

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN
1.5 KM DE LA QUEBRADA CARRETERAS, PARROQUIA CARCELÉN,
DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

CRISTHIAN DANIEL CHAMBA ROSILLO

cristhian.chamba@epn.edu.ec

DIRECTOR: MSc. MARCO CAMILO ZAPATA TAPIA

czapata@igepn.edu.ec

CODIRECTOR: PhD. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA

dandrade@igepn.edu.ec

Quito, Junio 2022

DECLARACIÓN

Yo, CRISTHIAN DANIEL CHAMBA ROSILLO declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cristhian Daniel Chamba Rosillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por CRISTHIAN DANIEL CHAMBA ROSILLO, bajo mi supervisión.

Marco Camilo Zapata Tapia, MSc
Director de Proyecto

Santiago Daniel Andrade Varela, PhD
Co-Director de Proyecto

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para continuar cada día y lograr este objetivo.

A mi madre Lorena, por haberme apoyado en todo lo que estuvo a su alcance, por confiar en mí y por enseñarme a luchar por mis sueños. A mi Mayita quiero agradecer por siempre darme ese amor de abuelita. A mi padre que está en el cielo y que estoy seguro que nos guía y protege.

A mis hermanos Yandry y Tatiana, siempre agradeceré sus consejos, apoyo que sirvieron para formarme tanto profesional como personal.

Así mismo quiero agradecer al Proyecto Tomorrow's Cities y en especial al MSc. Camilo Zapata y PhD. Daniel Andrade, por la oportunidad, confianza durante este trabajo académico, por el tiempo invertido y por la guía en el desarrollo de este texto.

También quiero agradecer a la MSc. Eliana Jiménez, por su conocimiento, interés en el desarrollo y guía impartida en cada etapa de este trabajo.

Agradezco a la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del DMQ, por la información bibliográfica que fue facilitada y en especial al Ing. Jorge Ordoñez por su conocimiento y apoyo en este trabajo.

A la Cooperativa de Vivienda Puertas del Sol en especial a la Sra. Carmen Clavón por su gran acogida en la socialización de los resultados de este trabajo académico.

Gracias a la carrera de Ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica Nacional por su excelente formación académica y a todos los docentes que con su conocimiento impartido forman grandes profesionales al servicio del país.

También quiero agradecer a mis amigos de la facultad: Kathe, Joha, Jason, Carlos C., Ronny, Diego, Gonzito y Carlos Q. por todo el tiempo compartido y las experiencias vividas en este trayecto universitario.

Finalmente quiero agradecer a Tatiana Espinosa, porque en todo momento ha sido un apoyo incondicional, con su conocimiento, compañía y cariño. Eres y serás una persona muy importante en mi vida.

DEDICATORIA

A mis padres, Lorena y Edgar

A mis abuelitos, Mayita y Segundo

A mis hermanos, Yandry y Tatiana

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Justificación.....	7
1.3.1. Justificación Teórica.....	7
1.3.2. Justificación Metodológica.....	9
1.3.3. Justificación Práctica	11
1.4. Hipótesis	12
1.5. Objetivo General	12
1.6. Objetivos Específicos	12
1.7. Alcance	13
Capítulo 2. MARCO CONCEPTUAL.....	14
2.1. Marco Regional	14
2.2. Valle Interandino	15
2.3. Estratigrafía de la Cuenca Quito - San Antonio - Guayllabamba	16
2.4. Geología Local	18
2.5. Conceptos Generales	20
2.6. Movimientos en Masa (MM).....	21
2.7. Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa.....	26

2.8.	Ubicación y Acceso.....	27
2.9.	Población.....	27
2.10.	Hidrología.....	28
Capítulo 3. MARCO METODOLÓGICO.....		29
3.1.	Estudios Previos	30
3.2.	Mapa Geológico	31
3.3.	Parámetros Geotécnicos	31
3.3.1.	Mapa de parámetros geotécnicos: Cohesión, Ángulo de Fricción y Peso Específico.....	33
3.4.	Mapa de Pendientes.....	33
3.5.	Mapa del Factor de Seguridad.....	34
3.6.	Mapa de Aceleración Crítica.....	34
3.7.	Intensidad de Arias.....	35
3.7.1.	Cálculo de los Desplazamientos de Newmark.....	38
3.8.	Inventario de Movimientos en Masa y Calibración	39
Capítulo 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		40
4.1.	Geología	40
4.2.	Mapa de Parámetros Geotécnicos	44
4.3.	Mapa de Pendientes.....	44
4.4.	Mapa de Factor de Seguridad.....	46

4.5.	Mapa de Aceleración Crítica.....	48
4.6.	Intensidad de Arias.....	50
4.7.	Mapa de Desplazamientos de Newmark	52
4.8.	Calibración de la Metodología	54
4.9.	Discusión.....	55
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		60
5.1.	Conclusiones.....	60
5.2.	Recomendaciones.....	62
Bibliografía.....		63
ANEXOS		71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la Zona de Estudio en el Distrito Metropolitano de Quito.	5
Figura 2.1 Contexto geodinámico del Ecuador (Tomado de Yepes et al., 2016).....	15
Figura 2.2 Estratigrafía de la Quebrada Carretas (Tomado de Valverde, 2004)	19
Figura 2.3(a) Esquema de la caída de rocas (b) Corominas y Yagué, (1997) denominan a este movimiento “colapso”. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, (2007).....	23
Figura 2.4 Esquema del vuelco en bloque (De Freitas y Waters, 1973 en Varnes, 1976).	23
Figura 2.5 Esquema de un deslizamiento rotacional mostrando los rasgos morfológicos característicos.....	23
Figura 2.6 (a) y (b) Esquema de un deslizamiento traslacional, llamado resbalamiento y corrimiento según Corominas Dulcet y García Yagué, (1997).....	24
Figura 2.7 Esquema de flujos canalizados y no canalizados, según Cruden y Varnes, (1996). ..	24
Figura 2.8 Esquema de expansiones laterales, según Varnes, (1978).	25
Figura 2.9 Esquemas de reptación y soliflucción, según Corominas Dulcet y García Yagué, (1997).....	26
Figura 2.10 Clasificación de métodos de evaluación de la amenaza (Tomado y modificado de Aleotti y Chowdhury, 1999).	27
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología a implementar.	30
Figura 3.2. Vista tridimensional del Valle Interandino (Tomado de Alvarado et al., 2014).	37
Figura 3.3 Mapa Inventario de MM.....	39
Figura 4.1 Afloramiento de las Fm. Cangahua que contiene capas de cenizas volcánicas dentro de la Quebrada Carretas 07-02-2022 (Coordenadas: UTM X:783296 Y:9990244).....	41

Figura 4.2 Fotografía aérea tomada por VANT en donde se puede visualizar movimientos en masa dentro de la Quebrada Carretas marcados sus escarpes en color negro y las capas de cenizas volcánicas en naranja.	42
Figura 4.3 Mapa Geológico de la Quebrada Carretas, en naranja se muestra un buffer de 50m desde el borde de la Quebrada Carretas para identificar la amenaza en los alrededores de esta. .	43
Figura 4.4 Mapa de Parámetros Geotécnicos: a) Peso Específico, kN/m^3 , b) Ángulo de Fricción Interna, rad c) Cohesión, kN/m^2	44
Figura 4.5 Mapa de Pendientes de la zona de estudio. Izq: MDE resolución 0,2m. Dcha: MDE resolución 2m.....	46
Figura 4.6 Mapa de Factor de Seguridad (Clasificación tomada de Ávila et al., 2016).	47
Figura 4.7 Mapa de Aceleración Crítica en función de la aceleración de la gravedad.	49
Figura 4.8. Datos simulados en el software SeismoSignal 2016 para el sismo de Coalinga (1983) y Loma Prieta (1989), (Tomado de Merino, 2018; Benítez, 2018).	51
Figura 4.9 Sismo de Calderón 12 de agosto de 2014 registro en las estaciones (Tomado de Cañizares, 2017).	52
Figura 4.10 Mapas de Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa en la Quebrada Carretas, unidad en centímetros.	53
Figura 4.11 Correlación entre el sismo de Loma Prieta y los escarpes en las diferentes zonas de la Quebrada Carretas.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los movimientos en masa según Cruden y Varnes, (1996).	22
Tabla 3.1 Parámetros Geotécnicos Referenciales.	32
Tabla 3.2 Parámetros Geotécnicos obteniendo su promedio, máximo y mínimo.	32
Tabla 3.3 Clasificación de pendientes según el rango.	33
Tabla 3.4 Grados cualitativos basados en el FS (Tomado de Ávila et al., 2016).	34
Tabla 3.5 Clasificación del tipo de sustrato en base al Vs30 (Tomado de Schmidt, 2012).	35
Tabla 3.6. Registro de sismos internacionales. Rjb: distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie. Rrup: distancia más cercana al plano de ruptura cosismico. dt: duración del registro en segundos (Tomado de Cañizares, 2017).	38

Resumen

En el DMQ, en los últimos años se ha observado que el área del cauce de las quebradas ha aumentado por la inestabilidad de taludes ligada a procesos de erosión y acciones antrópicas que incrementan el caudal. La quebrada Carretas está ubicada en la cuenca del río Monjas y constituye uno de sus afluentes que, de acuerdo con Rivera, (2016) son afectados por movimientos en masa en épocas de alta pluviosidad. Este trabajo académico está enfocado en zonificar la amenaza por movimientos en masa a lo largo de 1,5 km del cauce de la Quebrada Carretas considerando el efecto de disparo de un sismo mediante la aplicación de la Metodología de Newmark, (1965) e Intensidad de Arias, (1970). La metodología de Newmark busca integrar las características de la zona como litologías, geotécnica y detalles geológicos que se integran en un sistema de información geográfica para su análisis e interpretación determinando valores de Factor de Seguridad y Aceleración Crítica. La metodología permite zonificar la amenaza ante el desplazamiento horizontal producido al generarse un evento sísmico utilizando el factor de Intensidad de Arias.

