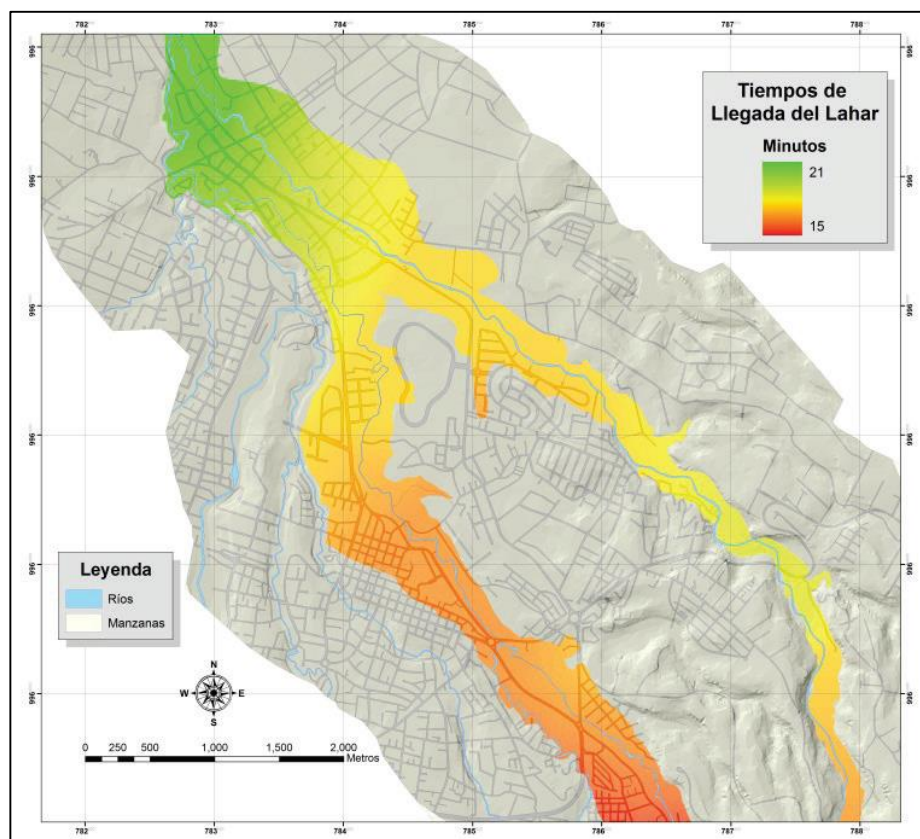
Lahar

Son flujos de materiales volcánicos no consolidados que bajan por los drenajes del volcán al mezclarse con agua y van arrastrando consigo rocas, troncos y demás objetos durante todo su trayecto, el agua puede provenir tanto de aguas lluvias como de la fusión de hielo en el caso de volcanes con nevados, como es el caso del volcán Cotopaxi (Llinares et al., 2004).

Uno de los principales drenajes del volcán Cotopaxi es el Pita – Guayllabamba – Esmeraldas, que se convierte en una vía para los flujos de lodo del Cotopaxi en la cuenca norte, donde se encuentra el Valle de los Chillos (Figura 8), entre otras poblaciones (Carrillo Gallegos, 2013).

Figura 8

Tiempos de Llegada del lahar a la zona de Sangolquí y San Rafael



Nota. Fuente: (Padilla & Bosque, 2014)

Movimiento sísmico

El movimiento de los magmas de un volcán (activo o en proceso de activación), tiene cambios de estado por efecto de las variantes de temperatura y presión, esto produce roturas en la corteza terrestre, provocando así sismo (Van Wyk de Vries & Andrade, 2008).

Índice de Explosividad Volcánica (VEI)

Es una escala de 0 a 8 donde se describe una explosión por el volumen de material emitido y la altura que alcanza la columna de ceniza (altura de la pluma) al momento de la explosión (Llinares et al., 2004).

Tabla 1

Rango y características del índice de explosividad volcánica (VEI)

VEI	Descripción	Altura de la pluma	Volumen	Ejemplo
0	No explosiva	<100 m	1000 m ³	Kilauea
1	Suave	100 – 1000 m	10000 m ³	Stromboli
2	Explosiva	1 – 5 km	0.001 km ³	Galeras
3	Severa	3 – 15 km	0.01 km ³	Ruiz
4	Cataclísmica	10 – 25 km	0.1 km ³	Galunggung
5	Paroxismal	>25 km	1 km ³	St. Helens
6	Colosal	>25 km	10 km ³	Krakatau
7	Súper Colosal	>25 km	100 km ³	Tambora
8	Mega Colosal	>25 km	1000 km ³	Yellowstone

Nota. Además de la clasificación de VEI, en la última columna se muestran ejemplos de cada tipo de explosión. Fuente: (Dosseto et al., 2010).

Evacuación

Se refiere a la acción de desocupar un lugar por situaciones generalmente de emergencia, su objetivo es preservar las vidas humanas y para ser eficaz debe ser: organizada, rápida y oportuna (Hernández, 2018).

Debido a la congestión vehicular pronosticada en un evento de tal magnitud como la de la erupción del volcán Cotopaxi, la evacuación peatonal será la solución para preservar la mayor cantidad de vidas, siempre y cuando haya la gestión para dar a conocer a la población cuales son las vías de evacuación (Maisanche, 2015).

Tecnologías de la Información Geográfica

Son un conjunto de técnicas y herramientas que permiten la recolección de datos georreferenciados, para su posterior análisis, donde el objetivo es hallar soluciones de distintas índoles, teniendo siempre como punto de partida la ubicación espacial de los objetos. Entre algunas de las disciplinas más conocidas en las Tecnologías de la Información Geográfica están: Topografía, Fotogrametría, Teledetección, Cartografía y Sistemas de información geográfica, entre otras (Nieto Masot, n.d.).

Cartografía Colaborativa

Es un proceso de creación de cartografía de manera voluntaria, mediante el ingreso de información de diversos usuarios hacia una plataforma creada con el fin de recolectar la mayor cantidad de datos confiables, este tipo de cartografía es de bajo costo y permite tener resultados de muchos lugares a la vez y en tiempo real (Laconi et al., 2018)

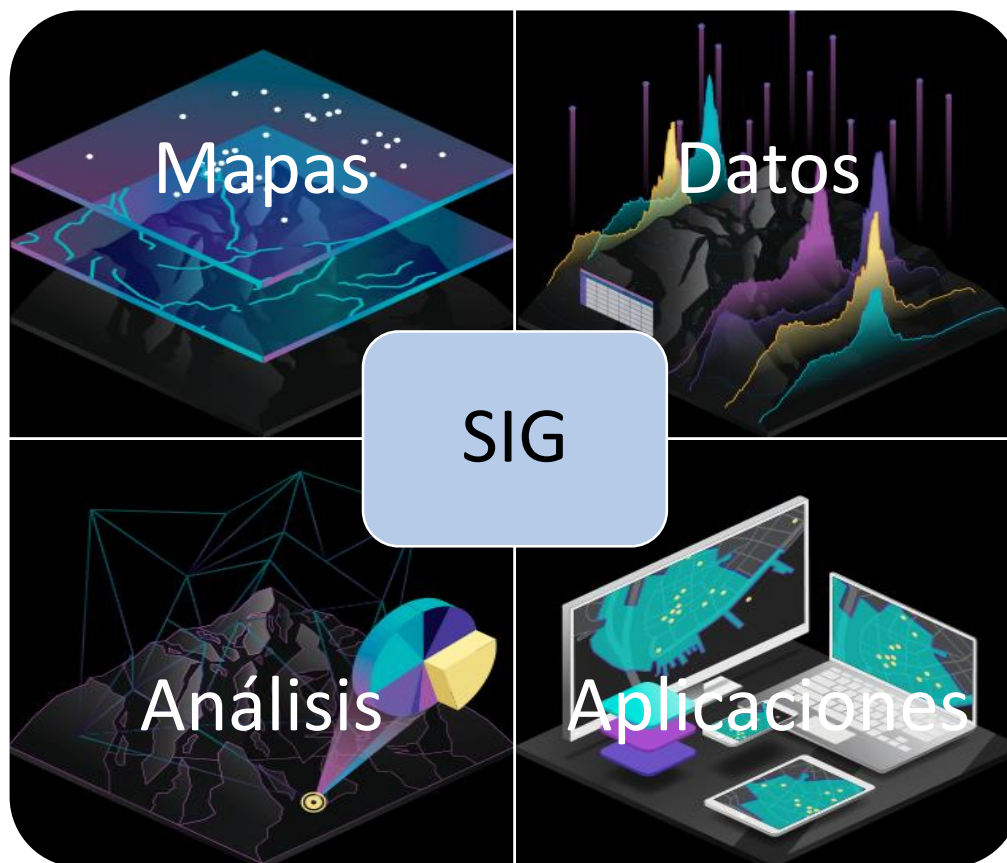
Una de las más grandes plataformas de cartografía colaborativa es OpenStreetMap (OSM), que es una comunidad donde se encuentran liberados datos sobre todos los tipos de vías, cuentan con varias herramientas para verificar la precisión

de sus datos como imágenes satelitales, datos GPS, mapas y otras fuentes libres. Sus datos se pueden usar libremente siempre y cuando se le dé el crédito a OSM (OpenStreetMap, 2020).

Sistema de información geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica es un conjunto de hardware, software y procedimientos que ayudan a manejar, analizar, modelar y representar y visualizar una variedad de datos georreferenciados (ver Figura 9). Los SIG permiten resolver problemas a través de una adecuada gestión y planificación de recursos (Escobar et al., 2011).

Los sistemas de información geográfica han surgido en las últimas décadas como una herramienta esencial para la planificación y gestión urbana y de recursos. Su capacidad para almacenar, recuperar, analizar, modelar y mapear grandes áreas con grandes volúmenes de datos espaciales ha llevado a una proliferación extraordinaria de aplicaciones. Los sistemas de información geográfica ahora se utilizan para la planificación del uso del suelo, la gestión de servicios públicos, el modelado de ecosistemas, la evaluación y planificación del paisaje, la planificación del transporte y la infraestructura, el análisis de mercado, el análisis de impacto visual, la gestión de instalaciones, la evaluación de impuestos, el análisis inmobiliario y tiene una aplicación muy amplia para la gestión de riesgos (Escobar et al., 2011).

Figura 9*Herramientas de los SIG*

Nota. Fuente: (ESRI, 2019)

Análisis de redes

El análisis de redes en los SIG comprende un conjunto de fundamentos matemáticos de topología y teoría de grafos. Se tiene como elementos fundamentales a aristas y vértices, que darán como resultado una red vial, los cuales entrarán en un proceso de análisis para solucionar problemas de la ruta más corta desde un punto de inicio hasta un punto final (Curtin, 2007).

Para el análisis de redes es muy importante tomar en cuenta conceptos de agrupación y medición de distancias, entre las que están (Figura 10): distancia Euclidiana (Ecuación 2) y distancia de Manhattan (Ecuación 3) (Batagelj, 1991).

$$d_E(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n [(x_{ik} - x_{jk})^2 + (x_{ki} - x_{kj})^2]} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$d_M(X_i, X_j) = \sum_{k=1}^n (|x_{ik} - x_{jk}| + |x_{ki} - x_{kj}|) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

X_i, X_j : Son vectores.

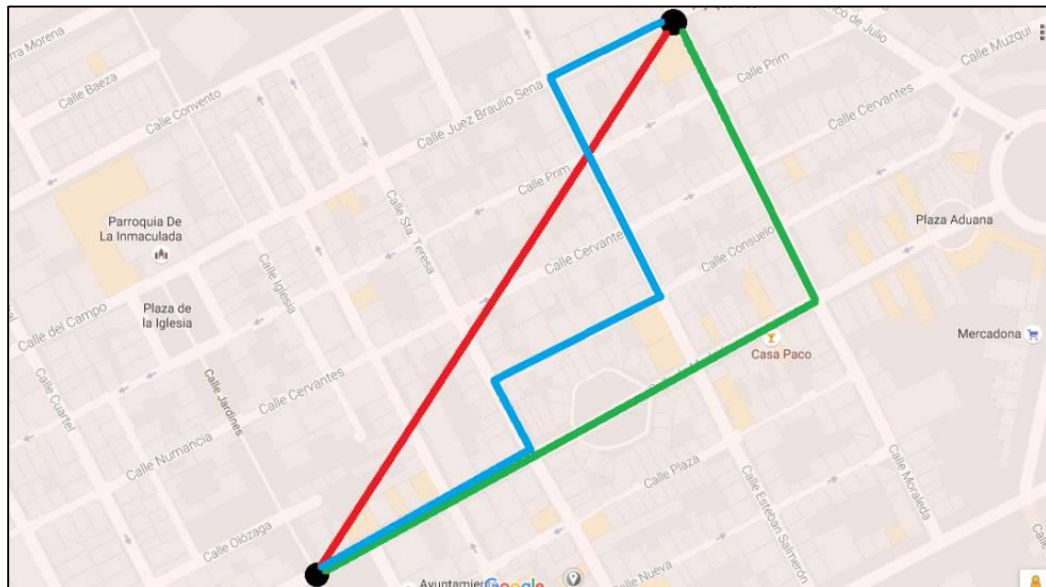
x_{ik}, x_{jk} : Son componentes horizontales de los vectores.

x_{ki}, x_{kj} : Son componentes verticales de los vectores.

n : Es el número total de elementos.

Figura 10

Diferencia entre distancia Euclidiana y distancia de Manhattan



Nota. En rojo se puede observar la distancia Euclidiana entre 2 puntos, mientras que de color verde y celeste se ven dos distintas distancias de Manhattan.

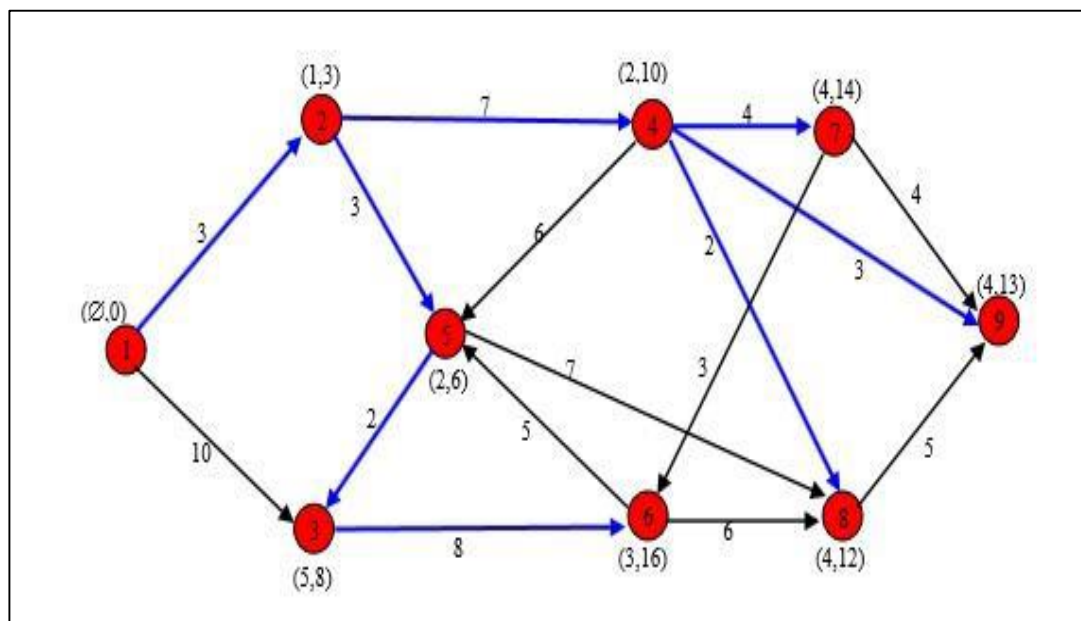
Algoritmo de Dijkstra

Es un algoritmo informático que permite hallar una ruta de menor costo (menor distancia) entre dos nodos en una red. Es muy útil en redes con un gran número de nodos y caminos donde sea necesario comparar varias rutas a la vez para elegir la de menor costo (ver Figura 11), el algoritmo hace todo ese proceso por sí solo (Javaid, 2013).