A través de las salidas de campo y observación de ortofotos se mapeo la Fm. Cangahua que se encuentra en toda el área de estudio, además, por medio de la recopilación bibliográfica se obtuvieron los valores geotécnicos esenciales para aplicar la metodología. Así mismo con la ayuda de un Vehículo Aéreo no Tripulado y el Proyecto Tomorrow's Cities se obtuvo un modelo digital de elevación de resolución 0,2m y un MDE con resolución de 2m para poder obtener la geomorfología de la zona. Para obtener el valor de la Intensidad de Arias se utiliza dos sismos internacionales Loma Prieta Mw 6.9 y Coalinga Mw 5.7, que cumplen las condiciones del DMQ en función de las propiedades geológicas y tectónicas como es el Sistema de Fallas inversas de Quito, Vs30 entre 360 a 600 m/s y una distancia epicentral de 10 – 30 km. Se simuló y comparo los resultados obtenidos con los trabajos de Merino, (2018) y Benítez, (2018). Al aplicar la fórmula logarítmica propuesta por Hsieh y Lee, (2011) que integra los valores de Aceleración Crítica e Intensidad de Arias para los sismos internacionales, se obtiene los desplazamientos de Newmark para proceder a zonificar la amenaza por movimientos en masa inducidas por sismos determinando zonas de muy alta (> 15 cm) y alta amenaza (5-15 cm) para los sismos de Loma Prieta y Coalinga respectivamente. Las zonas que están afectadas por movimientos en masa producto de una actividad intensa de lluvias y erosión al pie de la ladera concuerdan con las zonas de muy alta y alta amenaza siendo estas las mayormente afectadas al generarse un evento sísmico.

Abstract

In the DMQ, in recent years it has been observed that the area of the ravine has increased due to the instability of the slopes linked to erosion processes and anthropic actions that increase the flow. The Quebrada Carretas is located in the Monjas river basin and constitutes one of its tributaries that, according to Rivera, (2016) are affected by mass movements in times of high rainfall. This academic work is focused on zoning the hazard by landslides in 1.5 km of the Quebrada Carretas whose trigger factor is an earthquake, through the application of the Newmark Methodology, (1965) and Arias Intensity, (1970). Newmark's methodology seeks to integrate the characteristics of the area such as lithologies, geotechnics and geological details that are integrated into a geographic information system for analysis and interpretation, determining Safety Factor and Critical Acceleration values. The methodology allows zoning the hazard in the face of the horizontal displacement produced when a seismic event is generated using the Arias Intensity.

Through field trips and observation of orthophotos, the Fm. Cangahua, which is located throughout the study area, in addition, through the bibliographic compilation, the essential geotechnical values were obtained to apply the methodology. Likewise, with the help of an Unmanned Aerial Vehicle and the Tomorrow's Cities Project, a Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 0.2m and a DEM with a resolution of 2m were obtained in order to obtain the geomorphology of the area. Arias Intensity uses two international earthquakes Loma Prieta Mw 6.9 and Coalinga Mw 5.7, which meet the DMQ conditions based on the geological and tectonic properties such as the reverse Fault System of Quito, V_{s30} between 360 to 600 m/s and an epicentral distance of 10 – 30 km. The results obtained with the studies of Merino, (2018) and Benítez, (2018) were simulated and compared. By applying the logarithmic formula proposed by Hsieh and Lee, (2011) that integrates the values of Critical Acceleration and Arias Intensity for the international earthquakes, the Newmark displacements are obtained to proceed to zone the hazard due to earthquake-induced landslides, determining areas of very high (> 15 cm) and high hazard (5-15 cm) for the Loma Prieta and Coalinga earthquakes, respectively. The areas that are affected by landslides resulting from intense rain activity and erosion at the foot of the slope coincide with the areas of very high and high hazard, these being the most affected when a seismic event is generated.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

Dentro del entorno en el que se desarrolla el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) podemos encontrar ríos, quebradas, montañas y volcanes, que, mediante procesos erosivos con agentes hídricos y eólicos, modifican el paisaje a través del tiempo, además la expansión demográfica y migración poblacional han provocado un desarrollo urbano no planificado. Los barrios del DMQ se han desarrollado hacia las periferias de la urbe, asentándose sobre áreas montañosas, quebradas, zonas de relleno (Terán et al., 2015).

Las amenazas geológicas que afectan al DMQ tienen un origen sísmico, volcánico y movimientos en masa dentro de las cuencas hidrográficas que sufren procesos erosivos intensos que han aumentado la profundidad y el ancho de sus cauces, esto se agrava con el crecimiento urbano debido a la impermeabilización del suelo aumentando la escorrentía superficial que a través del alcantarillado se dirige a las quebradas y ríos (Terán et al., 2015).

En el área de estudio de la Quebrada Carretas, en su parte derecha se encuentra ubicado el barrio Puertas del Sol, que en 2004 empezaron con su proceso de legalización, desde este año se suscitó un problema con una tubería que servía de agua potable a Calderón, la cual tuvo una rotura desfogando sus aguas directamente sobre el talud derecho de la Quebrada Carretas provocando un deslizamiento y aceleración de los procesos erosivos (Ordoñez, 2021).

La Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos (DMGR) en 2011 remitió un informe técnico No. 038-AT-DMGR-2011 en el que hace referencia a los problemas erosivos en el margen derecho de la Quebrada Carretas, así mismo identificaron 14 viviendas que se encontraban dentro de la franja de protección de la quebrada afectando a 15 familias las cuales se detallan en el informe

técnico No. 004-AT-DMGR-2011. En el año de 2012 se efectuó la legalización de los terrenos de la “Urbanización de Interés Social de Desarrollo Progresivo de la Cooperativa de Vivienda Puertas del Sol”, dando un total de 649 lotes de estos, 43 lotes se ubican en una franja de relleno de la quebrada y 97 lotes que limitan con el borde derecho de la Quebrada Carretas, como consta en la Ordenanza Metropolitana No.0189.

Desde 2020 hasta la actualidad se han presentado movimientos en masa dentro de los límites de la Quebrada Carretas, evidenciando una aceleración en los procesos erosivos, socavando y aumentando la pérdida de terreno que afecta a las familias de la Cooperativa de Vivienda Puertas del Sol.

1.2.Planteamiento del Problema

El Distrito Metropolitano de Quito se encuentra ubicado en la Cuenca Quito - San Antonio – Guayllabamba, la cual es una cuenca intramontañosa del Valle Interandino, que tiene un relleno volcanosedimentario Plio-cuaternario (Lavenu et al., 1995; Winkler et al., 2005; Villagómez, 2003; Alvarado, 2014).

En el espacio físico donde se extiende el DMQ se conjugan multi-amenazas debido a sus características morfológicas y climáticas. En la cuenca de Quito se asienta la zona urbana más consolidada, que está rodeada al oeste por el Complejo Volcánico Pichincha, al este por un conjunto de lomas producto de la actividad del Sistema de Fallas de Quito generando una red hidrográfica que desfoga a través de un sistema de quebradas que atraviesan la ciudad. Además, el área urbana del DMQ ha incrementado con el pasar de los años teniendo una superficie de 0,0831 (km²) en el año de 1534 y una superficie de 399,701 (km²) en 2011 (Peltre, 1989). Este crecimiento se aceleró en los años 70 produciendo que las quebradas sean rellenadas, ya que esto se practicaba

desde la época colonial en el centro histórico (Peltre, 1989) reemplazando estos cauces naturales por alcantarillado o creando asentamientos informales y construcciones al borde de las quebradas. Según el Censo de 2010 la zona suburbana tuvo una tasa de crecimiento 3 veces mayor a la del área urbana, esto causa un crecimiento demográfico desordenado, mientras que la tasa de crecimiento poblacional en 1982 era del 4% esta disminuyó a 2.2% entre 2001-2010.

En las Administraciones Zonales: Norte, Calderón y la Delicia, se ubica la cuenca del río Monjas, la cual constituye uno de los cuatro sistemas hídricos que recibe las descargas de aguas servidas del DMQ. En los taludes del sistema de quebradas afloran formaciones Plio-cuaternarias como la Formación Guayllabamba (tobas y lavas), Chiche (lahares, depósitos aluviales y piroclásticos) y la Formación Cangahua, roca sedimentaria de origen volcánico, (Villagómez, 2003); la Cangahua se encuentra intercalada por importantes horizontes de tefras volcánicas y hacia el tope aflora un flujo piroclástico color gris proveniente de erupciones recientes del Volcán Pululahua (Cerro Pondoña) (Villagómez, 2003).

A lo largo de la cuenca del río Monjas se han evidenciado problemas de inestabilidad de taludes, poniendo en situación de riesgo a numerosas viviendas y estructuras construidas a lo largo de los márgenes de las quebradas y el cauce del río Monjas. Diferentes “observaciones a lo largo del cauce indican numerosas descargas sanitarias ilegales, numerosas viviendas inestables, estructuras destruidas, ojos de agua al pie del talud, y signos de inestabilidad como fisuras de tracción y zonas de socavamiento” (Rivera, 2006).

Una de estas quebradas que se han visto impactadas por la presión que ejerce el crecimiento urbano es la Quebrada Carretas antes conocida como quebrada Hurapamba, la cual es parte del sistema de quebradas que forman la cuenca del río Monjas. Esta quebrada nace en la Cooperativa de Vivienda

27 de Octubre, recorre el extremo oeste del barrio Carapungo y a la altura de Carcelén Bajo se une con el río Villorita, formando el río Monjas que sigue su curso hasta desembocar en el río Guayllabamba con un recorrido de aproximadamente 22 km desde su unión con el río Villorita (Rivera, 2006).

Los factores condicionantes (relieve, litología, estructuras geológicas, propiedades geomecánicas y meteorización) sumado con factores desencadenantes (sismos, precipitaciones y factores antrópicos) han provocado inestabilidad de los taludes de la Quebrada Carretas evidenciadas por la presencia de movimientos en masa que aumentan al pasar de los años. Estudios provisionales muestran que en el año de 1975 se observaba una zona de inestabilidad mientras que, en el año 2020, se tiene un total de 16 movimientos en masa (Proyecto Geológico, 2020B).

La delimitación del área de estudio a 1.5 km (ver Figura 1.1) obedece a la ocurrencia de los últimos eventos de inestabilidad reportados por la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgo del Municipio del DMQ, la cual ha solicitado este estudio técnico en la zona, donde existen viviendas en situación de riesgo cercanas también al nuevo centro comercial El Portal.

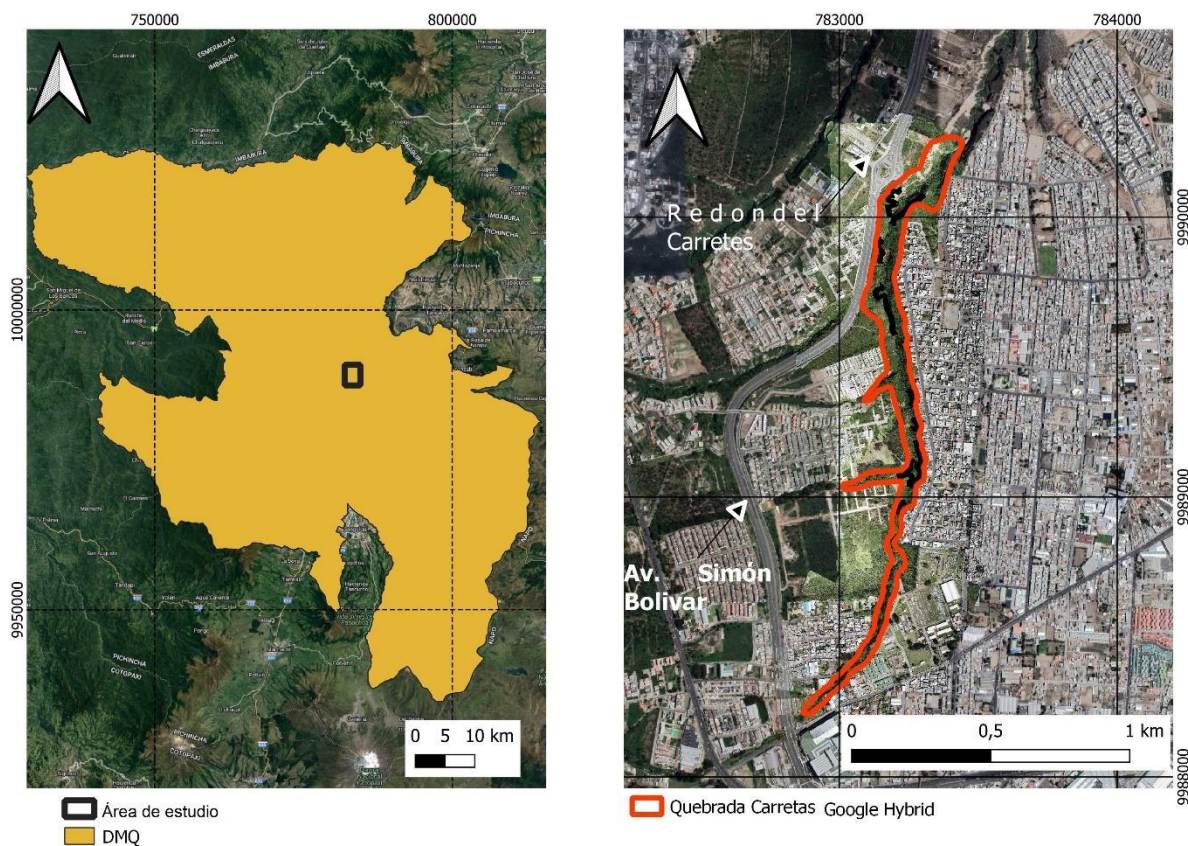


Figura 1.1 Ubicación de la Zona de Estudio en el Distrito Metropolitano de Quito.

Los eventos suscitados en el área del estudio como socavones bajo las casas producto de la descarga de aguas residuales y colectores se han reportado por medios de comunicación como Teleamazonas, Ecuavisa y diario El Comercio, dando a conocer la situación actual de la Quebrada Carretas. En 2020, se produjo un deslizamiento de gran magnitud que desprendió parte de los trabajos que se realizaron para protección del talud que consistía en hormigón proyectado, malla electrosoldada y pernos de anclaje (Bonifaz, 2021), ver Figura 1.2. En octubre de 2021, el Consejo Metropolitano declarada en emergencia a la cuenca del río Monjas, los elementos constitutivos y las franjas de protección de su afluente en la Quebrada Carretas.



Figura 1.2 Fotografías con distintas perspectivas que muestran el estado erosivo de la Quebrada Carretas. Superior) Viviendas al borde de la ladera de la Quebrada Carretas fotografía tomada: 15-12-2022. Media) Ubicación de las viviendas respecto al borde de Quebrada Carretas fotografía

tomada:15-12-2022. Inferior) Deslizamientos a la base de los taludes del margen derecho de la Quebrada Carretas.

Este estudio está enfocado a realizar un análisis de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en los taludes de la Quebrada Carretas a través de la metodología de Desplazamientos de Newmark para generar mapas que podrán ser utilizados como una herramienta de planificación de acciones en zonas de mayor peligrosidad a lo largo de este tramo de la Quebrada Carretas.

1.3.Justificación

1.3.1. Justificación Teórica

Un talud es una superficie de masa que presenta una pendiente o cambios en la altura (Suárez, 2009), para la generación de movimientos en masa dentro de los taludes se debe considerar tanto los factores geológicos, geotécnicos y los disparadores como sismos, erosión, lluvia y factores antrópicos (Ramírez y Sánchez, 2014), que modifiquen su estado natural de estabilidad. El Factor de Seguridad, FS, es un valor que representa el equilibrio de las fuerzas presentes en un talud, Suárez, (2009) menciona que en un talud estable existen fuerzas actuantes y fuerzas resistentes que están en equilibrio y que el FS se define como la relación entre la resistencia al corte real (R_{max}) y los esfuerzos de corte críticos o la carga (L). La disminución de la resistencia al corte de un talud puede deberse a causas internas como es la meteorización, presión de poros, fracturamiento, geología y litología, en cambio un incremento de los esfuerzos de corte puede deberse a causas externas que pueden ser sobrecarga en el talud, sismos, lluvias, erosión y socavamiento al pie de talud en zonas de quebradas debido al incremento del caudal líquido por las descargas de aguas servidas. Además, los cambios hidrológicos generan procesos de erosión,

que se agravan con actividad antrópica en áreas urbanas con topografía montañosa, zonas deforestadas y material susceptible a la erosión (Suárez, 2009).

Específicamente en taludes de quebradas, la formación de cárcavas se produce donde existen descargas de agua en un área susceptible donde la población carece de sistema de alcantarillado, sumideros para aguas lluvias o poca capacidad de estos. La posibilidad de una inestabilidad en un talud de zona de quebrada se incrementa además por la falta de sistemas de colectores de agua en las coronas de los taludes junto a áreas urbanizadas, ejecución inadecuada de rellenos, disposición inadecuada de basura sobre los taludes y remoción de la vegetación. Esto puede generar deslizamientos los cuales progresan ladera arriba (Suárez, 2009).

Al momento de generarse un sismo en zonas con taludes de alta susceptibilidad, se pueden generar desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujo de suelos y avalanchas debido a un incremento en los esfuerzos de corte, además dependerá de las características intrínsecas del talud como es su litología, topografía, propiedades geotécnicas, la cobertura y uso del suelo, como también la magnitud del disparador y la distancia al epicentro (Cuanalo C. et al., 2006). En consecuencia, es importante determinar las zonas con mayor probabilidad en cuanto a la ocurrencia de movimientos en masa y bajo qué tipo de condiciones sísmicas para evitar el impacto a infraestructuras ubicadas cerca de bordes de quebrada. El Método de Desplazamientos de Newmark, es un método útil para calcular la magnitud de los desplazamientos en un talud por la ocurrencia de un sismo ya que integra la Aceleración Crítica que es la cantidad de aceleración necesaria para reducir el FS a 1 y que se genere un movimiento en masa. Zapata, (2018), menciona que, en el contexto geodinámico de Quito, la distancia de epicentro del sismo a la ciudad es importante, ya que en sismos cercanos reflejaría una mayor amenaza por deslizamientos inducidos por sismos, de igual manera, el nivel

de amenaza es más alto en condiciones de suelos saturados propias de las estaciones lluviosas, comparado con condiciones de no saturación en estaciones secas.

El crecimiento urbano no planificado ha generado problemas dentro de las quebradas, ya que, al impermeabilizar las áreas cercanas y ubicar puntos de descarga de aguas servidas generan un aumento del caudal propio de la quebrada causando erosión al pie del talud. Igualmente, al ubicar viviendas dentro del borde de la quebrada se generan sobrecargas, estos factores causan un incremento en los esfuerzos de corte, provocando la inestabilidad del talud y posteriormente la generación de movimientos en masa, situación que se agrava con la posibilidad de ocurrencia de un evento sísmico.

1.3.2. Justificación Metodológica.

La metodología utilizada en el estudio técnico para la zonificación de la amenaza es un método basado los criterios de Newmark e Intensidad de Arias.

Newmark en el año de 1965 fue uno de los primeros investigadores en proponer un modelo para estimar el efecto de terremotos en taludes. Basándose en asumir que el cuerpo de masa del talud que falla se moverá como un cuerpo rígido, desarrollando una resistencia a lo largo del plano inclinado deslizante.

“El análisis de Newmark se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace 15 años, recientemente se ha calibrado y comparando en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico” (Figueras et al., 2005).

Para el cálculo de los desplazamientos de Newmark se debe entender al FS como la relación entre la resistencia al corte de un talud (R_{max}), dividido por el esfuerzo cortante (L) (Suárez, 2009).

$$FS=R_{max}/L$$

Ecuación 1. Factor de Seguridad.

Al ser una relación directamente proporcional se tienen 3 posibles casos: Cuando R_{max} es mayor a L , el talud se encuentra en equilibrio. Si R_{max} es menor a L , el talud se encuentra inestable existiendo la posibilidad de un deslizamiento. Mientras que, si R_{max} es igual a L , es decir con un $FS=1$, el talud se encuentra en un estado crítico el cual podría cambiar con un aumento en la carga (aumento en L) o disminución en la R_{max} .

En cambio, la Aceleración Crítica, al momento de generarse un movimiento sísmico las ondas que pasan por el talud generan un campo de aceleraciones (a) provocando una fuerza cambiante e incrementando la carga hacia abajo del talud. Si la fuerza sísmica es bastante grande la carga total estaría representada de la siguiente manera $L+m.a$, donde m es la masa de un deslizamiento probable (Figueras et al., 2005). Entonces la Aceleración Crítica es la mínima aceleración que puede tener un suelo para cambiar su $FS=1$ por lo tanto se considera una medida de estabilidad del talud y representa la susceptibilidad de ocurrencia para la generación de un deslizamiento inducido por sismo (Figueras et al., 2005).

La Intensidad de Arias es una medida de la intensidad del terremoto dada por la integración de las aceleraciones al cuadrado a lo largo del tiempo y está relacionada con el contenido de energía de la señal registrada. Se ha demostrado que es un predictor eficaz del potencial de daño sísmico en relación con estructuras de período corto, licuefacción y estabilidad sísmica de taludes. (Hsieh &

Lee, 2011). Jibson, (1993) sugirió usar la Intensidad de Arias, porque mide la aceleración total del registro en lugar de solo el valor pico, por lo que proporciona una caracterización más completa del contenido de agitación de un registro de movimiento fuerte.

Para el cálculo de los desplazamientos de Newmark se puede utilizar información como la geología, propiedades geotécnicas y el disparador sísmico que son integrados como archivos tipo ráster en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su procesamiento.