Por ejemplo, suponiendo que se tiene una red de j vértices, el algoritmo de Dijkstra dará un par de etiquetas (p_j, d_j) , donde p_j es el nodo que precede al nodo j en la ruta más corta desde el primer nodo hasta el nodo j , mientras que d_j es la distancia más corta de esta ruta (Javaid, 2013).

Figura 11

Ruta de menor costo desde el nodo 1 hacia todos los nodos



Nota. Fuente: (Javaid, 2013)

El algoritmo de Dijkstra trasladado a lenguaje de programación de Python tiene la siguiente estructura que vemos en la Figura 12 (Hasan Anick, 2016):

Figura 12

Algoritmo de Dijkstra en Python

```

Dijkstra.py
1  from queue import PriorityQueue
2  def dijkstra(G,src,des):
3      dist=[(268435456)]*len(G) #create dist list & initial with inf value
4      Q=PriorityQueue() #create priority queue
5      dist[src]=0 #source dist is always zero
6      Q.put((0,src)) #push source with zero dist in queue
7      while(Q.empty()!=False): #iterate until queue is empty
8          cost,u=Q.get() #take minimum dist, node & pop up
9          if(u==des):return dist[des] #if destination find from Q, then return result
10         for v,Cost in G[u]: #take all node which is adjacency with u node
11             if(dist[v]>cost+Cost): #if present dist greater than to dist[u]+Cost
12                 dist[v]=cost+Cost #if u to v is minimum then update dist[v]
13                 Q.put((dist[v],v)) #push v into Queue
14         return -1 #return -1 when source to destination isn't reachable
15
16 if __name__=="__main__":
17     Node,Edge=map(int,input().split()) #take input number of Node & Edge
18     Graph=[[[] for i in range(Node+1)] #create 2D list for graph
19     for i in range(0,Edge):
20         u,v,w=map(int,input().split()) #take input u v w
21         Graph[u].append((v,w)) #make u to v adjacency with w weight
22         Graph[v].append((u,w)) #make v to u adjacency with w weight
23     source,destination=map(int,input().split()) #take input source and destination
24     print(dijkstra(Graph, source, destination)) #print shortest path answer

```

Nota. Se muestran 24 líneas de código hechas en Python, las cuales definen una función llamada `dijkstra` sujeta a tres parámetros, que entran en un bucle para realizar las iteraciones de todas las rutas posibles entre 2 puntos, midiendo el costo y finalmente seleccionando la ruta de menor costo. Fuente: (Hasan Anick, 2016)

Matriz de Origen y Destino (O/D)

Es una matriz que permite la distribución de los viajes, donde se establecen puntos de entrada y salida posibles, y además se especifica la demanda peatonal o vehicular

que va a trasladarse de un punto a otro, la matriz de origen y destino viene dada por la fórmula (Ecuación 4) (Bell, 1991):

$$Var\{t_{ij}\} = \frac{(T-N)T}{(N-1)N^2} n_{ij}(N - n_{ij}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

N : Es el número de viajes que intervienen en el punto t_{ij} .

T : Es el número de viajes totales de la red.

Como entrada se debe ingresar un archivo en donde se establecerá el tiempo en el que se generará la demanda de personas, cada celda de la matriz va a contener una arista de entrada y una de salida además del número de peatones en esa zona; es escrita en un editor de texto y tiene la extensión .od. La matriz de origen y destino para ser utilizada en SUMO tiene el siguiente formato (Alvarez Lopez et al., 2018):

```

$O;D2
* Desde-tiempo  Hasta-tiempo
7.00 8.00
* Factor
1.00
* Comentarios
* Adicionales
  *ENTRADA  SALIDA  CANTIDAD
      1      1      1.00
      1      2      2.00
      1      3      3.00

```

- La primera línea es el especificador de formato que debe incluirse textualmente.
- Las líneas que inician con "*" son comentarios, son opcionales.
- La segunda línea que no es comentario, es el rango de tiempo expresado en HORA.MINUTO HORA.MINUTO.
- La siguiente línea es un factor de escala global para el número de peatones de cada celda.
- Las demás líneas describen las celdas de la matriz DESDE HASTA NUMPERSONAS

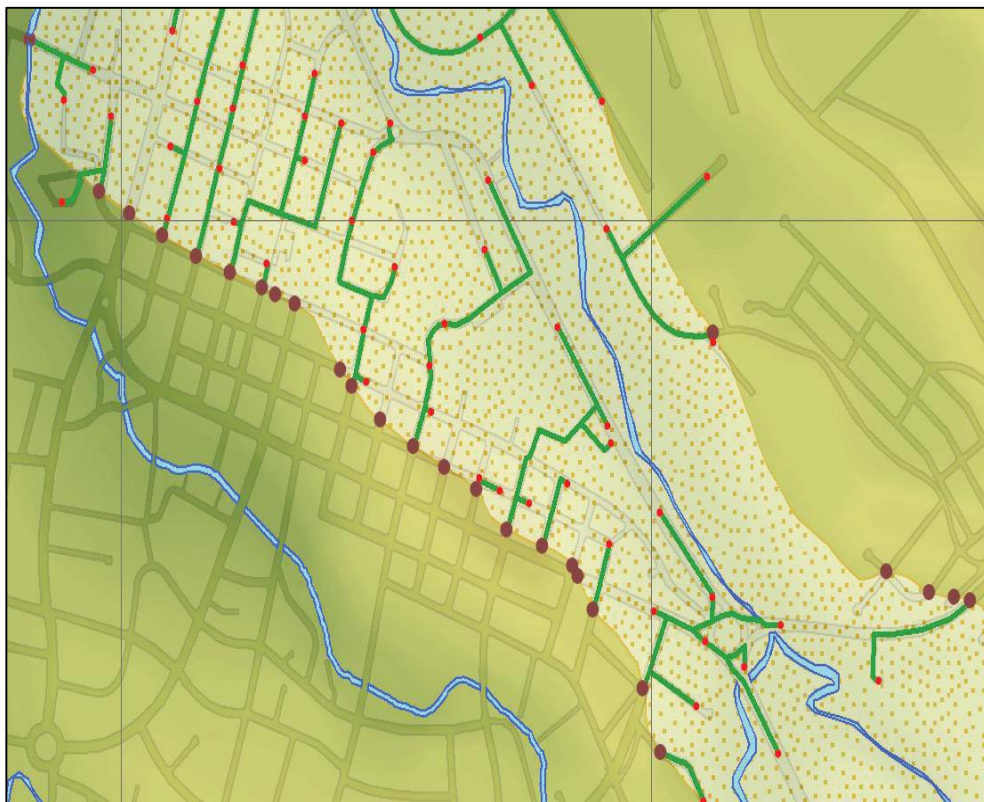
Modelo de evacuación ante flujo de lahares (Cantón Rumiñahui)

Padilla & Bosque (2014), proponen una evacuación de tipo horizontal a través de la red vial, y al analizar los tiempos de evacuación plantean una evacuación de tipo vertical hacia edificaciones altas para quienes se encuentren en lugares donde no resulte la evacuación horizontal. Eso lo realizaron gracias a las herramientas de SIG, donde se pudo realizar un análisis de redes y álgebra de mapas que permitieron obtener rutas óptimas tomando en cuenta factores de distancia, pendiente y características de la vía.

Este modelo está basado en el algoritmo de Dijkstra, que toma las rutas más cortas de acuerdo con las características de la red vial y se obtiene como resultado rutas y tiempos de evacuación (ver Figuras 13 y 14) (Padilla & Bosque, 2014).

Figura 13

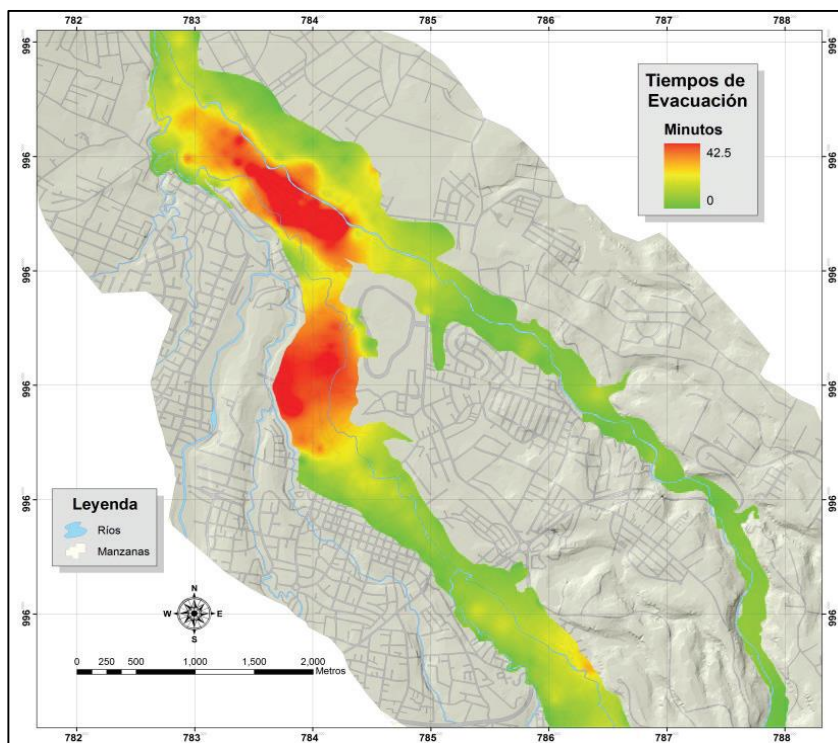
Puntos de evacuación en la red



Nota. Fuente: (Padilla & Bosque, 2014)

Figura 14

Tiempos de evacuación de la población en la zona de riesgo



Nota. Fuente: (Padilla & Bosque, 2014)

Simulación informática

Es una herramienta de trabajo utilizada en ingeniería para probar distintos escenarios cuando no se dispone de un sistema real o resulta muy arriesgado generar un sistema real, por lo tanto, permite obtener resultados sin el contacto directo con dicho sistema (Berlanga Llavori, 2010).

Simulación informática de tránsito peatonal

Son modelos generados por computador que permiten observar el comportamiento individual o colectivo de las personas, con respecto a características que se vayan dando en forma de algoritmos informáticos (Rodríguez & Figueroa, 2015).

Para la simulación informática existe software que tiene funciones específicas para realizar simulaciones tanto vehiculares como peatonales, por lo que no es necesario empezar a programar desde cero una simulación informática (Rodríguez & Figueroa, 2015). Uno de estos software es Simulation of Urban MObility (SUMO) que presenta actualmente su versión 1.2, donde se pueden simular múltiples situaciones, desde un día normal en una ciudad X con un determinado número de habitantes, hasta la contaminación producida por los distintos tipos de vehículos que transiten por una zona (Krajzewicz et al., 2012).

Simulation of Urban MObility (SUMO)

Es un software de código abierto, creado en sus inicios para simular el tránsito vehicular pero desde su versión 1.2 se implementaron módulos de flujos peatonales, lo que permite actualmente simular el tránsito peatonal, SUMO está diseñado para simulación microscópica y multimodal en grandes redes viales (Krajzewicz et al., 2012).

Una simulación microscópica se refiere a que cada vehículo está modelado explícitamente, tiene su propia ruta y se mueve individualmente a través de la red. Las simulaciones son deterministas por defecto, pero hay varias opciones para introducir aleatoriedad con una distribución normal, donde habrá una mayor ocurrencia de eventos de viajes desde un extremo de la red hacia el otro extremo (Krajzewicz et al., 2012).

SUMO-GUI es la interfaz gráfica de SUMO, una vez generado un archivo de configuración que contenga la red vial, las rutas y la demanda peatonal, se guardará como un archivo de extensión .sumocfg que será ejecutado por SUMO-GUI donde se observa la simulación microscópica. NETEDIT es el editor de redes para SUMO y SUMO-GUI. Se pueden graficar redes desde cero o en su defecto modificar redes viales preexistentes, importadas por NETCONVERT (Alvarez Lopez et al., 2018).

SUMO como tal es hecho en Python y C++, pero requiere de varias aplicaciones para realizar distintas tareas como editar, preparar, importar y exportar archivos en los formatos adecuados para realizar la simulación; entre estas aplicaciones están (Krajzewicz et al., 2012):

- CMD (Línea de comandos o símbolo del sistema).
- Editor de texto (Sublime Text v3.2.1 en este caso).

Python

Python es un lenguaje de programación potente con estructuras de datos eficientes de alto nivel y un enfoque efectivo para la programación orientada a objetos. La sintaxis y la escritura dinámica de Python, junto con su interpretación natural, lo convierten en un lenguaje ideal para la creación de scripts y el desarrollo rápido de aplicaciones en muchas áreas en la mayoría de las plataformas (Python Software Foundation, 2020).

CMD (Símbolo del Sistema)

Es el Símbolo del sistema (CMD), permite iniciar programas escribiendo el nombre del programa seguido de las opciones del programa. Dado que esto se puede automatizar, es potencialmente más cómodo para tareas repetitivas que usar una GUI (Interfaz Gráfica de Usuario), se puede ejecutar todas las tareas de transformación, entrada, procesamiento y salida de datos que permitirán generar la simulación, de hecho toda la simulación se la puede realizar con el CMD y obtener los resultados, si es que no se utilizara la GUI que muestra la simulación de forma gráfica, es por eso que se utiliza SUMO o en su defecto SUMO-GUI (Alvarez Lopez et al., 2018).

Editor de texto

Los editores de texto sirven para codificar archivos con un tipo de lenguaje de programación o lenguaje de marcado específico. SUMO requiere la configuración de archivos para su correcta ejecución, estas configuraciones se facilitan mucho con un editor de texto (Alvarez Lopez et al., 2018). Estas configuraciones y archivos necesarios para SUMO están en el formato XML (Lenguaje de Marcado Extensible) y otros llevan la extensión .sumocfg (Alvarez Lopez et al., 2018).

El editor de texto por defecto de Windows es Notepad, pero para el trabajo actual se utilizó Sublime Text v3.2.1 y Notepad++ v7.8.5.

Lenguaje de Marcado Extensible (XML)

Describe una clase de objetos de datos llamados documentos XML y describe parcialmente el comportamiento de los programas informáticos que los procesan (Bray et al., 2008).

Los documentos XML están formados por unidades de almacenamiento llamadas entidades, que contienen datos analizados o no analizados. Los datos analizados están formados por caracteres, algunos de los cuales forman datos de caracteres y algunos de los cuales forman marcado. El marcado codifica una descripción del diseño de almacenamiento del documento y la estructura lógica. XML proporciona un mecanismo para imponer restricciones en el diseño de almacenamiento y la estructura lógica (Bray et al., 2008).

Demanda peatonal

Después de generar una red, se podría ejecutar usando SUMO-GUI, pero ningún elemento estaría en movimiento. Todavía se necesita algún tipo de descripción sobre los elementos (peatones en este caso). Esto se llama la demanda de tránsito. Se utiliza la

siguiente nomenclatura: Un viaje es un movimiento de un elemento de un lugar a otro definido por la arista (calle) inicial, la arista de destino y la hora de salida. Una ruta es un viaje expandido, es decir, que una definición de ruta contiene no solo la primera y la última arista, sino todas las aristas por los que pasará el peatón. SUMO y SUMO-GUI necesitan rutas con aceras y pasos peatonales como entrada para los movimientos del peatón. Hay varias formas de generar rutas para SUMO. La elección depende de los datos de entrada disponibles (Alvarez Lopez et al., 2018).

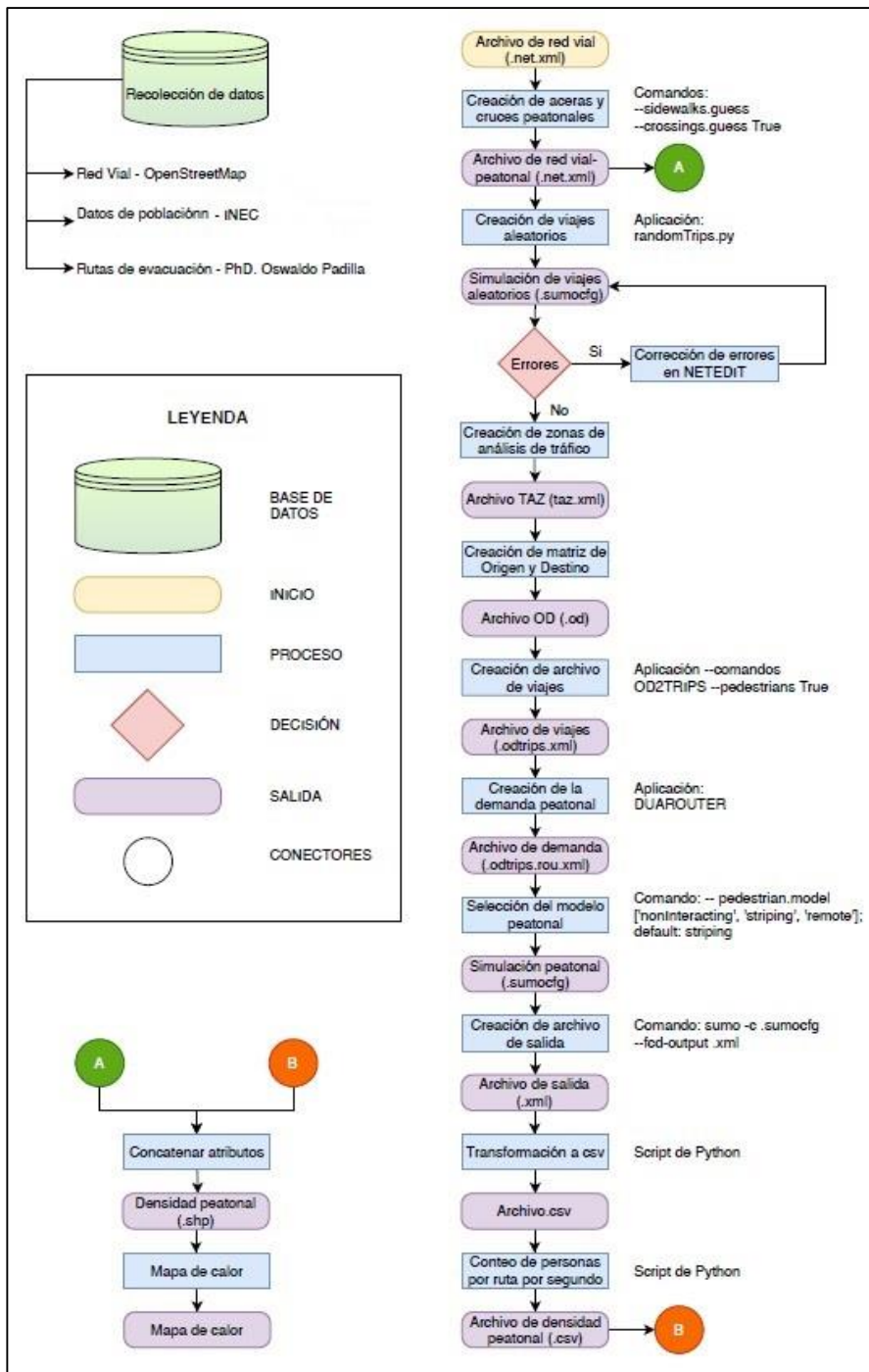
Para un conjunto dado de vehículos con relaciones de origen-destino (viajes), la simulación debe determinar rutas a través de la red (lista de aristas) que se utilizan para llegar al destino desde la arista de origen. El método más simple para encontrar estas rutas es calcular las rutas más cortas o más rápidas a través de la red utilizando un algoritmo de enrutamiento como Dijkstra. Estos algoritmos requieren suposiciones con respecto al tiempo de viaje para cada arista de la red que comúnmente no se conoce antes de ejecutar la simulación debido al hecho de que los tiempos de viaje dependen de la cantidad de vehículos en la red (Alvarez Lopez et al., 2018).

Capítulo III

Metodología

Figura 15

Diagrama de la metodología aplicada



Recolección de datos

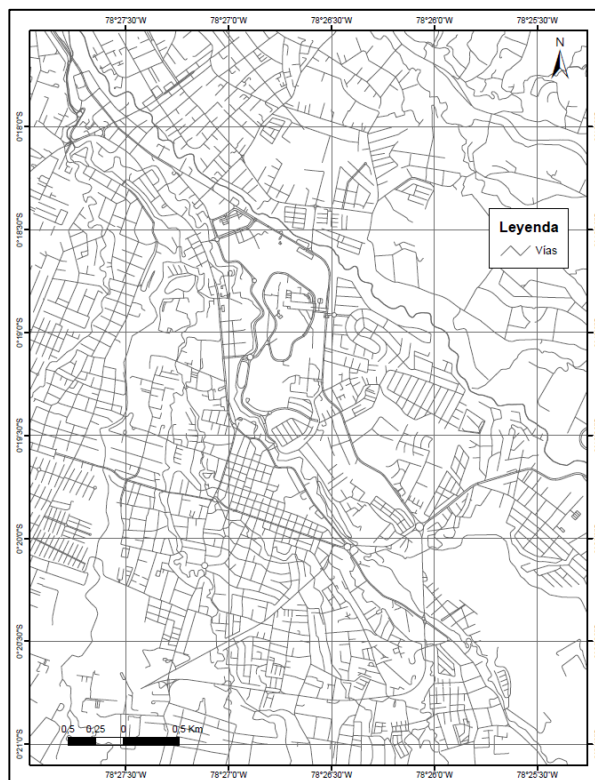
La recolección y limpieza de datos es probablemente la fase que toma la mayor parte del tiempo, es necesario conocer los datos más precisos para modelar de la mejor manera y con la menor cantidad de errores. Para esta parte fue beneficiosa la existencia de datos liberados y de la colaboración de datos que se atienen a derechos de autor.

Red vial

La red vial generada por la cartografía colaborativa de OSM, permite el acceso gratuito a la red vial de la zona de estudio (Figura 16), en la cual se trabajó toda la investigación y análisis.

Figura 16

Red vial de la zona de estudio



Nota. La red vial se tomó de (OpenStreetMap, 2020), y fue exportada a un formato shapefile a través de un SIG.

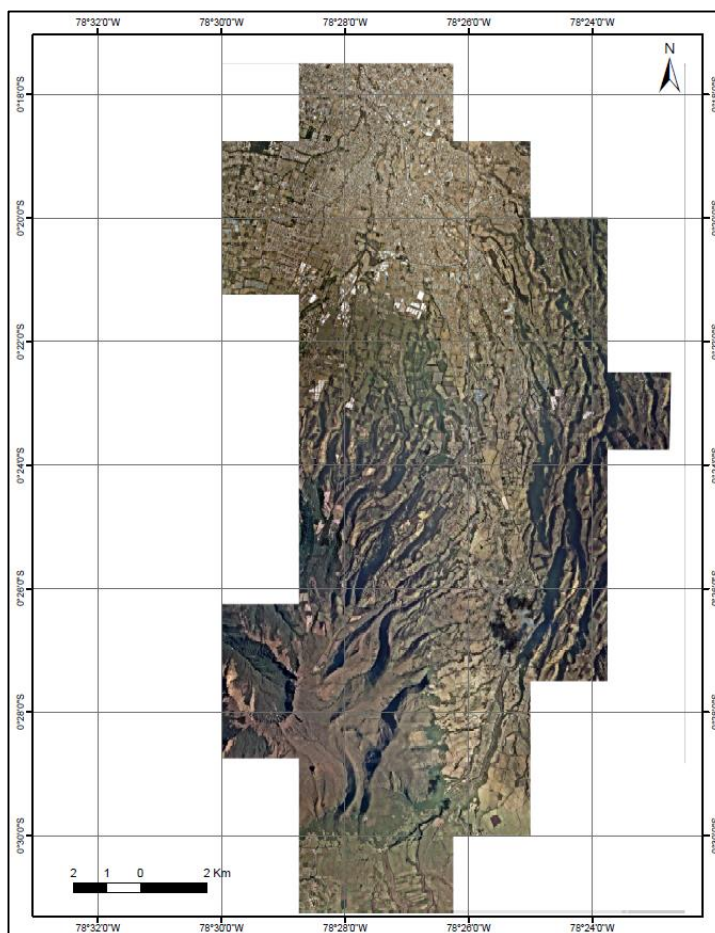
Escala de impresión:	1:25.000
Sistemas de coordenadas geográficas:	WGS 84
Datum:	WGS 84
Meridiano central:	Greenwich

Ortofoto Rumiñahui

La Ortofoto de Rumiñahui se encuentra en los servicios web generados por el Instituto Geográfico Militar y sirve de referencia gráfica para la simulación (Figura 17).

Figura 17

Ortofoto de Rumiñahui



Nota. La imagen es una ortofoto del año 2014 y fue recuperada del WMS del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2014) y se la exportó a formato TIFF mediante un SIG.

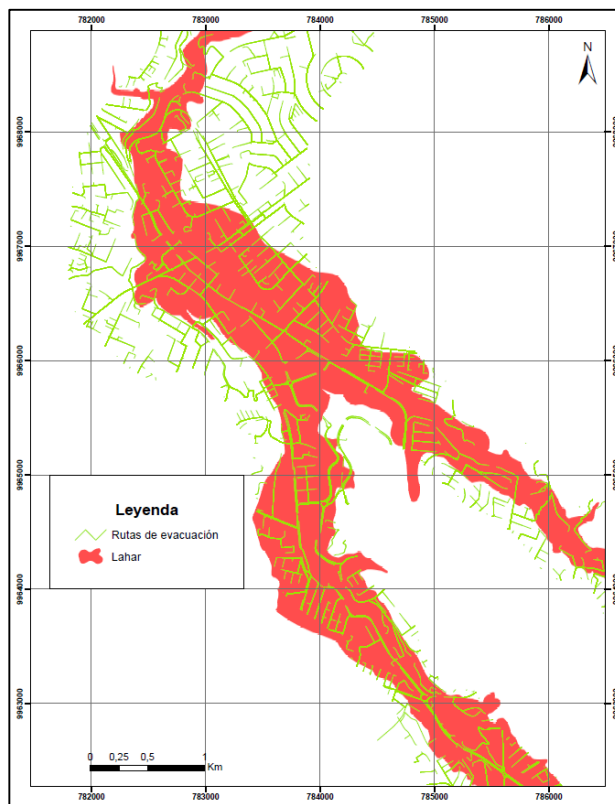
Escala de trabajo:	1:100.000
Sistemas de coordenadas geográficas:	WGS 84
Datum:	WGS 84
Meridiano central:	Greenwich

Rutas de evacuación

Las rutas de evacuación junto con la zona de afectación por lahares fueron obtenidas del estudio de Determinación de puntos de evacuación vertical y horizontal en caso de una erupción del volcán Cotopaxi en el Valle de los Chillos (Padilla & Bosque, 2014).

Figura 18

Rutas de evacuación en zona de lahares



Nota. Recuperado de Determinación de puntos de evacuación vertical y horizontal en caso de una erupción del volcán Cotopaxi en el Valle de los Chillos (Padilla & Bosque, 2014).

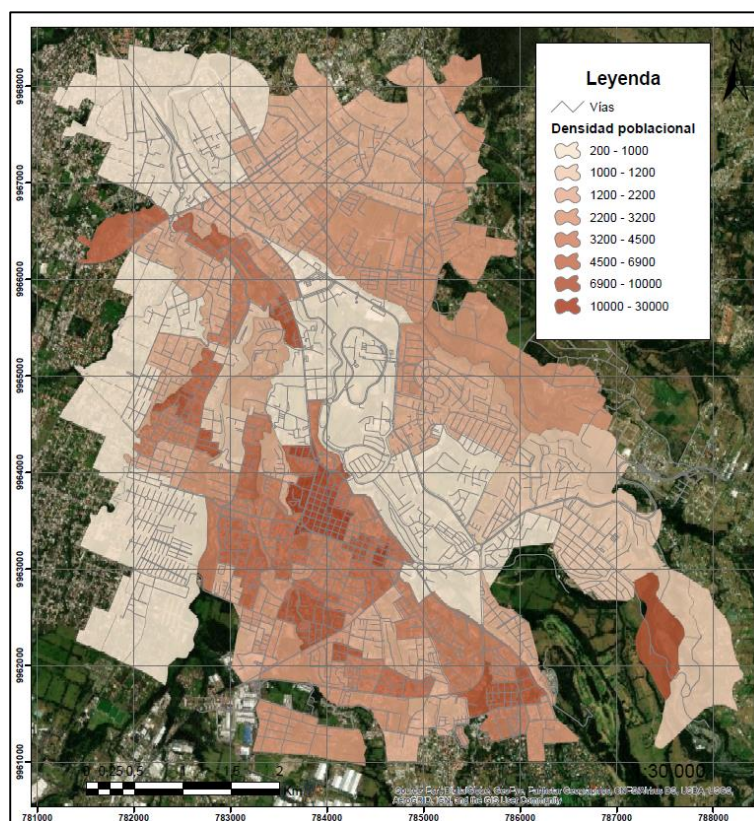
Escala de trabajo:	1:25.000
Elipsoide de referencia:	WGS 84
Proyección:	UTM 17 S
Datum:	WGS 84

Densidad poblacional

Los datos de densidad poblacional fueron estimados por PhD. Oswaldo Padilla con los datos censados por el INEC en 2010 como se observa en la Figura 19.

Figura 19

Densidad poblacional del área de estudio



Nota. El mapa de densidad poblacional fue hecho con los datos del INEC (INEC, 2010).

Escala de trabajo:	1:30.000
Elipsoide de referencia:	WGS 84
Proyección:	UTM 17 S
Datum:	WGS 84

Archivo de red vial

Se procedió con la descarga de archivo de vías desde Open Street Map (OSM) en la página <https://www.openstreetmap.org> y <https://planet.openstreetmap.org/> donde se encuentran las bases de datos actualizadas de vías.