“El método de Newmark trata un deslizamiento de tierra como un cuerpo de plástico rígido; es decir, la masa no se deforma internamente, no experimenta ningún desplazamiento permanente en las aceleraciones por debajo del nivel crítico o de fluencia, y se deforma plásticamente a lo largo de una superficie de cizallamiento basal discreta cuando se excede la Aceleración Crítica. Por lo tanto, el método de Newmark se aplica mejor a deslizamientos de bloques traslacionales y asentamientos rotacionales” (Jibson, 1993).

Finalmente, la metodología de Desplazamientos de Newmark ya ha sido aplicada con éxito dentro de DMQ por Benítez, (2018); Merino, (2018), en la zona de Atucucho y el barrio Atacaba, permitiendo zonificar las zonas con mayor peligrosidad a la generación de movimientos en masa teniendo como disparador un sismo. De igual manera Zapata, (2018), en su trabajo regional del DMQ sugiere que se debe realizar más estudios con respecto al comportamiento de los taludes a la presencia de un sismo.

1.3.3. Justificación Práctica

“La amenaza es una condición con el potencial de causar una consecuencia indeseable” Suárez, (2009), por lo que la generación de un mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa en los taludes dentro de la Quebrada Carretas, permitirá generar una herramienta útil para

tomar decisiones en zonas con mayor peligrosidad. De esta manera los resultados de este aportan también a la prevención de futuros impactos en la población que se encuentra cercana a los bordes de la quebrada, en función del crecimiento urbano observado.

1.4.Hipótesis

La amenaza por movimientos de masa en los taludes de una quebrada, integrando las características geológicas y los aspectos antrópicos, puede ser calculada con la aplicación de la metodología de los desplazamientos de Newmark.

1.5.Objetivo General

Realizar la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en un tramo de 1.5 km de la Quebrada Carretas, utilizando el método de Desplazamientos de Newmark e Intensidad de Arias para el análisis del nivel de peligrosidad de inestabilidad de los taludes.

1.6.Objetivos Específicos

- Realizar mapeo geológico y levantamiento litoestratigráfico en afloramientos a lo largo de 1.5 km de los taludes de la Quebrada Carretas a través del trabajo de campo.
- Determinar las características geomecánicas de las unidades geológicas a través de la recolección y análisis de datos existentes de perforaciones o datos geotécnicos representativos de la zona.
- Realizar un mapa inventario de movimientos en masa y el análisis de los cambios morfológicos en el cauce de la quebrada a través de la fotointerpretación de imágenes satelitales, fotomosaicos e imágenes de vuelo de un Vehículo Aéreo no Tripulado.

- Obtener el modelo digital de elevación, MDE, de los 1.5 km de la Quebrada Carretas a través del procesamiento de imágenes obtenidas con vuelo de un Vehículo Aéreo no Tripulado.
- Aplicar la metodología de desplazamientos de Newmark para calcular la Aceleración Crítica utilizando la integración del modelo de terreno con los datos geológicos y geotécnicos existentes a través de un SIG y los desplazamientos al integrar la Intensidad de Arias a través de un acelerograma tipo para la zona de estudio.
- Realizar un mapa de zonificación de la susceptibilidad (Aceleración Crítica) y amenaza por movimientos en masa en los taludes a lo largo de la quebrada a escala 1:10 000, calibrarlo con el inventario de movimientos en masa y la evolución del crecimiento urbano para un análisis integral de los resultados obtenidos.

1.7.Alcance

El presente estudio propone varios mapas de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en los taludes de la Quebrada Carretas dentro de la zona de estudio, mediante el uso de datos geotécnicos, mapa geológico y levantamiento litoestratigráfico. Esto servirá como base para el Municipio del DMQ, tome decisiones acertadas en la mitigación del riesgo y salvaguardar el bienestar de las familias aledañas a la Quebrada Carretas o que se encuentran en zonas inestables, así como mejorar la planificación territorial de manera adecuada.

Capítulo 2. MARCO CONCEPTUAL

2.1.Marco Regional

El Ecuador está ubicado en el Continente Sudamericano, entre las latitudes 2°N – 4°S, se encuentra afectado por la dinámica de subducción de la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana desde el Jurásico Tardío (Ego et al., 1996), que subduce a una velocidad de 60 mm/año en sentido Este-Oeste (Trenkamp et al., 2002). Los procesos de subducción y acreción de terrenos en el Ecuador han conformado ocho divisiones morfo-tectónicas: Costa, Cordillera Occidental, Valle Interandino, Cordillera Real y Bloque Amotape Tahuin, Cuenca Oriente, Zona Subandina y Cuenca Alamor-Lancones. Estas divisiones han sido originadas por la interacción geodinámica entre placas (Litherland et al., 1994).

Dentro de la Placa Nazca se origina la cordillera asísmica de Carnegie, cuyo origen se da por el movimiento hacia el Este de la placa sobre el Host Spot Galápagos. La llegada de esta cordillera es de discusión en la comunidad geocientífica ya que, para Pennington, (1981) y Lonsdale, (1978) la llegada fue hace 1Ma y para Spikings et al., (2001) fue entre 9 y 15 Ma. Sin embargo, los autores concuerdan que la llegada de la cordillera de Carnegie tendría un efecto en la actividad sísmica, volcánica y deformación. Además, proponen que sería la causante de la migración del Bloque Nor-Andino (BNA) con una dirección NNE (Witt et al., 2006). Incluso otros autores como Egbue y Kellog, (2010), proponen que la migración se debe a la convergencia oblicua de las placas.

El BNA tiene un desplazamiento de 9 mm/año (Yepes et al., 2016) en un movimiento dextral a través de fallas regionales, que se extienden desde el golfo de Guayaquil y llegan hasta Venezuela. Las fallas corresponden en un sentido de sur a norte: Puna, Pallatanga, Cosanga y Chingual - La Sofia en el límite de Ecuador, correspondiendo al límite Oeste del BNA y formando una banda

compresiva (restraining bend) donde dio origen al Valle Interandino (Lavenu et al., 1995; Ego et al., 1996; Winkler et al., 2005).

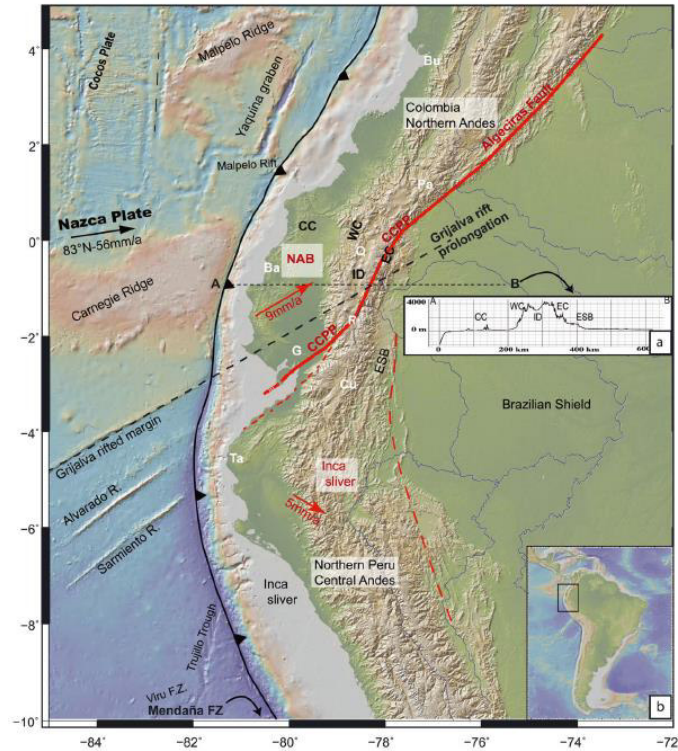


Figura 2.1 Contexto geodinámico del Ecuador (Tomado de Yepes et al., 2016).

2.2. Valle Interandino

Entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real se encuentra una depresión tectónica conocida como el Valle Interandino (VIA), posee un rumbo N – S a NNE – SSW con aproximadamente 25 km de ancho y 300 km de largo, al norte desde el Chota hasta el sur en la zona de Alausí (Winkler et al., 2002).

Los límites estructurales del VIA están coligados a las principales fallas de la Cordillera Occidental y Real que son el producto de la acreción de terrenos oceánicos y continentales que empiezan desde el Mesozoico. Las fallas son: Falla Pallatanga, Falla de Calacalí y Falla Peltetec.

Existen cuatro modelos que representan la evolución tectónica del VIA. El primer modelo refiere a la formación del VIA, como producto de procesos tectónicos extensivos E-W de edad Mio – Plioceno (Hall y Yepes, 1980; Winter, 1990). El segundo modelo consiste en una cuenca de piggyback, en el cual la deformación presente en el VIA se debe a movimientos de transpersión y transtensión (Tibaldi y Ferrari, 1992). Estudios actuales como Winkler et al., (2005), mejoran el modelo de evolución del Valle Interandino, integrando datos cronoestratigráficos, proponiendo una cuenca de tipo full ramp en un período de altas tasas de exhumación de las Cordilleras Real y Occidental. Además, describen detalladamente las características de las cuencas que se encuentra en los siguientes segmentos: 1. Cuenca del Chota entre el segmento Ibarra y Tulcán, 2. Cuenca Quito - San Antonio - Guayllabamba, 3. Ambato - Latacunga y 4. Riobamba Alausí.

2.3.Estratigrafía de la Cuenca Quito - San Antonio - Guayllabamba

La Cuenca Quito - San Antonio Guayllabamba, es producto de un sistema tectónico de media rampa (Winkler et al., 2005). La cuenca se elevó durante el Plioceno y evolucionó en sentido E – W (Villagómez, 2003), evidencia de este levantamiento son las fallas sinsedimentarias normales con un rumbo N-S. En el transcurso de la deposición de la Formación (Fm) Guayllabamba, sucedió un periodo de compresión cuyo sentido es E – W, ocasionando la formación del pliegue Calderón-Catequilla. Mientras se depositaba la Fm. Chiche, posiblemente disminuyó la compresión, pero se reinició a los 5 Ma con la actividad de las fallas Quito Botadero (Lavenue et al., 1996; Winkler et al., 2005). A continuación, se presenta un resumen de la estratigrafía de la cuenca:

Formación Pallatanga (Basamento). - Esta unidad está constituida por gabros y microgabros a lo largo del río Guayllabamba, además conforma el basamento del Valle Interandino, edad: Santoniano (Villagómez, 2003).

Formación Pisque. - Dividida en miembro superior e inferior por Villagómez, (2003), el miembro inferior consiste en una base de lavas basálticas andesíticas, mientras que el miembro superior está conformado por facies aluviales, tobas y lahares de gran potencia, además la Fm. Pisque es el sustrato de la cuenca Quito – Guayllabamba, edad: Plioceno.

Formación San Miguel. - Dividido por Villagómez, (2003) en dos miembros: Mb. San Miguel y Mb. Lacustre San Miguel mientras que, Winkler et al., (2005) describe toda la Fm. San Miguel como una secuencia de volcánicos en tobas con depósitos lacustres, edad: Pleistoceno inferior.

Formación Guayllabamba. - Según Winkler et al., (2005) está formada por flujos piroclásticos, avalanchas y flujos de lavas durante un período compresivo de un gran volcanismo, edad: Pleistoceno medio.

Formación Chiche. – Villagómez, (2003) propone una división en miembros de la siguiente manera:

Mb. Fluvio Lacustre I: Constituida por limolitas, tobas, micro conglomerados y niveles arenosos finos, Mb. Lahar: Consiste de flujos de lodo.

Mb. Fluvio Lacustre II: Son limolitas tobáceas blancas, diatomitas y areniscas grises.

Mb. Chiche: Conglomerados, areniscas intercaladas con tobas, edad: Pleistoceno medio.

Formación Mojanda. - Está constituida por lahares ricos en líticos andesíticos y debris flow que contienen bloques dacíticos y andesíticos, edad: Pleistoceno medio.

Formación Cangahua. - Son depósitos jóvenes de coloración amarillento y marrón, se subdividen según su grado de consolidación y la posición estratigráfica de Cangahua en Unidad A, B, C. Se

encuentra cubriendo gran parte del Valle Interandino y consiste principalmente de tobas alteradas intercaladas con caídas de ceniza, pómez, paleosuelos y menormente flujos de lodo y canales aluviales, edad: Pleistoceno superior (Villagómez, 2003).

2.4.Geología Local

Valverde, (2004), realiza un estudio geológico – geotécnico en la zona de estudio, por medio de 10 perforaciones dentro de las zonas de mayor inestabilidad y posibles zonas de relleno. En la zona comprenden depósitos volcánicos del cuaternario, correspondientes a varios episodios de caídas de piroclastos como tefras, tobas, y pómez. Los mismos que se hallan dispuestos de manera subhorizontal y alternados con potentes capas de Cangahua. Los espesores dentro de la zona definen una actividad volcánica alta por el espesor de las capas de tefras. En la parte superior se localizan depósitos de relleno antropico, el cual pudo ser producto de excavaciones y construcción de las viviendas preexistentes, ver Figura 2.2.

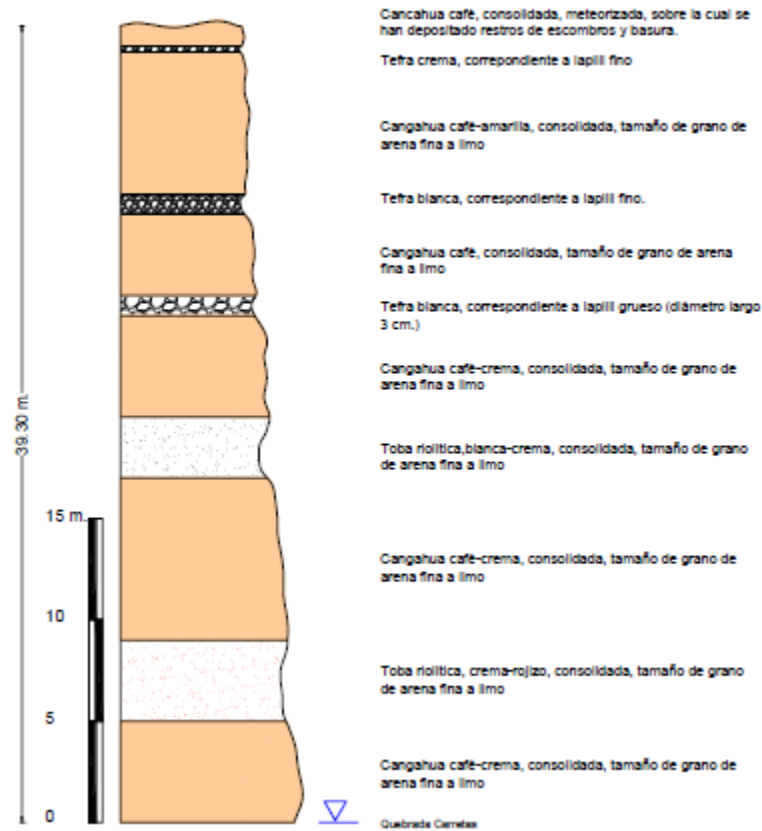


Figura 2.2 Estratigrafía de la Quebrada Carretas (Tomado de Valverde, 2004)

Valverde, (2004) identifica 3 unidades geológicas: Depósitos volcánicos, Depósitos recientes y Rellenos.

Depósitos volcánicos

Dentro de esta unidad geológica se pueden diferenciar estratos subhorizontales de origen volcánicos provenientes de varios eventos tanto explosivos como de caída. Esta secuencia presenta una potencia aproximada de 60 m y está constituida predominantemente por gruesos estratos de Cangahua intercalados con tobas ácidas, tefras y cenizas finas de composición riolítica. Esta

unidad ocupa la mayor superficie del área de estudio, aflorando claramente en los flancos de la Quebrada Carretas (Valverde, 2004).

Depósitos recientes

Esta unidad geológica está constituida por materiales que han sido depositados por procesos geológicos superficiales recientes, tales como la sedimentación ocasionada por las aguas de la Quebrada Carretas y procesos morfodinámicos (deslizamientos, caídas, desprendimientos). Su litología varía de acuerdo al material expuesto a dichos procesos, con predominio de coluviales y sedimentos finos como arenas y limos. Esta unidad está expuesta en las partes bajas del valle de la quebrada (Valverde, 2004).

Rellenos

Esta unidad está constituida por escombros y materiales aledaños que han sido reubicados con el fin de rellenar la antigua quebrada ubicada al oriente de la ciudadela, y además aprovechar el uso del terreno a lo largo del borde occidental de la ciudadela. Esta unidad forma cuerpos longitudinales que tienden a nivelar el relieve para ser utilizado por la población, sin embargo, es evidente que durante su proceso de depositación antrópica y relleno han ocurrido eventos de asentamiento y consolidación parcial, lo que ha originado que produzca un desnivel, principalmente en el extremo oriental de la ciudadela (Valverde, 2004).

2.5. Conceptos Generales

Amenaza

La amenaza representa un peligro asociado a fenómenos físicos de origen natural o antrópico, que podría desencadenar en un evento potencialmente desastroso causando muerte o lesiones, daños

materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental, estos eventos tienen una probabilidad de ocurrencia en un sitio específico y en un tiempo determinado (Cardona, 1993).

Amenazas Naturales

Las amenazas naturales se pueden clasificar según su origen en: geológicas (sismos, tsunamis, actividad volcánica), hidrometeorológicas (inundaciones, tormentas tropicales, sequías) o biológicas (epidemias). Estos fenómenos amenazantes pueden variar en magnitud o intensidad, frecuencia, duración, área de extensión, velocidad de desarrollo, dispersión espacial y espaciamiento temporal (UNISDR, 2009).

Amenazas Geológicas

Son procesos o fenómenos naturales terrestres. La amenaza geológica incluye procesos terrestres internos (endógenos) o de origen tectónico, tales como sismos, tsunamis, actividad de fallas geológicas, actividad y emisiones volcánicas; así como procesos externos (exógenos) tales como movimientos en masa. Las amenazas geológicas pueden ser de naturaleza simple, secuencial o combinada en su origen y efectos (UNISDR, 2009).

2.6.Movimientos en Masa (MM)

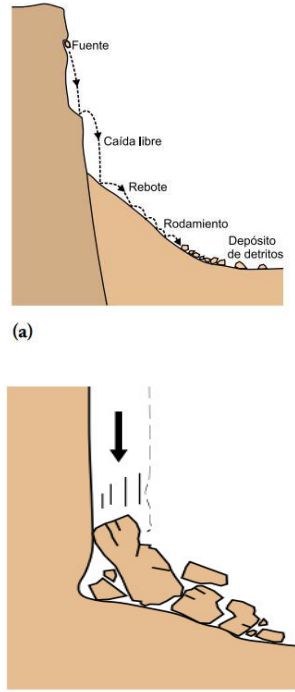
Los MM son el resultado de la convergencia de distintos elementos entre ellos la configuración morfológica y la evolución de las laderas presentan un papel decisivo (Aristizábal E. et al., 2010). Cruden, (1991) define a los movimientos en masa como todo aquel movimiento ladera abajo de una masa de roca, detritos o tierra por efecto de la gravedad.

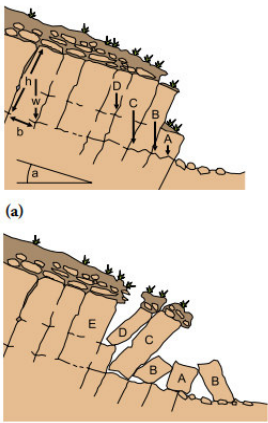
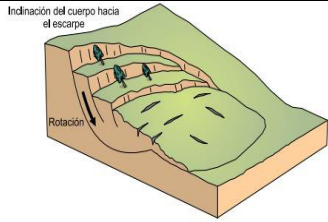
Además, los MM son el resultado del debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales de las laderas por procesos naturales como la meteorización, levantamiento tectónico y actividades humanas. Un sismo se considera como un estímulo externo que genera una respuesta casi inmediata sobre movilizar los materiales de la ladera ya sea por un incremento en los esfuerzos de corte o por la reducción de la resistencia.

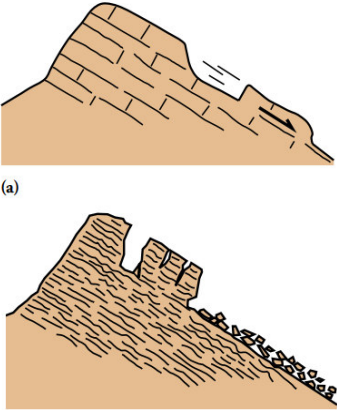
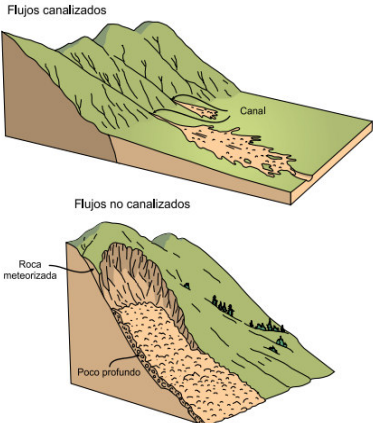
Los movimientos en masa presentan una gran complejidad y variedad al momento de clasificarlos ya que presentan diferentes comportamientos a lo largo de su trayectoria. Son procesos que cambian el relieve de la Tierra, se originan por procesos exógenos naturales o inducidos.