Una vez descargada el área de estudio (archivo con extensión .osm) se debe exportar a un archivo que sea compatible con la plataforma de SUMO, para lo cual se utiliza la herramienta NETCONVERT que viene en el paquete de SUMO, importa redes de vías digitales de diferentes fuentes y genera redes de vías que pueden ser utilizadas para la simulación de SUMO, dando atributos de nodos y aristas que son necesarios para las operaciones en SUMO, algunos de los formatos de los cuales puede importar vías son: XML, OSM (OpenStreetMap), VISUM, Vissim, OpenDRIVE, MATsim, Shapefile (hasta la versión 0.32), Robocup Rescue League y el formato Elmer de DLR (Alvarez Lopez et al., 2018). Se lo utiliza a través de la terminal o línea de comandos (CMD) de la siguiente manera:

```
netconvert --osm-files <ARCHIVO_OSM.osm> -o <ARCHIVO_RED_VIAL.net.xml>1
```

Donde:

--osm-files: Lectura de archivo OSM con extensión .osm.

-o: Archivo de red de salida con extensión .net.xml.

¹ Los nombres de los archivos pueden variar, lo que interesa son las extensiones de los archivos, se pondrán los archivos entre los signos < > de aquí en adelante, estos signos se omiten en la ejecución de los procesos.

Este mismo archivo .osm se debe abrir en QGIS, se exporta como archivo .shp y se hará una edición y modificación continua a la par de lo que se haga en el archivo .net.xml en NETEDIT. Esto con el fin de poder hacer un mapa al final, debido a que no existe una opción para transformar de .net.xml a .shp.

Agregación de aceras y cruces peatonales a la red vial

La red vial existente en OSM no posee aceras ni cruces peatonales, por lo que es necesario generarlas previo a hacer una simulación peatonal (ver Figura 20). NETCONVERT tiene un comando para generar aceras y cruces peatonales:

```
netconvert -s <ARCHIVO_RED_VIAL.net.xml> --sidewalks.guess True --crossings.guess True --walkingareas
```

Donde:

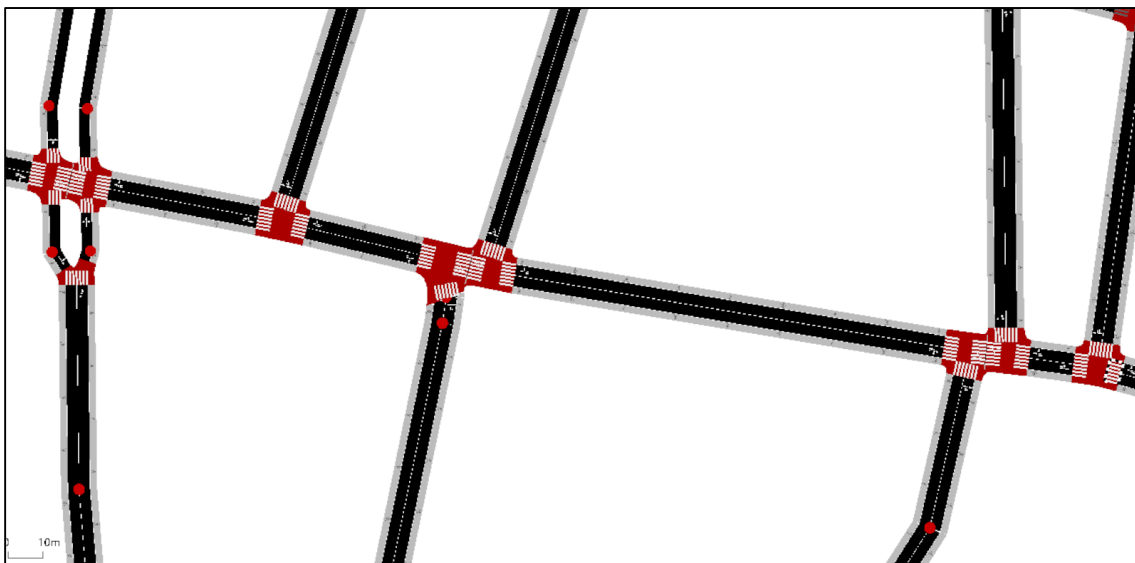
-s: Lectura de un archivo de red vial SUMO de entrada.

--sidewalks.guess True: Es el comando para agregar aceras a la red vial.

--crossings.guess True -- walkingareas: Es el comando para la generación de cruces peatonales.

Figura 20

Agregación de aceras y cruces peatonales a la red vial



Simulación aleatoria a partir de la aplicación randomTrips.py

La simulación aleatoria es un proceso previo a la simulación de evacuación, servirá para hallar posibles errores en la red, donde se produzcan conflictos y no permita el correcto flujo de personas. El comando en el CMD para la simulación aleatoria es el siguiente:

```
python<SUMO_HOME>\tools\randomTrips.py -n <ARCHIVO_RED_VIAL.net.xml> -r  
<RUTAS_ALEATORIAS.rou.xml> --pedestrian -b 0 -e 900 -p 0.09
```

Donde:

<SUMO_HOME>: es la dirección donde se encuentran las herramientas de SUMO.

-n: es el archivo de red de entrada

-r: es el archivo de rutas de salida

-b: es el tiempo de inicio (en segundos)

-e: es el tiempo final (en segundos)

-p: es el periodo con el que salen y llegan los peatones, que depende de: tiempo final, tiempo inicial y número de personas que actúan en la simulación. En la Ecuación 5 se ve la fórmula que se aplica para esta variable (Alvarez Lopez et al., 2018).

$$p = \frac{e-b}{\#peatones} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Una vez generada la demanda peatonal aleatoria, se crea un archivo de configuración de SUMO-GUI (Figura 21), se ejecuta y se procede a analizar las advertencias que genera como se observa en la Figura 22.

Figura 21

Archivo de configuración para simulación aleatoria en SUMO

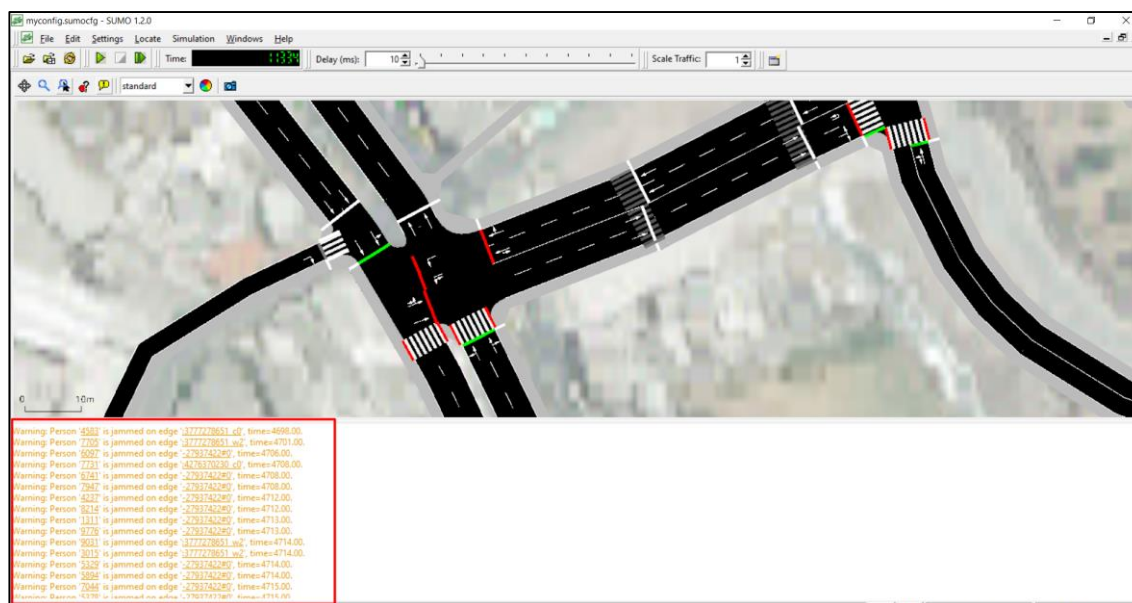
```

1 <configuration>
2
3 <input>
4 <net-file value="ARCHIVO_RED_VIAL.net.xml"/>
5 <route-files value="RUTAS_ALEATORIAS.rou.xml"/>
6 </input>
7
8 <time>
9 <begin value="0"/>
10 <end value="7000"/>
11 </time>
12
13 </configuration>
14
15 Nombre del archivo:Aleatorio.sumocfg

```

Figura 22

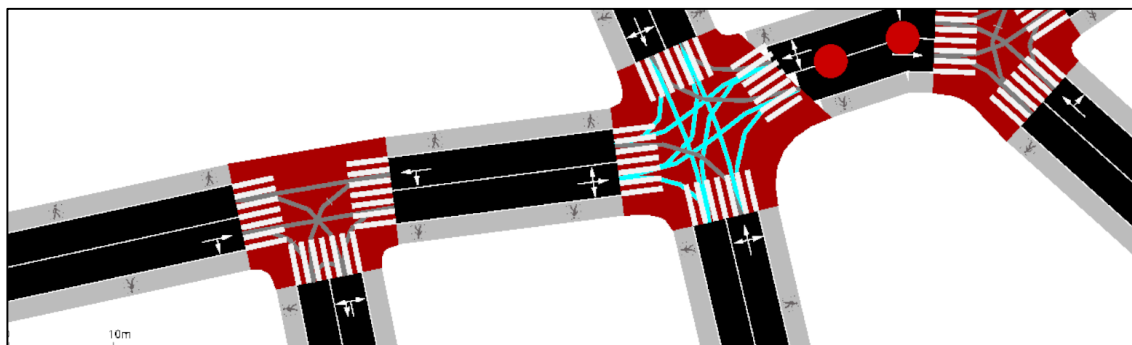
Advertencias de SUMO al ejecutar la simulación aleatoria



Se revisan minuciosamente los errores y advertencias de que genera SUMO y una vez terminada la simulación hay que corregirlas en NETEDIT (ver Figura 23).

Figura 23

Corrección de conexiones viales en NETEDIT



Creación de Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ)

Las zonas de análisis de tráfico no son más que las aristas de entrada y salida que en futuras operaciones generarán la demanda peatonal; se las puede generar manualmente o en NETEDIT como archivos complementarios y tienen la extensión

.taz.xml. El archivo TAZ tiene la siguiente sintaxis (Alvarez Lopez et al., 2018). Tienen la siguiente estructura:

```
<tazs>
```

```
  <taz id="<TAZ_ID>" edges="<EDGE_ID> <EDGE_ID> ..."/>
```

```
  ... más zonas de análisis de tráfico (distritos) ...
```

```
</tazs>
```

Siguiendo con el diagrama de flujo de la metodología propuesta al inicio del capítulo, se deben crear las zonas de análisis de tráfico, para el archivo TAZ se diferenciaron entre los TAZ que serían de origen (prefijo 'source_') y los que serían de salida (prefijo 'sink_') y se les puso comentarios respecto al sector donde se encontraban. Los TAZ de entrada y salida corresponden a las rutas de evacuación del apartado 3.1.3 (ver Figura 25) y vienen dados por el área afectada por el flujo de lahares. Parte del archivo TAZ se muestra en la Figura 24.

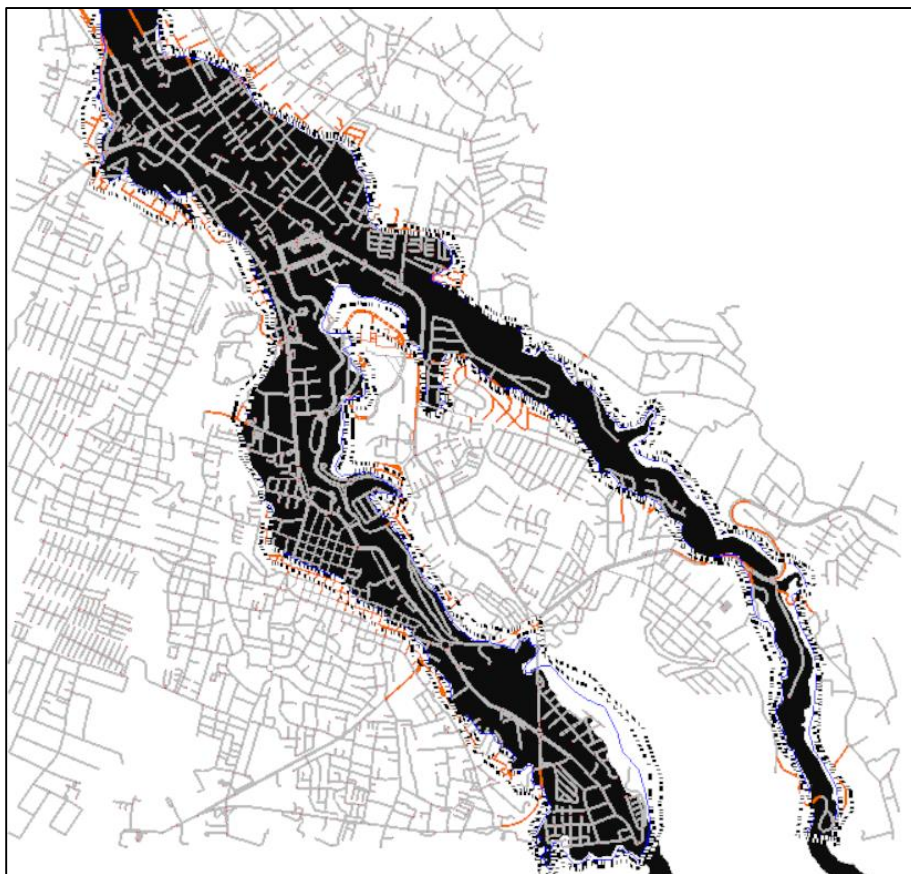
Figura 24

Fragmento del archivo TAZ

```

1 <additional>
2 <tazs>
3
4 *El triángulo
5 <taz id="source_4" edges="-534833576 534833576">
6 </taz>
7 <taz id="source_5" edges="534833592 -534833592">
8 </taz>
9 *Playa Chica
10 <taz id="source_10" edges="429340808#8 -429340808#8 429340808#7 -429340808#7">
11 </taz>
12 .
13 .
14 .
15 <taz id="sink_1" edges="534816636 -534816636">
16 </taz>
17 <taz id="sink_2" edges="24405485#0 534813898">
18 </taz>
19 <taz id="sink_3" edges="-422333305#2 422333305#2">
20 </taz>
21 .
22 .
23 .
24 </configuration>
25 Nombre del archivo:TAZ.taz.xml

```

Figura 25*TAZ de salida*

Nota. Captura de pantalla de proceso de generación de TAZ en NETEDIT. De color naranja se ven las zonas de análisis de tráfico de salida, los TAZ de entrada están dentro de la zona de peligro (lahares de color negro).

Creación de la matriz O/D

Para la creación de la matriz O/D se utilizaron los TAZ generados en el proceso anterior y además se digita el número de peatones según las densidades y distribuciones poblacionales que se obtuvieron en el proceso de recolección de información (ver Figura 26).