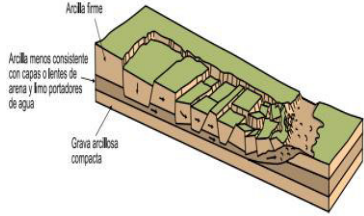
Cruden y Varnes, (1996), presentan una clasificación en base al tipo de movimiento y el material involucrado que se detallan en la siguiente Tabla 2.1:

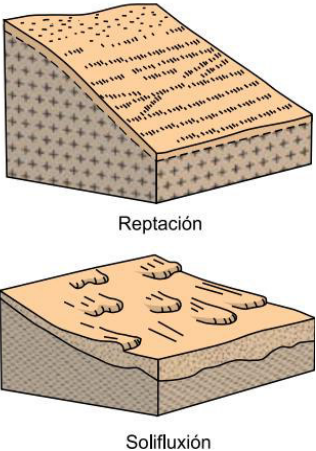
Tabla 2.1 Clasificación de los movimientos en masa según Cruden y Varnes, (1996).

Tipo	Definición	Observaciones	Ilustración
Caída	Separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie sobre la cual se puede presentar o no desplazamiento por cortante. Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o	Rápido a extremadamente rápido (3 m/min y a 5 m/s).	 <p>(a)</p> <p>(b)</p>

	rodando. Cruden y Varnes, (1996).		Figura 2.3 (a) Esquema de la caída de rocas (b) Corominas y Yagué, (1997) denominan a este movimiento “colapso”. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, (2007)
Volcamiento	Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996).	Pueden ser de 3 tipos: <ul style="list-style-type: none"> • Volcamiento de bloques de roca, delimitados por discontinuidades preexistentes. • Volcamiento de bloques aislados liberados por tensión. • Volcamiento de detritos. 	 <p>(a)</p> <p>(b)</p>
Deslizamiento	Este tipo de desplazamiento como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte.	Deslizamiento rotacional (Tipo hundimiento): la superficie de rotura es curvada y cóncava y la falla no está controlada estructuralmente. Deslizamiento rotacional retrogresivo: En razón de que el escarpe adyacente a la corona de un deslizamiento rotacional	 <p>Indinación del cuerpo hacia el escarpe</p> <p>Rotación</p>

		<p>(hundimiento) es casi vertical y sin soporte.</p> <p>Deslizamiento traslacional planar</p> <p>En este tipo de movimiento la masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura planar la cual, además, puede ser escalonada.</p> <p>El deslizamiento traslacional en roca es, por lo general, estructuralmente controlado</p>	 <p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>Figura 2.6 (a) y (b) Esquema de un deslizamiento traslacional, llamado resbalamiento y corrimiento según Corominas Dulcet y García Yagué, (1997).</p>
<p>Flujo</p>	<p>El término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan.</p>	<p>Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas con una pendiente mayor. Se pasa en forma gradual de flujos de detritos a avalanchas de detritos que son movimientos extremadamente rápidos. Los flujos de detritos son a menudo de alta densidad, con más del 80 % de sólidos en peso, que exceden la densidad del concreto húmedo.</p>	 <p>Flujos canalizados</p> <p>Canal</p> <p>Flujos no canalizados</p> <p>Roca meteorizada</p> <p>Poco profundo</p> <p>Figura 2.7 Esquema de flujos canalizados y no canalizados, según Cruden y Varnes, (1996).</p>

<p>Propagación lateral</p>	<p>Este proceso se define como la extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida.</p>	<p>Propagación lateral en bloque</p> <p>Una masa rocosa subhorizontal, que cubre material más blando, se fragmenta en bloques grandes, provocando la extrusión del material blando por entre las fracturas, las cuales pueden rellenarse a presión por el material más disgregado. El movimiento en este caso es muy lento.</p> <p>Propagación lateral por licuación</p> <p>Un suelo blando y húmedo como arcilla sensitiva o limo cubierto por suelo firme experimenta licuación o fluye plásticamente, cuando pierde resistencia a causa de alguna perturbación que destruye su estructura. Este movimiento es más rápido que el anterior.</p>	 <p>Figura 2.8 Esquema de expansiones laterales, según Varnes, (1978).</p>
-----------------------------------	---	--	--

<p>Reptación</p>	<p>Se define como la deformación del terreno a esfuerzo constante que involucra el material no consolidado de la parte superior de las laderas.</p>	<p>Se clasifica en: Reptación estacional de suelos: afecta de manera intermitente la masa de suelo sometida a ciclos alternos de humedecimiento-secado o congelamiento-deshielo. Reptación continuo de suelos: comprende el movimiento continuo y muy lento del terreno, por debajo de la capa suelta sujeta a reptación estacional, debido a la fuerza de gravedad.</p>	 <p>Figura 2.9 Esquemas de reptación y soliflucción, según Corominas Dulcet y García Yagué, (1997).</p>
-------------------------	---	---	---

2.7.Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa

La ocurrencia de un movimiento en masa presenta alta incertidumbre por lo que es difícil la toma de decisiones, para disminuir esta incertidumbre, la zonificación de la amenaza nos permite evaluar y mejorar las decisiones que se tomarán en los proyectos. La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la clasificación de cada una de estas áreas de acuerdo al grado real o potencial de la amenaza (Suárez, 2009).

Para zonificar la amenaza generalmente se hacen cuatro suposiciones: 1) los deslizamientos ocurrirán en las mismas condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrogeográficas y climáticas que en el pasado; 2) las condiciones principales que causan el deslizamiento son controladas por factores físicos identificables; 3) El grado de peligro puede ser evaluado; y 4) todos los tipos de fallas de pendiente pueden ser identificadas y clasificadas. Además, para zonificar la amenaza utilizan métodos cualitativos y cuantitativos (Aleotti y Chowdhury, 1999).

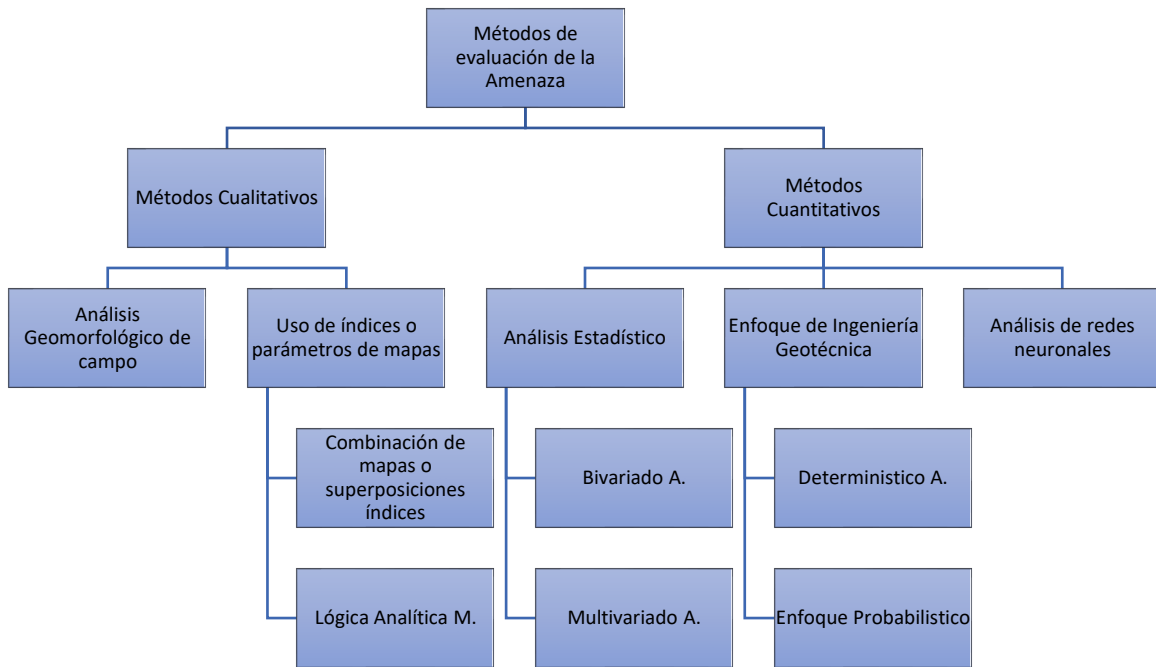


Figura 2.10 Clasificación de métodos de evaluación de la amenaza (Tomado y modificado de Aleotti y Chowdhury, 1999).

2.8.Ubicación y Acceso.

La Quebrada Carretas se encuentra ubicada en el límite de las parroquias Carcelén y Calderón en el norte del Distrito Metropolitano de Quito, el área de estudio abarca 1.5 km que empieza desde la intersección de las Av. Simón Bolívar y la Av. Capitán Geovanni Calles hasta el redondel Carretes. El acceso a la Quebrada Carretas es muy limitado por la morfología de está. Pero se puede observar desde inmediaciones cercanas por la calle Galo Plaza Lasso que se encuentran viviendas afectadas por la erosión de la Quebrada Carretas.

2.9.Población

Los datos obtenidos para la parroquia Carcelén según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), 2010, se tiene un total de 152 242 habitantes, con una densidad poblacional de 1,92980 hab/m² y un total de viviendas de 40 986.

2.10. Hidrología

La Cuenca del río Monjas está marcada por zonas con intensas precipitaciones y zonas con un leve déficit hídrico; lluvias regionales que afectan las Cuenca Alta (con una cota de 3 000 hasta los 4 649 msnm) del río Monjas y lluvias (locales) en la Cuenca Media (2 500 hasta los 3 000 msnm) y Baja del río Monjas (1 840 hasta los 2 500 msnm); las que a pesar de ser escasas, pueden ser muy intensas en ciertos periodos de tiempo y generar flujos de lodos, escombros y movimientos en masa presentes en la Quebrada Carretas (Rivera, 2016).

En base a los datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía (INAMHI), la estación meteorológica cercana a la zona de estudio corresponde a Calderón con código M345 y coordenadas X: 786815 Y: 9989089. El promedio anual de precipitación corresponde 550 mm con valores altos de precipitación media mensual en los meses de Marzo (78,8 mm) y Abril (74,5 mm) (López, 2013).

Capítulo 3. MARCO METODOLÓGICO

La zonificación de la amenaza por movimientos en masa se realizó a través de la Metodología de Desplazamientos de Newmark, (1965). Es una técnica utilizada a nivel regional que puede ser implementada a nivel local como en el barrio Atacaba y en la zona de Atucucho (Merino, 2018; Benitez, 2018). Se utiliza el Factor de Seguridad, Aceleración Crítica e Intensidad de Arias, que son integrados mediante la ecuación propuesta por Hsieh y Lee, (2011), utilizando la Intensidad de Arias como un parámetro sísmico que dispara el movimiento en masa.

Para aplicar esta metodología es necesario utilizar un Sistema de Información Geográfica que permitirá integrar los factores como: La Geología, Geotécnia y el Modelo Digital de Elevación, obteniendo los mapas de zonificación. Se utilizó un software de licencia libre Qamntum-GIS 3.16.15 y el software SeismoSignal de licencia temporal para la obtención de la Intensidad de Arias.

Finalmente, la zonificación de la amenaza permitirá determinar zonas con una amenaza alta y muy alta, así ayudar a las instituciones públicas en posteriores estudios de la Quebrada Carretas y toma de decisiones. A continuación, se presenta un diagrama de flujo de la metodología aplicada.

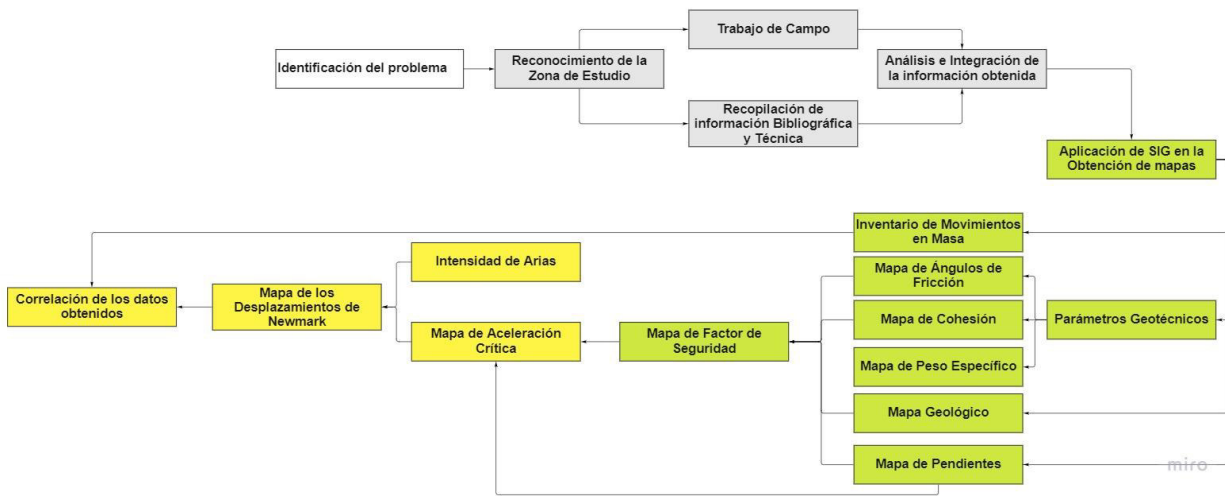


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología a implementar.

3.1. Estudios Previos

En la zona de estudio no existen trabajos previos en base al objetivo principal de este trabajo; sin embargo, se resume un estudio relevante a la metodología planteada.

Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra (Figueras et al., 2005).

El proyecto nace como una contribución ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya) y el CRECIT (Centre de Recerca en Ciències de la Terra) para la caracterización del riesgo sísmico en Andorra y consiste en evaluar la peligrosidad de deslizamientos inducidos por terremotos. Los principales detonantes de movimientos en masa en esta zona son dos, la lluvia y los sismos.

Los resultados del estudio de Keefer dan lugar a las siguientes conclusiones: a) el número de deslizamientos causados por sismos generalmente se incrementa con el incremento de la magnitud, aunque las condiciones geológicas locales y los parámetros sísmicos también han determinado el número de deslizamientos activados; b) las reactivaciones son más probables durante movimientos sísmicos que son más fuertes que los que causaron los deslizamientos pre existentes o durante un

terremoto que ocurrió donde pre-existían debido a otras causas y que son marginalmente estables;

c) los deslizamientos más abundantes activados por sismos han sido la caída de bloques, ruptura de deslizamientos en suelos y deslizamientos en roca. Las avalanchas de rocas y flujos rápidos de suelo son las dos principales causantes de muertes. Las áreas afectadas por los deslizamientos presentan una fuerte correlación con la magnitud del terremoto.

Consideraron los tres acelerogramas seleccionados se han calculado los desplazamientos de Newmark con las aceleraciones críticas respectivas, teniendo en cuenta que las aceleraciones máximas de los tres sismos tienen que cumplir la condición ($A_{max} > A_c$); necesaria para aplicar el método de Newmark, esta condición solo se cumple para pendientes de 40° .

3.2. Mapa Geológico

La realización de un mapa geológico es un instrumento que nos permite identificar la distribución espacial, características morfológicas de los depósitos que se encuentran en la zona de estudio. Se utilizó la información recopilada y observaciones de campo con el fin de definir las unidades litológicas presentes en la zona, pudiendo determinar la petrografía de los depósitos.

Finalmente se procesa la información obtenida con ayuda del software QGIS.

3.3. Parámetros Geotécnicos

Los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, pueden ser obtenidos mediante ensayos geotécnicos o en base a la información bibliográfica. En este trabajo se utilizará valores encontrados en la bibliografía que se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros Geotécnicos Referenciales.

Formación	Cohesión (Kg/cm²)	Ángulo de Fricción (°)	Peso Específico (T/m³)	Fuente
Cangahua	0,27	22,8	1,40	Jorge Valverde, 2004
	0,23	22,3	1,41	Jorge Valverde, 2004
	0,28	23,3	1,42	Jorge Valverde, 2004
	0,14	17,7	1,40	Jorge Valverde, 2004
	0,10	17,2	1,35	Jorge Valverde, 2004

Datos encontrados en el informe técnico realizado por Jorge Valverde, (2004) dentro de la Quebrada Carretas, que realizaron una campaña de exploración, que consistió en 10 pozos de perforación con una profundidad de 6m, adicionalmente tomaron muestras in situ para realizar ensayos de laboratorio.

Al tener distintos valores se procede a realizar un análisis estadístico sacando el Promedio, Max, Min, Desviación estándar de los datos recopilados y los resultados se representan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros Geotécnicos obteniendo su promedio, máximo y mínimo.

	Cohesión (kN/m²)	Ángulo (°)	Peso Específico (kN/m³)
Promedio	20,606	20,660	13,692
Max	27,459	23,300	13,930
Min	9,807	17,200	13,240
Desviación	8,214	2,957	0,266

Recopilados los datos, se procede a integrarlos en el software QGIS, agregando campos en la capa vectorial “Geología”, dentro de la tabla de atributos correspondientes a cada valor geotécnico.

3.3.1. Mapa de parámetros geotécnicos: Cohesión, Ángulo de Fricción y Peso Específico.

La generación de estos mapas se realiza en base a los datos de la Tabla 3.1, ya que se tiene una capa vectorial la cual cuenta con los valores geotécnicos de Cohesión, Ángulo de Fricción y Peso Específico, por lo que se procede a crear un ráster de cada valor geotécnico con la herramienta del software QGIS Rasterizar.

3.4. Mapa de Pendientes

El mapa de pendiente se obtiene a través del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona de estudio con una resolución de 0,2 m, realizado por campañas de sobrevuelo con un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) por parte del Instituto Geofísico junto con la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del DMQ. De igual manera se utilizó otro MDE con resolución de 2 m del proyecto Tomorrow's Cities. Se definió intervalos para las pendientes que se observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Clasificación de pendientes según el rango.

Intervalo	Rango
0° – 15°	Suaves
15° – 30°	Moderadas
30° – 45°	Fuertes
45°– 60°	Muy Fuertes

Finalmente, se utiliza la calculadora ráster para cambiar los valores de la pendiente de grados a radianes y posteriormente con la herramienta de Rasterizar, se crea el ráster con los valores de la pendiente en radianes.

3.5. Mapa del Factor de Seguridad

Para el cálculo del FS se utiliza la calculadora ráster combinando los mapas anteriormente obtenidos de los valores geotécnicos utilizando la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{SEC} t \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$$

Ecuación 2. Fórmula del FS en condición seca, (Tomado de Miles y Keefer, 2001).

En donde: cohesión (c'); ángulo de fricción interna (φ); pendiente de la ladera (θ); peso específico del material en condición seca (γ_{SEC}), Ancho de la superficie de falla ($t = 3$ (Miles y Keefer, 2001))

Una vez procesados los datos y obtenido el FS para las diferentes zonas dentro del área de estudio se procede a realizar una clasificación de acuerdo a la siguiente Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Grados cualitativos basados en el FS (Tomado de Ávila et al., 2016).

Grado de susceptibilidad	FS
Bajo	0 - 1,1
Moderado	1,1 – 1,5
Alto	> 1,5

3.6. Mapa de Aceleración Crítica

Newmark, (1965) menciona que la Aceleración Crítica es un valor que está en función del FS y la geometría del terreno, y está dada por la siguiente ecuación:

$$a_c = (FS - 1) \times g \times \sin \theta$$

Ecuación 3. Fórmula Aceleración Crítica.

En donde: aceleración de la gravedad (g) y pendiente de la ladera (θ). Utilizando la calculadora ráster en el software QGIS y la correcta implementación de los datos, se obtiene el mapa de Aceleración Crítica en función de la gravedad.

3.7. Intensidad de Arias

Para el presente estudio técnico se tiene que determinar las características sísmicas generales de la zona de estudio, esto en base a trabajos realizados dentro del DMQ. Alvarado et al., (2014) destaca que el DMQ está situado en una fuente sismogénica que contiene grandes sistemas de fallas como es el Sistema de Fallas de Quito y se esperan sismos de magnitud M_w 4.1 y M_w 6.9. En el trabajo realizado por Cañizares, (2017) se presenta una serie de sismos producidos en el DMQ y sismos internacionales que son compatibles con las condiciones geológicas. De esta manera se podrá simular acelerogramas espectrales de un movimiento sísmico por medio del software SeismoSignal en el cual indicará el valor de la Intensidad de Arias.

La velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}) es un parámetro para clasificar los suelos, corresponde al promedio de la velocidad de onda de corte (Schmidt, 2012). La clasificación de los suelos se evidencia en la siguiente Tabla 3.5:

Tabla 3.5 Clasificación del tipo de sustrato en base al V_{s30} (Tomado de Schmidt, 2012).