Figura 26

Fragmento de la matriz O/D

```

1 $O:D2
2 * From-Time To-Time
3 0.00 0.02
4 * Factor
5 1.00
6 *
7 * some
8 * additional
9 * comments
10
11 source_1 sink_1 100
12 source_2 sink_2 100
13 source_3 sink_3 100
14 .
15 .
16 .
17 source_34 sink_34 200
18 source_35 sink_35 200
19 source_36 sink_36 200
20
21 Nombre del archivo:OD.od

```

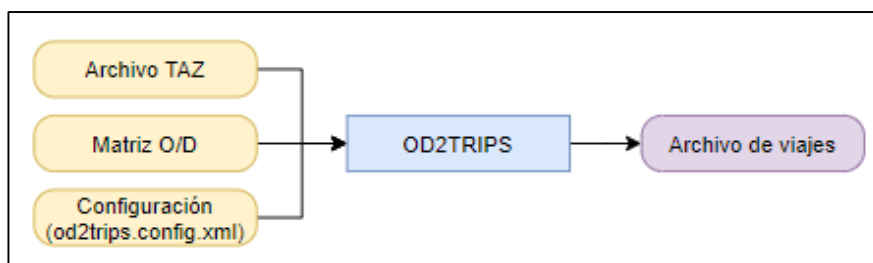
Creación de viajes con OD2TRIPS

OD2TRIPS genera viajes individuales para cada persona a partir de la matriz O/D, asigna el tráfico que se define a través de las zonas de origen y destino en las aristas de una red (ver Figura 27); este archivo de extensión .odtrips.xml es la entrada para el DUAROUTER que finalmente generará las rutas para cada individuo (Alvarez Lopez et al., 2018).

Para una correcta simulación es necesario crear todos los viajes posibles que pueden tener los peatones, y en este caso esos viajes serán dados por la matriz de origen y destino junto con los TAZ, que pasarán a ser los insumos para ser procesados con la aplicación OD2TRIPS y darán como resultado el archivo de viajes. En la Figura 28 tenemos el archivo de configuración para od2trips.

Figura 27

Proceso para la generación de viajes

**Figura 28**

Archivo de configuración de od2trips

```

1 <configuration>
2
3 <input>
4 <taz-files value="TAZ.taz.xml"/>
5 <od-matrix-files value="OD.od"/>
6 </input>
7
8 <!--
9 <output>
10 <output-file value="od_file.odtrips.xml"/>
11 </output>
12 -->
13
14 </configuration>
15
16 Nombre del archivo:od2trips.config.xml
  
```

Generación de la demanda peatonal

La demanda peatonal va a dividir los viajes, que están configurados de forma grupal según el número de personas que estaban en la matriz O/D, en rutas individuales, de tal manera que cada peatón que se encuentre en la red va a tener su propia ruta y tiempo de salida. Para generar la demanda peatonal se utilizó la aplicación DUAROUTER que necesita un archivo de configuración de entrada (Figura 29) y se ejecuta con el siguiente comando en el CMD:

```
duarouter -c duarcfg_file.trips2routes.duarcfg
```

DUAROUTER importa diferentes definiciones de demanda, calcula rutas de vehículos y/o peatones utilizando la definición de la ruta más corta mediante el algoritmo de Dijkstra. Como archivo de salida va a dar un archivo de rutas .rou.xml con su respectiva demanda peatonal (Alvarez Lopez et al., 2018).

Para obtener las rutas en DUAROUTER se necesita generar los siguientes archivos: 1) Archivo de Zonas de Análisis de Tráfico, 2) Matriz de Origen y Destino y 3) Archivo de viajes mediante OD2TRIPS (Alvarez Lopez et al., 2018).

Figura 29

Archivo de configuración para DUAROUTER

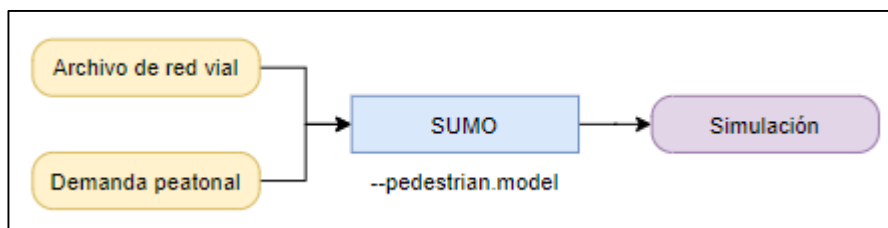
```
1 <configuration>
2
3 <input>
4 <net-file value="net2.net.xml"/>
5 <route-files value="od_file.odtrips.xml"/>
6 </input>
7
8 <output>
9 <output-file value="od_route_file.odtrips.rou.xml"/>
10 </output>
11
12 <report>
13 <xml-validation value="never"/>
14 <no-step-log value="true"/>
15 </report>
16
17 </configuration>
18
19 Nombre del archivo:duarcfg_file.trips2routes.duarcfg
```

Simulación en SUMO-GUI

La simulación microscópica permitirá observar los lugares y tiempos de salida y llegada de cada peatón, y todo esto se puede observar en SUMO-GUI. Para configurar la simulación peatonal se debe crear el archivo de configuración de SUMO, donde están detallados todos los elementos que participarán en la simulación microscópica (Figuras 30 y 31), este archivo se ejecutará por defecto con SUMO-GUI.

Figura 30

Elementos que intervienen directamente en la simulación

**Figura 31**

Archivo de configuración de SUMO

```

1 <configuration>
2
3 <input>
4 <net-file value="ARCHIVO_RED_VIAL.net.xml"/>
5 <route-files value="od_route_file.odtrips.rou.xml"/>
6 </input>
7
8 <time>
9 <begin value="0"/>
10 <end value="1200"/>
11 </time>
12
13 <processing>
14 <pedestrian.model value="striping"/>
15 </processing>
16
17 </configuration>
18
19 Nombre del archivo: SIMULACION.sumocfg
20

```

Generación del archivo de resultados

El archivo de salida de SUMO dio como resultado la posición de cada persona en periodos de tiempo de 1 segundo. Este archivo tiene una extensión .xml, por lo cual se lo transformó en un archivo de extensión .csv para poderlo manejar con los datos de la tabla de atributos de la red vial en formato .shp y poder representar en un mapa. Para esta transformación se creó un script en Python (ver Figura 32), el código en un archivo ejecutable por Python se encuentra en el Anexo 7.

Figura 32

Script para transformar XML a CSV

```
1 import pandas as pd
2 import xml.etree.ElementTree as ET
3 import io
4
5 def iter_docs(archivo):
6     """Transforma un archivo xml a diccionario."""
7     archivo_attr = archivo.attrib
8     for doc in archivo.iter('person'):
9         doc_dict = archivo_attr.copy()
10        doc_dict.update(doc.attrib)
11        yield doc_dict
12
13 xml_data = open('ARCHIVO_SALIDA.xml', 'r', encoding="utf-8")
14
15 etree = ET.parse(xml_data)
16 doc_df = pd.DataFrame(list(iter_docs(etree.getroot()))))
17
18 doc_df.to_csv('ARCHIVO_SALIDA.csv')
```

Nota. Se muestra un script, con sus respectivos comentarios para su mejor ejecución y entendimiento del código, está creado en lenguaje de programación de Python.

Archivo de densidad peatonal

Una vez obtenido el archivo con extensión .csv, se realiza el conteo de cuántas personas utilizaron determinada ruta por segundo. A este archivo se le denominó archivo de densidad peatonal. Para generar este archivo se creó un script en Python (ver Figura 33), el archivo ejecutable por Python se encuentra en el Anexo 8.

Figura 33

Script para obtener un archivo de densidad peatonal por segundo

```

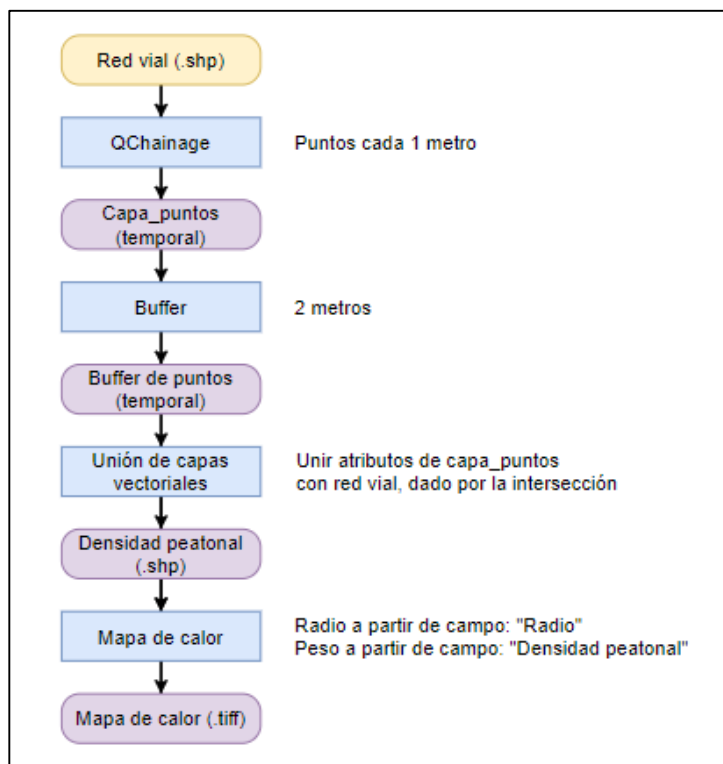
1  import pandas as pd
2  import numpy as np
3
4  df=pd.read_csv('ARCHIVO_SALIDA.csv')
5  df.sort_values("edge", inplace = True)
6  df['unido'] = df['edge'] + '_' + df['id'].astype(str)
7  df = df.drop_duplicates(subset='unido', keep='first')
8  final_df = df.set_index(["edge", "id"]).count(level="edge")
9  final_df.sort_values("unido", inplace=True)
10 final_df = final_df.drop(columns='Unnamed: 0')
11 final_df.to_csv('DENSIDAD_PEATONAL.csv')
12

```

Mapa de calor

Figura 34

Modelo cartográfico para la creación de mapa de calor



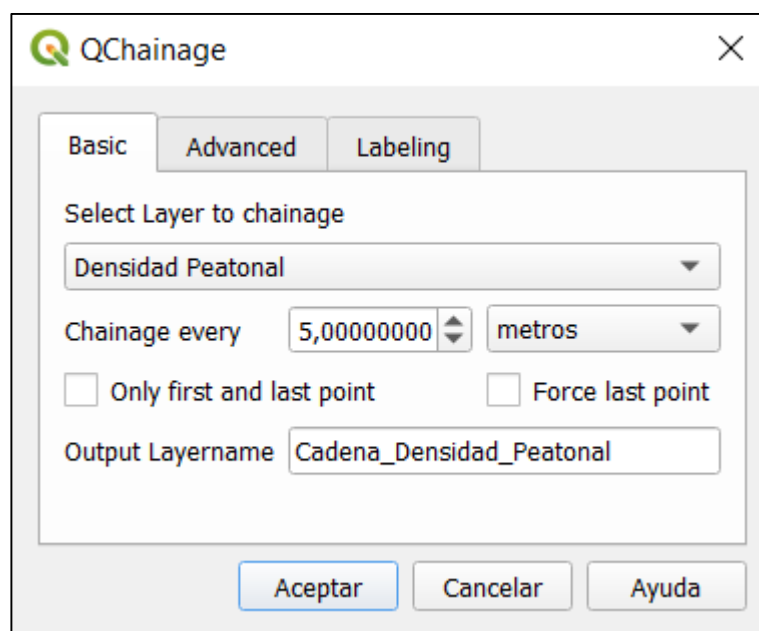
Una vez obtenida la densidad peatonal, se utilizó la red vial para concatenar los datos y así se enlaza el archivo gráfico con los atributos de densidad peatonal. Este proceso se realizó en QGIS (ver Figura 34).

Para poder tener un resultado visual de estos datos, se procedió a hacer un mapa de calor con la densidad peatonal:

Se transformaron las líneas en puntos con el plugin QChainage (ver Figura 35), esto es debido a que el mapa de calor requiere de puntos, no puede trabajar correctamente con líneas. Esta capa creada no tiene los atributos de la capa de entrada.

Figura 35

Parámetros para QChainage

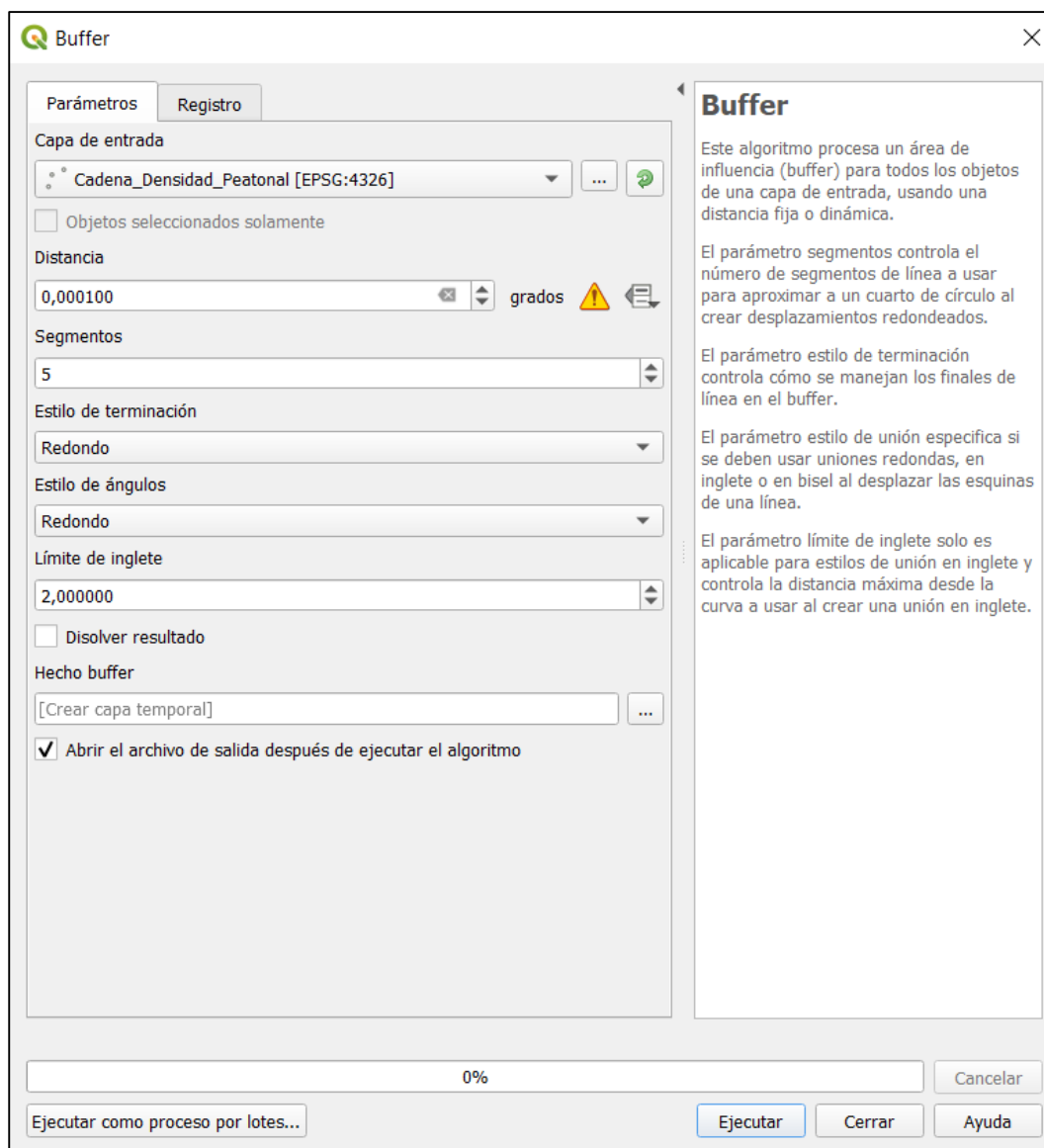


Nota Para utilizar el plugin QChainage se debe tomar como capa de entrada la capa de líneas de red vial que tiene los parámetros de densidad peatonal, y colocamos el valor de 5 metros que es la distancia que estarán separados los puntos, el archivo de salida será una capa temporal llamada 'Cadena_Densidad_Peatonal'. Si el plugin QChainage está instalado se encuentra en: *Vectorial > QChainage > QChainage*.

Se hizo un buffer de estos puntos que representan toda la red vial a lo largo del área de estudio, el proceso está en la Figura 36.

Figura 36

Parámetros de la herramienta Buffer

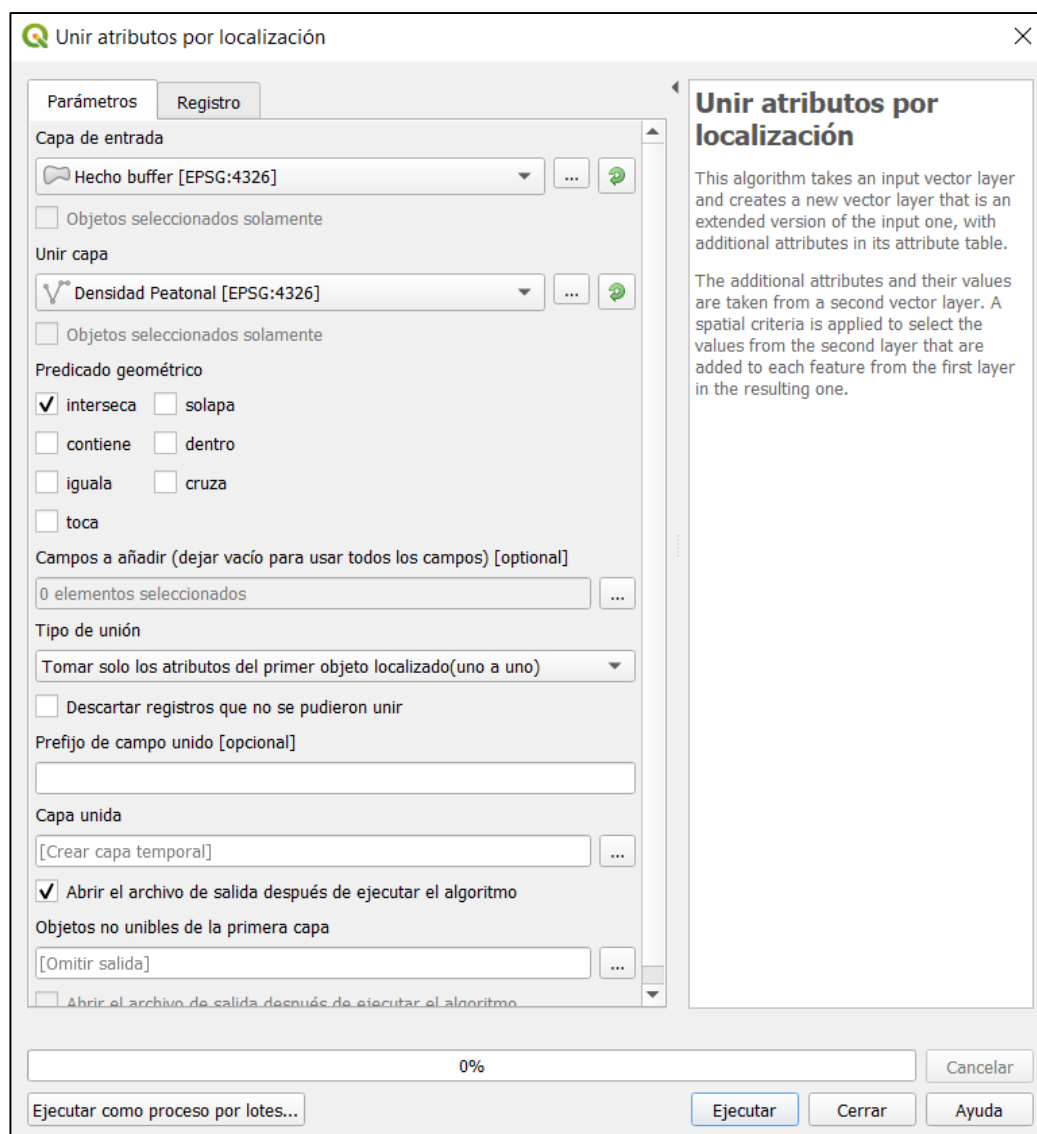


Nota Ingresa la capa de puntos 'Cadena_Densidad_Peatonal' y se le indica que debe construir un buffer alrededor de cada punto, la capa de salida será una capa temporal llamada 'Hecho Buffer'. La herramienta de buffer la encontramos en: *Vectorial > Herramientas de geoprocso > Buffer*.

Se hizo una unión de capas por localización como se muestra en la Figura 37, para que el buffer tome los atributos de la red vial.

Figura 37

Parámetros para unir por localización



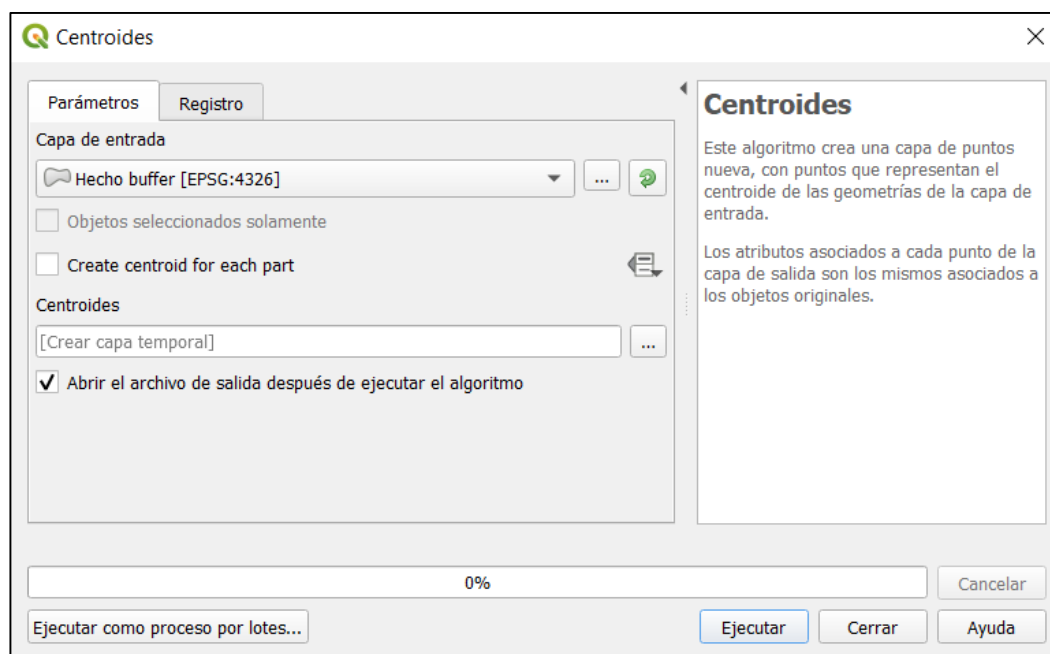
Nota Como entrada ponemos la capa de buffer y unimos los atributos de la capa que contiene la densidad peatonal, estas capas solo unirán los atributos entre los objetos que se intersecan. El archivo de salida será una capa temporal llamada 'Capa unida'. Esta

herramienta se encuentra en: *Vectorial > Herramienta de gestión de datos > Unir atributos por localización*.

Se transformó el buffer con atributos de densidad peatonal en puntos a través de la herramienta centroides (ver Figura 38), de esta manera se obtienen puntos con los atributos de la red vial, donde principalmente interesa la densidad peatonal (número de personas por vía).

Figura 38

Parámetros para transformar polígonos en centroides



Nota Se crean centroides a partir de la capa 'Capa unida' que será la capa de entrada. El resultado es una capa temporal llamada 'Centroides'. La herramienta centroides se encuentra en: *Vectorial > Herramientas de geometría > Centroides*.

Finalmente se utilizó la herramienta "Mapa de Calor" para crear un ráster donde se diferencie visualmente los lugares donde fue mayor la densidad peatonal, este dato es fundamental para ubicarlo en el campo de pesos del mapa de calor (ver Figura 39). El tamaño del pixel viene dado por (Arias Suárez et al., 2007):

$$EMA = 0.2mm * F_E \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$UMR = \frac{EMA}{2} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

EMA: Error Mínimo Admisible.

F_E: Factor de Escala.

UMR: Unidad mínima de resolución necesaria o tamaño del pixel.

Figura 39

Parámetros para el mapa de calor

Mapa de calor (Estimación de Densidad de Núcleo)

Parámetros Registro

Capa de puntos
Centroides [EPSG:32717]

Objetos seleccionados solamente

Radio
25,000000 metros

Output raster size
Filas: 2889 Columnas: 2527
Tamaño X de píxel: 2,500000 Tamaño Y de píxel: 2,500000

▼ Parámetros avanzados

Radio a partir de campo [optional]
123 radios

Weight from field [optional]
123 edge_count

Kernel shape
Cuártico

Decay ratio (Triangular kernels only) [opcional]
0,000000

Output value scaling
En bruto

Heatmap
[Guardar en archivo temporal]

Abrir el archivo de salida después de ejecutar el algoritmo

0%

Ejecutar como proceso por lotes... Ejecutar Cerrar Ayuda

Nota. Se toma como capa de entrada a los centroides y se les da un radio de hasta 25 metros que depende del peso que está en función de la densidad peatonal (edge_count).

La capa de salida será un raster llamado 'Heatmap'. Esta herramienta se encuentra en:

Caja de herramientas de procesos > Interpolación > Mapa de calor ().

Capítulo IV

Resultados

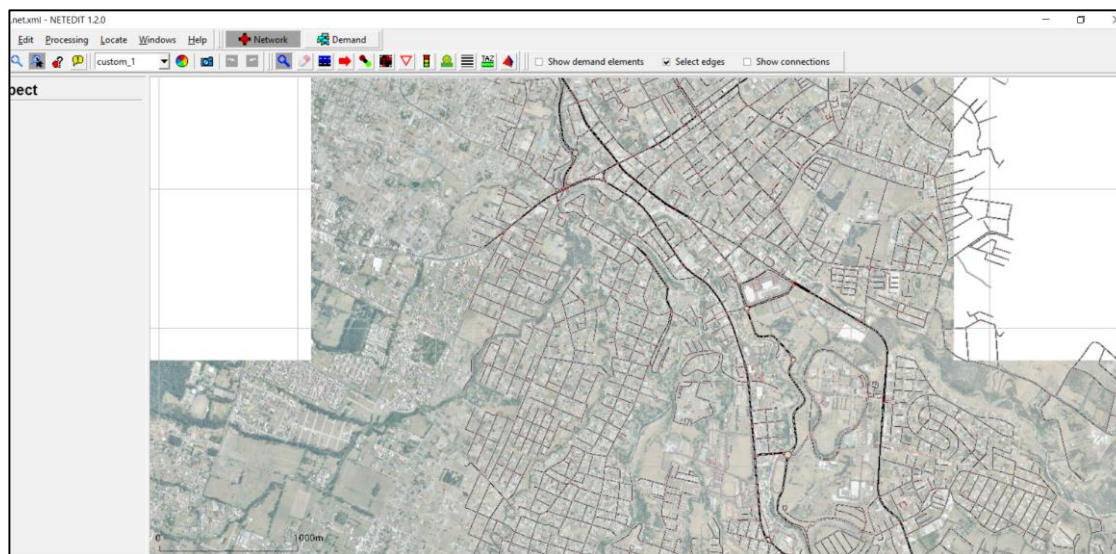
Obtención de datos

A partir de los datos que se obtuvieron al inicio, tanto datos libres como datos brindados para el desarrollo de este estudio, se pudieron generar los siguientes mapas y figuras de inicio, en los cuales se va a poner el fundamento para el desenvolvimiento de todo el trabajo.

En primer lugar, está la red vial de OSM, que fue convertida a través de NETCONVERT en una red con formato XML, que permitirá su modificación en NETEDIT (Figura 40).

Figura 40

Red vial en NETEDIT (.net.xml)



Simulación

Se realizaron dos simulaciones, la primera con los datos de densidad poblacional presentados en la obtención de datos, y la segunda simulación se aumentó la cantidad

de peatones en las zonas comerciales, que son en su mayoría: el Triángulo, San Luis y centro de Sangolquí.

En la Figura 41, en color rojo se ve a los peatones utilizando las rutas de evacuación, se ven los flujos peatonales que interactúan (modelo 'striping'), produciéndose así una simulación real. La simulación completa se encuentra como el Anexo 1 y todos los archivos necesarios están dentro de una carpeta.

Figura 41

Simulación en SUMO



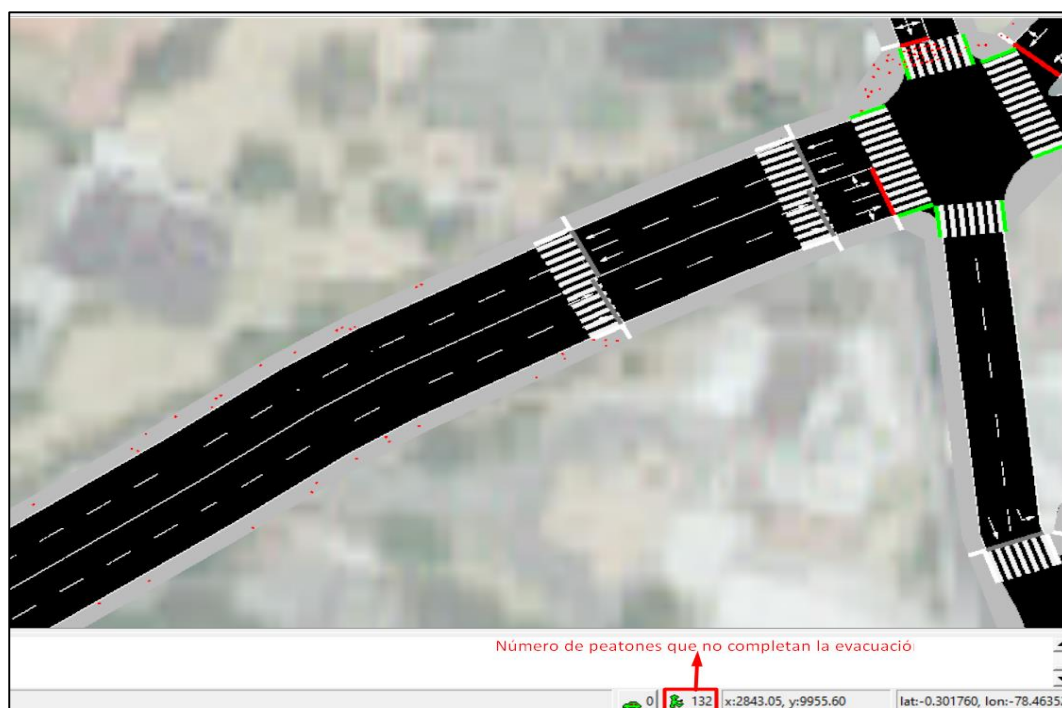
Una vez terminada la simulación (20 minutos) arroja el dato de cuantas personas no alcanzaron a llegar a las zonas seguras (Figura 42). En su mayoría estas personas se encontraban en zonas centrales, donde la evacuación resulta muy lejana y su tiempo de partida es tardío.

Una de las zonas donde no se completaba la evacuación era el Centro Comercial San Luis, pero para solucionar este problema se dio paso a la evacuación vertical, donde se ubicó como zona conflictiva de partida la zona noreste del centro comercial y el punto

de llegada o zona segura sería el centro comercial en sus pisos superiores; al ejecutar la simulación de evacuación de esta manera la evacuación en el sector del San Luis llega a ser completa, pero en el sector del triángulo sigue siendo un problema por la altura que alcanzan los lahares. En el sector del Triángulo aproximadamente el 13% de las personas que iniciaron la evacuación no pudieron culminarla en el tiempo de 20 minutos que es el tiempo de llegada del lahar a esa zona. Analizando el archivo de salida con las descripciones de cada peatón en cada segundo de la evacuación, notamos que las personas que no pudieron completar la evacuación fueron quienes salieron después de 1 minuto 9 segundos y la distancia que debían recorrer era mayor a 700 metros. Esto se da por el método 'stripping' de la simulación, donde existe interacción y se producen cuellos de botella en algunos puntos por la accesibilidad vial.

Figura 42

Peatones que no completan la evacuación



Archivos de densidad peatonal

Los archivos de salida de SUMO tienen el nombre de FCD (Floating Car Data), este archivo es muy pesado y extenso, además su extensión es XML, por lo cual fue necesario manejarlos a través de Python con técnicas de análisis de datos para poder extraer la información necesaria, que en este caso fue la densidad peatonal. En la Tabla 2 se muestran parte de los datos de densidad resultantes del tratamiento de los datos de salida de cada simulación.

Tabla 2

Tabla de densidad peatonal de las dos simulaciones

DENSIDAD PEATONAL			
SIMULACIÓN 1		SIMULACIÓN 2	
Vías ID	Densidad	Vías ID	Densidad
27935260	1867	27935260	2471
27935265	1362	534851263	2249
422499284	1339	534851248	2249
180331578	1200	534844207	2000
434621041	951	534844203	2000
429340808	942	534844196	2000
27890932	800	534844190	2000
369299645	797	534844186	2000
374351116	693	422499284	1807
337653018	684	180331578	1799
261121257	600	27935265	1769
537982378	600	33084630	1500
...

Mapa de calor con la información de densidad peatonal

Con el conteo de peatones por vía de evacuación, se logró crear un mapa de calor donde se pueden observar las vías que fueron más transcurridas durante toda la evacuación. En las Figuras 43 y 44 a continuación se observan los mapas de calor resultantes de los datos de salida de ambas simulaciones, los mapas completos se encuentran en los Anexos 3 y 4.

En primer lugar, se ve como el sector del centro de Sangolquí es de los que más densidad peatonal tiene en caso de una evacuación, ya sea en horario comercial como fuera del mismo. El motivo es muy lógico, porque en este lugar vive gran cantidad de gente, y según el mapa de densidad poblacional del cantón se observa que la población fija del lugar es alta comparada con otras partes del cantón.

Otro punto importante es notar como en las zonas comerciales aumenta la densidad peatonal, esto viene dado por la población flotante que triplica prácticamente la población en estos sitios. El algoritmo de Dijkstra claramente hace su trabajo dando la ruta de menor costo a cada una de las zonas de análisis de tránsito y permite que se formen varias rutas dependiendo de los puntos de partida.

Figura 43

Mapa de densidad peatonal al final de la evacuación fuera de horario comercial

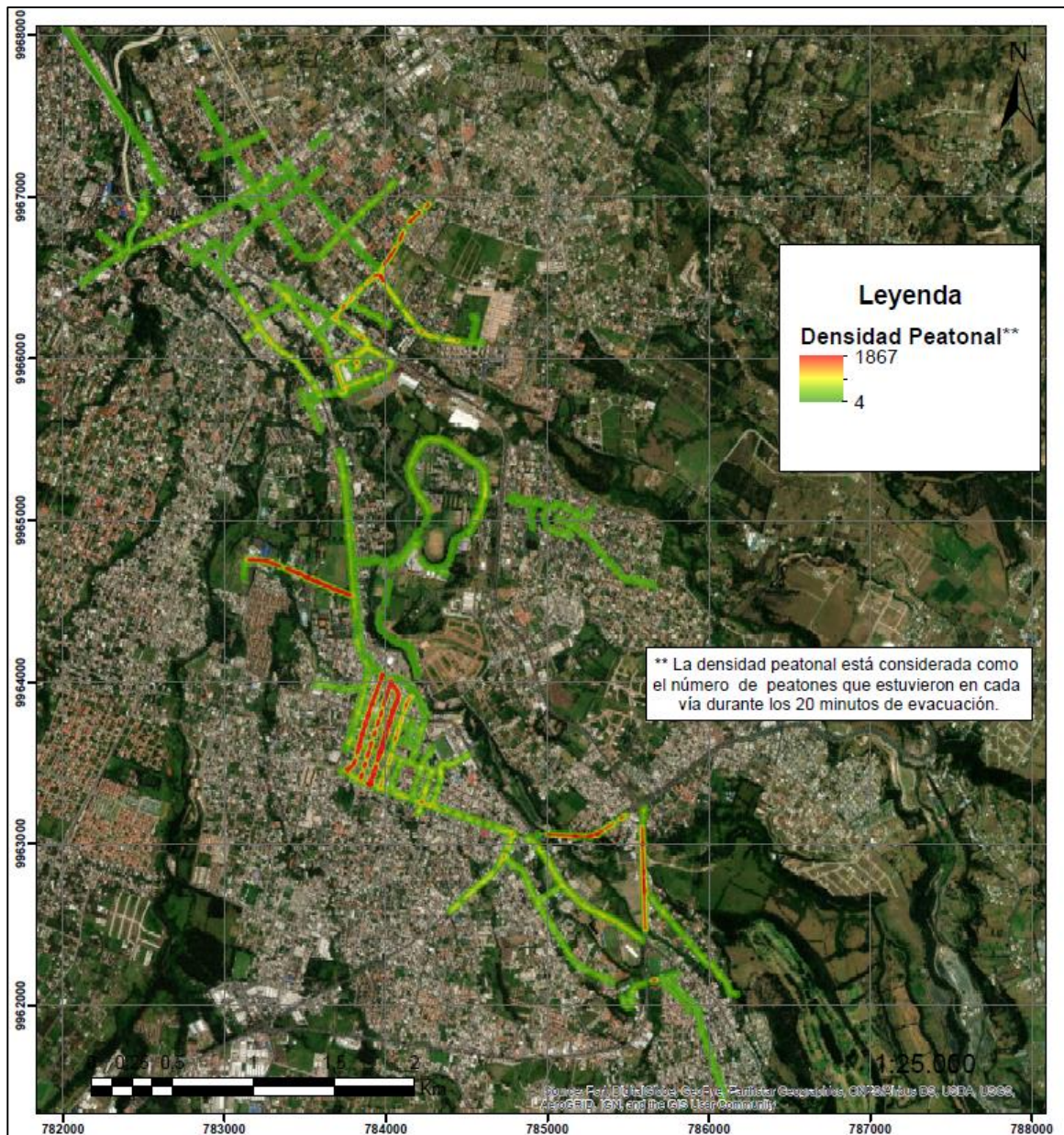
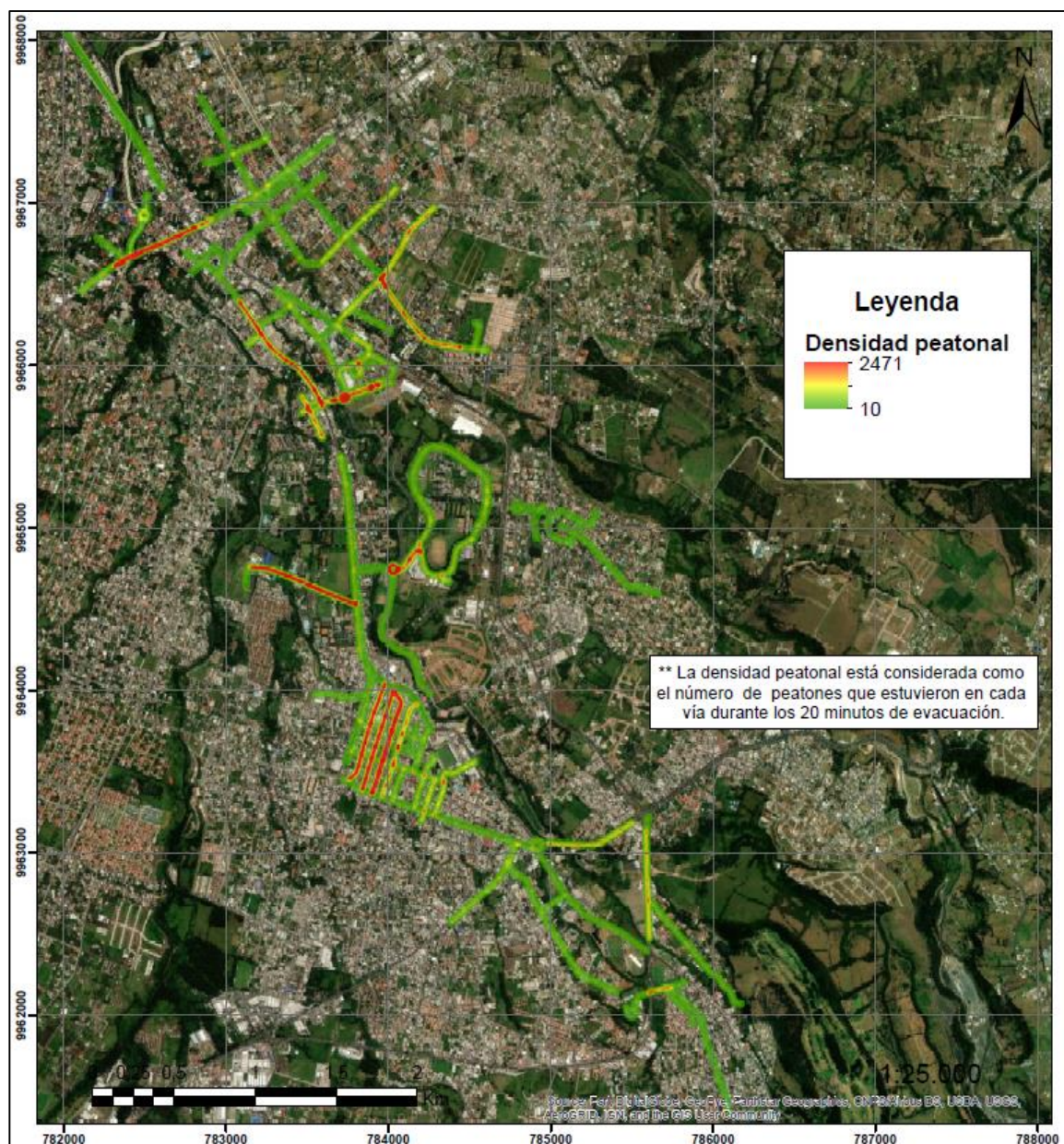


Figura 44

Mapa de densidad peatonal al final de la evacuación en horario comercial



Comparación entre mapa de densidad poblacional con mapas de densidad peatonal

Al comparar la densidad peatonal con la densidad poblacional se ve que tiene mucho sentido la relación entre la simulación y el tratamiento de los datos del archivo

resultado con el mapa de densidad poblacional del cantón en el área de influencia de lahares, se observa claramente como las zonas más densamente pobladas son las zonas con mayor densidad peatonal. La zona comercial se ve notablemente afectada por los horarios y carece de relación con el mapa de densidad de población fija del cantón (ver Figuras 45 y 46). Los mapas completos están en los Anexos 5 y 6.

Figura 45

Mapa de densidad poblacional vs densidad peatonal fuera de horario comercial

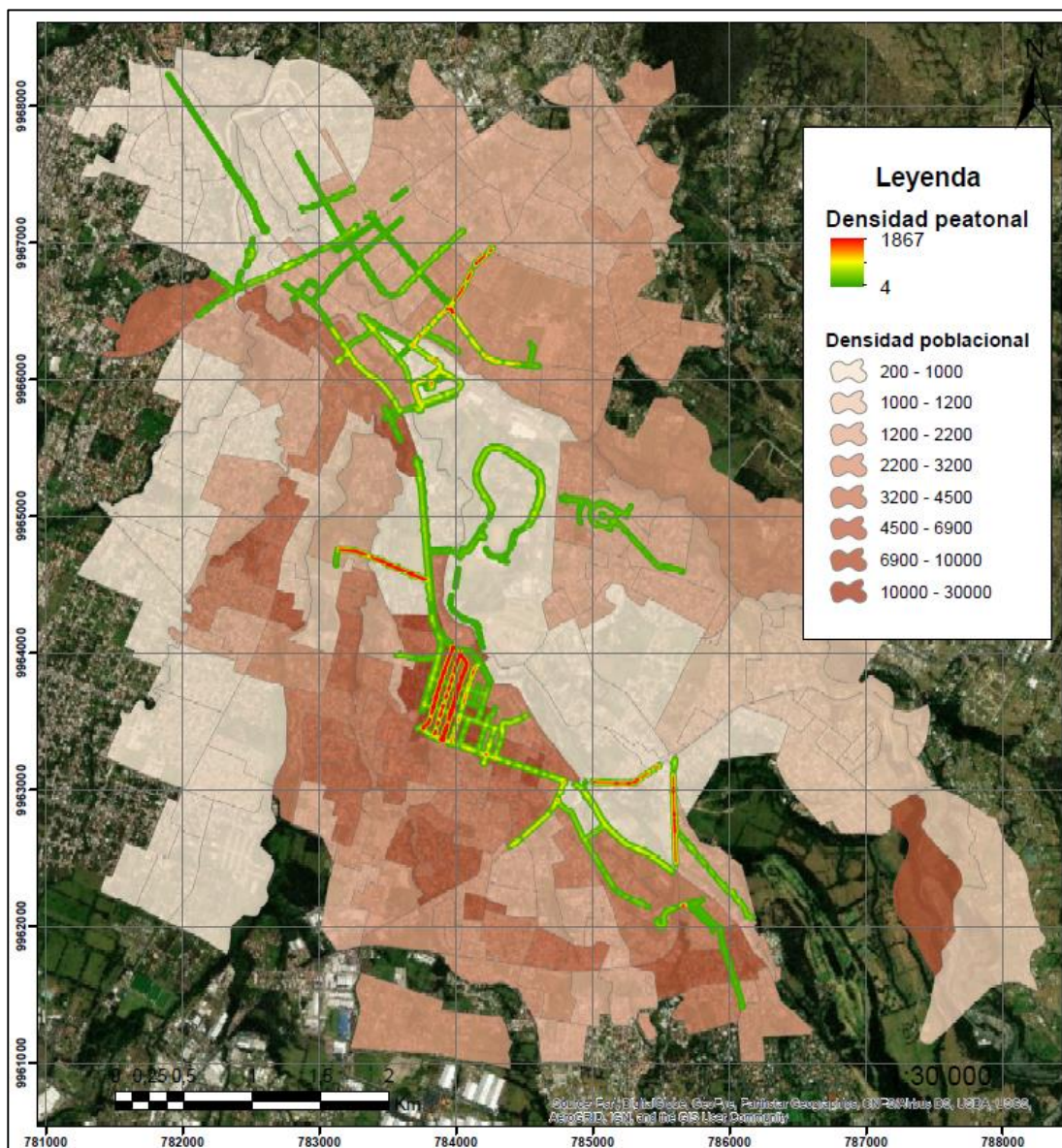
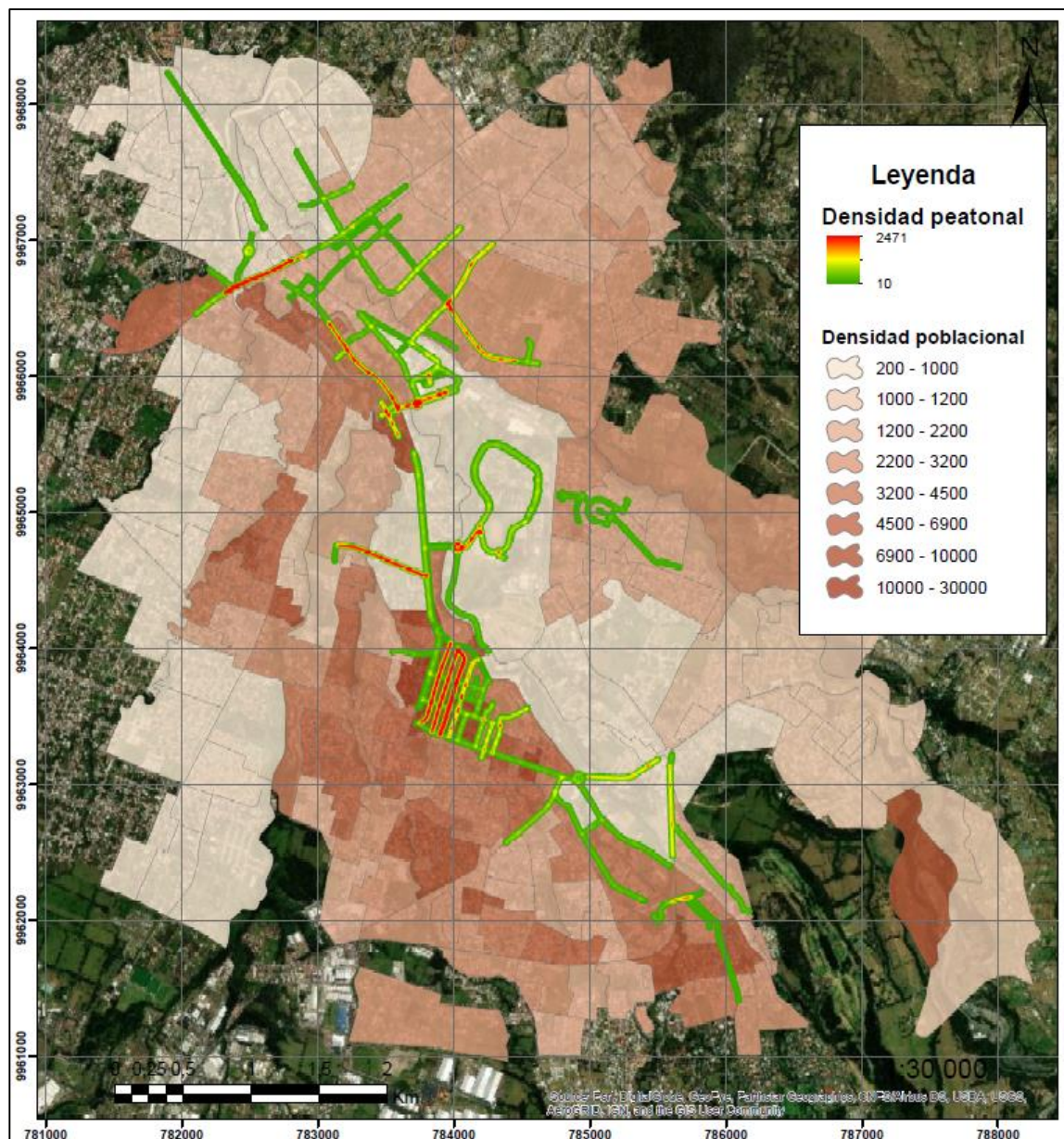


Figura 46

Mapa de densidad poblacional vs densidad peatonal dentro de horario comercial



Estas figuras nos dan un indicativo de donde se debe dar el mayor foco de atención según los datos que tenemos. Por lo tanto podemos decir que existen sectores en el Valle de los Chillos hay problemas de vialidad, donde la congestión y el excesivo tránsito de personas produce un alto riesgo de pérdidas humanas ante la posible erupción

del volcán Cotopaxi. De esta manera deberían habilitarse varias alternativas y abrirse proyectos para mejorar la vialidad y la distribución de la población.

La correcta gestión del riesgo y planificación territorial permiten reducir los riesgos al menor porcentaje posible, de esta manera se mantiene el peligro en su lugar y el riesgo de pérdidas humanas se minimiza.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Es necesario organizar la información en una Geodatabase para el correcto manejo y actualización de los datos para las respectivas modificaciones actuales y futuras que se le quiera dar a los diferentes ambientes de simulación.
- Una vez analizados los datos de tiempo y distancia de las personas que no llegaron a la zona segura (ver apartado 4.2), se concluye que se debería realizar una evacuación vertical de preferencia en sectores como el San Luis y el sector del Triángulo. En estos puntos se une el lahar que baja por el Río Pita con el lahar que va por el Río Santa Clara, por lo tanto aumenta el área de riesgo y a su vez se incrementa la distancia hacia las zonas seguras.
- Las zonas donde aumenta la población del cantón (población flotante), ya sea por actividades comerciales o académicas como la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mostraron una respuesta positiva a la evacuación vertical, así se puede decir que en sitios donde existe gran aglomeración de personas se debe realizar una evacuación vertical para evitar la mayor cantidad de pérdidas humanas posibles.
- De la potencialidad de la evacuación vertical se puede concluir que se vuelve muy útil porque evita la formación de cuellos de botella que se producen en la evacuación horizontal, cuando se cruzan los flujos de personas en las intersecciones de las calles mientras evacúan desde distintos lugares.
- La accesibilidad vial del cantón Rumiñahui debe desarrollarse más y ampliar la construcción de carreteras, para la evacuación fluida de peatones en caso de una

emergencia como la erupción del volcán Cotopaxi, esto permitiría acceder a vías más cercanas y rutas más cortas para la evacuación.

- Se concluye que la simulación de evacuación en el software libre y de código abierto SUMO, junto con el adecuado análisis geoespacial, son herramientas muy útiles y necesarias para tomar decisiones en lo que respecta a gestión de riesgos de todo tipo, tomando en cuenta que Ecuador tiene gran cantidad de población que vive o trabaja en zonas vulnerables a erupciones volcánicas, tsunamis, deslizamientos, entre otros; por lo que previo a un plan de contingencia se puede generar una simulación de evacuación y de esta manera optimizar los recursos y destinados para las emergencias.
- La selección del suficiente número puntos de entrada y salida y de una red correctamente estructurada y actualizada para el cálculo de la matriz de origen y destino y zonas de análisis de tráfico, es crucial para tener una simulación lo más precisa posible, de esta manera se pueden analizar la mayor cantidad de lugares que presentan inconvenientes para realizar una correcta evacuación.

Recomendaciones

- Para mejorar la precisión de la simulación es necesaria la actualización de datos de población mediante la recolección continua de información con herramientas de cartografía colaborativa o de fuentes oficiales. Los datos más precisos dan resultados más cercanos a la realidad en la simulación. Las diferentes instituciones y sus respectivos gestores de información deben actualizar constantemente los datos poblacionales.
- Realizar distintos modelos, ya sea en SUMO o en otras plataformas de simulación como GAMA, para comparar las diferencias entre los tiempos de evacuación que se puedan producir debido al aumento o eliminación de factores que intervengan

en las diferentes simulaciones. Entre los modelos a desarrollar se recomienda establecer interacciones entre vehículos y peatones.

- Realizar la difusión de información, por medio de instituciones autorizadas, con el fin de llegar de la mejor manera a los ciudadanos del cantón y a su población y así preservar la mayor cantidad de vidas posibles.
- Plantear proyectos de mejoras de la accesibilidad vial para el cantón Rumiñahui, en sectores donde la población se vería mayormente afectada por la larga distancia a las zonas seguras en caso de una erupción del volcán Cotopaxi.
- Aplicar la metodología propuesta en el presente proyecto, para simular la evacuación peatonal en sitios de gran densidad poblacional que sean vulnerables a fenómenos naturales, por ejemplo playas turísticas.
- Desarrollar una aplicación en tiempo real, que permita dar a conocer a las personas cual es el lugar seguro más cercano en caso de encontrarse en las áreas de peligro.

Capítulo VI

Bibliografía

- Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., Lucken, L., Rummel, J., Wagner, P., & Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2575–2582. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938>
- Arias Suárez, I., Pérez García, E., Mantilla Ávila, A., Gonzáles García, S., & Díaz Rodríguez, B. (2007). *Evaluación de Imágenes satelitales de alta resolución (HRS) y su Aplicación en la mapificación topográfica*.
- Batagelj, V. (1991). *Department of Sociology , University of Pittsburgh Some Mathematics of Network Analysis Some Mathematics of Network Analysis. January*.
- Bell, M. G. H. (1991). The estimation of origin-destination matrices by constrained generalised least squares. *Transportation Research Part B*, 25(1), 13–22. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(91\)90010-G](https://doi.org/10.1016/0191-2615(91)90010-G)
- Berlanga Llavori, R. (2010). *Apuntes de Simulación Informática*.
- Bray, T., Paoli, J., Sperberg-McQueen, C. M., Maler, E., & Yergeau, F. (2008). *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*. <https://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/#sec-doc-entity>
- Carrillo Gallegos, L. R. (2013). *Simulación De Lahares Del Volcán Cotopaxi En Sus Drenajes Del Lado Norte Con El Uso Del Programa Hec-Ras*.
- Curtin, K. M. (2007). Network analysis in geographic information science: Review, assessment, and projections. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(2), 103–111. <https://doi.org/10.1559/152304007781002163>
- Dosseto, A., Turner, S. P., & Van Orman, J. A. (2010). Timescales of Magmatic Processes: From Core to Atmosphere. In *Timescales of Magmatic Processes: From Core to Atmosphere* (Primera). Blackwell Publishing Ltd.

<https://doi.org/10.1002/9781444328509>

El Telégrafo. (2016, July 23). *El 76% de la población de Rumiñahui proviene de otras zonas del Ecuador.*

Encalada, E. (2018, October 4). Turismo de haciendas, una atractiva opción para el feriado. *EL COMERCIO.*

Escobar, F., Hunter, G., Bishop, I., & Zerger, A. (2011). *Introduction to GIS.* Department of Geomatics, The University of Melbourne.

ESRI. (2019). *SIG.* ESRI Colombia. <https://esri.co/esri-dummies/sig/>

GADMUR - Departamento de Turismo. (2017). *RUMIÑAHUI DESTINO TURÍSTICO.*
<http://turismo.ruminahui.gob.ec/esp/contactos/>

GADMUR - Dirección de comunicación social. (2018). *RUMIÑAHUI 80 AÑOS DE CANTONIZACIÓN.*

Gaunt, H. E., Bernard, B., Hidalgo, S., Proaño, A., Wright, H., Mothes, P., Criollo, E., & Kueppers, U. (2016). Juvenile magma recognition and eruptive dynamics inferred from the analysis of ash time series: The 2015 reawakening of Cotopaxi volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 134–146.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.10.013>

Hall, M., & Mothes, P. (2008). The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675–702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>

Hasan Anick, T. (2016). *Dijkstra.py.* Github.
<https://gist.github.com/tanvir002700/41e4e61332f98d4ab1e5896bf0bb8f12>

Hernández, D. (2018). *Evacuación.*

IGM. (2014). *Geoportal* IGM.
http://www.geoportaligm.gob.ec/orto/ows?service=WMS&request=GetLegendGraphic&format=image%2Fpng&width=20&height=20&layer=igm%3Aruminahui_2014

- INEC. (2010). *Censo de Población*.
- INPI. (n.d.). *Boletín Temático sobre ceniza volcánica*. Buenos Aires: Departamento de información tecnológica.
- Instituto Geofísico. (2017). *Listado de artículos científicos*.
<https://www.igepn.edu.ec/servicios/listado-de-articulos-cientificos>
- Javaid, M. A. (2013). Understanding Dijkstra's Algorithm. *SSRN Electronic Journal*.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4), 128–138.
- Laconi, C., Pedregal, B., & del Moral, L. (2018). LA CARTOGRAFÍA COLABORATIVA PARA UN CAMBIO SOCIAL. ANÁLISIS DE EXPERIENCIAS. *Tecnologías de La Información Geográfica: Perspectivas Multidisciplinares En La Sociedad Del Conocimiento.*, 821-830 SRC-BaiduScholar FG-0.
- Llinares, M., Ortiz, R., & Marrero, J. (2004). *Riesgo Volcánico* (Primera). DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIAS. MINISTERIO DEL INTERIOR. ESPAÑA.
- Maisanche, F. (2015, November 27). Una evacuación de ocho horas en un simulacro por el volcán Cotopaxi. *EL COMERCIO*.
- Nieto Masot, A. (n.d.). *TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL ANÁLISIS ESPACIAL. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario* (Primera).
http://www.researchgate.net/publication/312053891_TECNOLOGIAS_DE_LA_INF ORMACION_GEOGRAFICA_EN_EL_ANALISIS_ESPACIAL_Aplicaciones_en_los _Sectores_Publico_Empresarial_y_Universitario
- OpenStreetMap. (2020). *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/about>
- Ortiz Panchi, O. C. (2013). *Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en Ecuador*.

[Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].

<http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/1221>

Padilla, O., & Bosque, J. (2014). Determinación de puntos de evacuación vertical y horizontal en caso de una erupción del volcán Cotopaxi en el Valle de los Chillos, Sangolquí, Ecuador. 11), . *Revista Geoespacial*, 11, 67–69.

Python Software Foundation. (2020). *The Python Tutorial*. Python Software Foundation. <https://docs.python.org/3.7/tutorial/index.html>

Rodríguez, D. H., & Figueroa, P. A. (2015). *Modelo para Micro-Simulación de Tráfico Vehicular y Peatonal Utilizando CUDA*. June 2012, 7. https://www.researchgate.net/profile/Diego_Rodriguez42/publication/282329794_Modelo_para_Micro-Simulacion_de_Trafico_Vehicular_y_Peatonal_Utilizando_CUDA/links/560c53c708ae6c9b0c42b905.pdf

Sánchez Carrasco, C. A. (2019). *Sánchez Simulación del tránsito vehicular en caso de una eventual erupción del volcán Cotopaxi en la zona de influencia por lahares en el Valle de los Chillos con el uso de herramientas geoinformáticas de software libre (tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Secretaría de Gestión de Riesgos. (2015). *PLAN DE CONTINGENCIA ANTE UNA POSIBLE ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI*.

Servicio Nacional de Gestión de Riesgo y Emergencias. (2019). *Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias articula acciones en Pichincha para prevenir y disminuir incendios forestales*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/servicio-nacional-de-gestion-de-riesgos-y-emergencias-articula-acciones-en-pichincha-para-prevenir-y-disminuir-incendios-forestales/>

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2015). *92 barrios de Cotopaxi participarn en primer simulacro masivo provincial por el volcán Cotopaxi*.

<https://www.gestionderiesgosgobec92barriosdecotopaxiparticiparanenprimersimulacro.masivoprovincialporelvolcancotopaxi>

UNDRO. (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*.

Van Wyk de Vries, B., & Andrade, D. (2008). Volcanismo y sismicidad. In P. Andrés & R. Rodríguez (Eds.), *Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica* (pp. 29–51).

Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación Numérica y Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán Cotopaxi. *Revista Politécnica*, 43(1), 61–72. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n1.971>

Anexos