Tipo de suelo	Descripción	Definición V_{s30}
A	Roca Dura	$V_{s30} > 1500$ m/s
B	Roca	760 m/s $< V_{s30} < 1500$ m/s
C	Suelo muy denso y roca blanda	360 m/s $< V_{s30} < 760$ m/s
D	Suelo Duro	180 m/s $< V_{s30} < 360$ m/s
E	Suelo con arcilla blanda	$V_{s30} < 180$ m/s

León, (2018), en su trabajo proponen diferentes microzonas sísmicas del DMQ, para el área de estudio corresponde la microzona 6 denominada Cangahua Norte que presenta unos valores V_{s30}

de 320 a 550 m/s que corresponde a materiales compactos y competentes, además es una zona altamente influenciada por quebradas con drenajes profundos. Para la microzona de la red de quebradas en la parte norte del DMQ el río Monjas se asignó los valores de Vs30 de la microzona 6.

En base a los estudios realizados por Alvarado et al., (2014), el Sistema de Fallas de Quito presenta una estructura inversa cuyo buzamiento es de 45 grados hacia el Oeste, con un rumbo N-S a NE-SW, presentando estructuras superficiales como pliegues y flexuras en el límite oriental de la ciudad de Quito. Alvarado et al., (2014) refiere que el Sistema de Fallas de Quito tiene un acortamiento de 4 mm/año e identifica segmentos tectónicos que clasifica basándose en sus características geomorfológicas. Estos segmentos poseen una componente principal compresivo y una secundaria transcurrente dextral que son: Puengasí (P); Ilumbisí - La Bota (ILB); el segmento Carcelén-El Inca (CEI) y finalmente Bellavista Catequilla (BC).

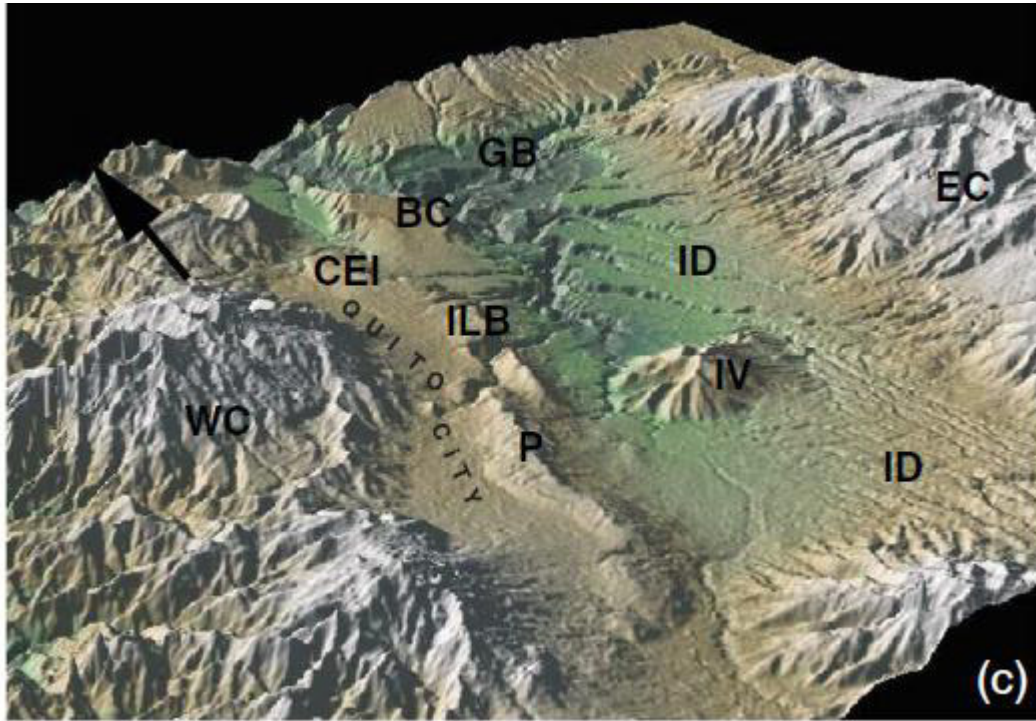


Figura 3.2. Vista tridimensional del Valle Interandino (Tomado de Alvarado et al., 2014).

Las condiciones sísmicas que se consideraron están relacionadas con la geología y el Sistema de Fallas de Quito, tomando como referencia los rangos de V_{s30} entre 360 – 600 m/s, M_w esperados en DMQ entre 5.7 – 6.9 y una distancia epicentral de 10 – 30 km desarrollados en un mecanismo inverso (Cañizares, 2017). Se seleccionaron dos sismos internacionales que se encuentran en la Tabla 3.6, compatibles con las características sísmicas del DMQ.

Tabla 3.6. Registro de sismos internacionales. R_{jb} : distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie. R_{rup} : distancia más cercana al plano de ruptura cosísmico. dt : duración del registro en segundos (Tomado de Cañizares, 2017).

N°	Sismo	Estación	Año	M_w	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	Tipo de Suelo	dt
1	Coalinga	Sulphur Barths_Tem	1983	5.7	9.7	12.1	C	0.005
2	Loma Prieta	San Jose-Sant. Ter	1989	6.9	14.1	14.7	C	0.02

Finalmente se simula los sismos dentro del software SeismoSignal para los sismos de la Tabla 3.4, adicionalmente se generaron los espectros de aceleración e Intensidad de Arias.

3.7.1. Cálculo de los Desplazamientos de Newmark.

Este mapa se obtiene de la integración de los mapas anteriores con el uso de la herramienta de algebra de mapas en el SIG y la aplicación de la siguiente ecuación que es propuesta por Hsieh y Lee, (2011), ecuación que es aplicable para todas las condiciones de sitio.

$$\log D_N = 0,847 \log I_a - 10,62 a_c + 6,587 a_c \log I_a + 1,84 \pm 0,295$$

Ecuación 4. Fórmula para el cálculo de los Desplazamientos de Newmark (Tomado de Hsieh y Lee, 2011).

Esto permitirá cuantificar y zonificar los desplazamientos de acuerdo con los siguientes parámetros: amenaza baja ($D_N < 1$ cm), amenaza moderada ($D_N = 1-5$ cm), amenaza alta ($D_N = 5-15$ cm), amenaza muy alta ($D_N > 15$ cm). Esto en base al estudio realizado por Jibson y Michael, (2009); Zapata, (2018).

3.8. Inventario de Movimientos en Masa y Calibración

La base de datos para el mapa de movimientos en masa se realiza mediante al análisis de ortofotomosaicos, así como observaciones en campo. Para calibrar la validez de la Metodología de Desplazamientos de Newmark se comparará el mapa de inventario de movimientos en masa con el mapa de Desplazamientos de Newmark, de esta manera se determinará si existe una correlación entre los mapas obtenidos, es decir si los movimientos en masa encontrados se ubican dentro de las zonas que tienen mayor FS y desplazamientos en caso de un movimiento sísmico.

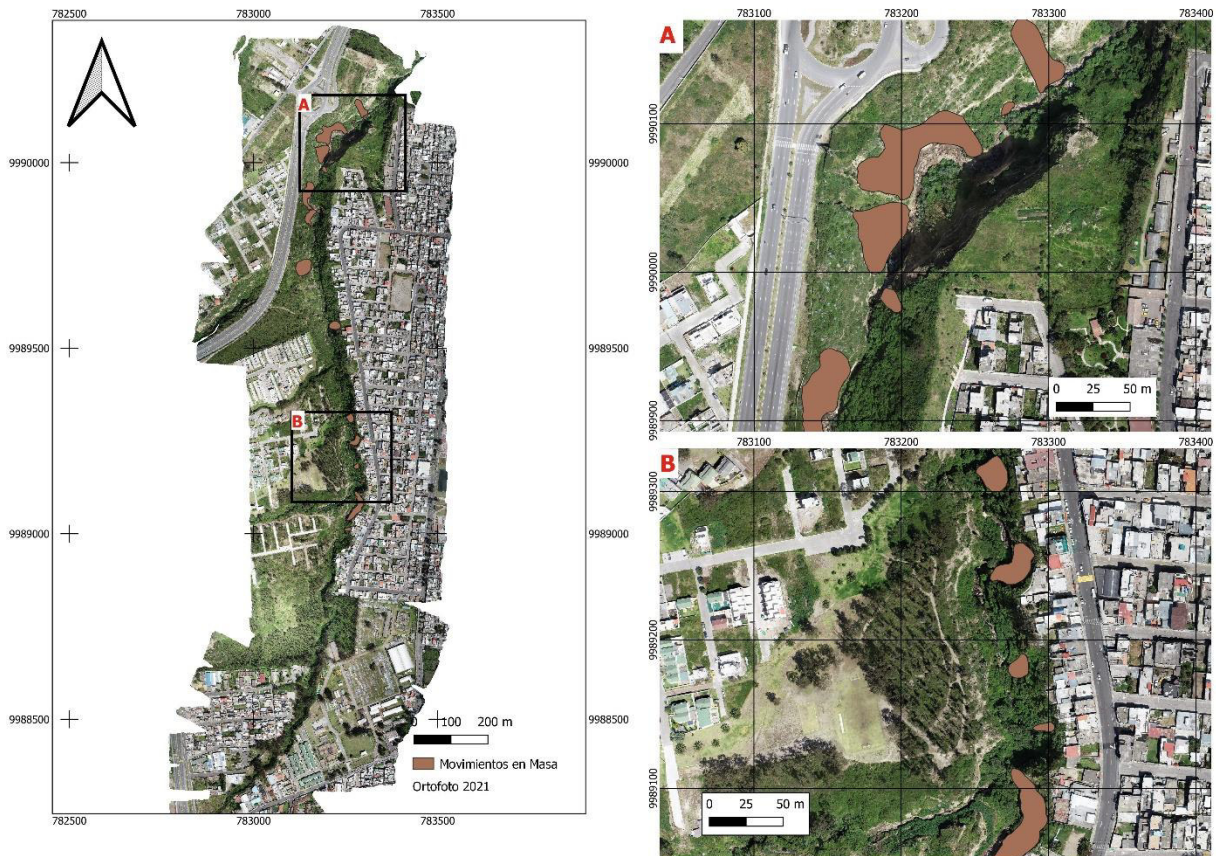


Figura 3.3 Mapa Inventario de MM.

Capítulo 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Metodología de Desplazamientos de Newmark, (1965), nos permite realizar la zonificación de la amenaza por MM, en base al comportamiento de la ladera dependiendo de los desplazamientos inerciales del terreno, que son producto de factores desencadenantes como lluvia o sismos. Estudios de Hsieh y Lee, (2011), evalúan la Metodología de Desplazamientos de Newmark integrando la Aceleración Crítica en un modelo pseudo estático e Intensidad de Arias, (1960).

El método de Newmark ha sido aplicado a escala regional por Chousianitis et al., (2016), pero también se aplicó en un estudio de comparación regional y local por Rodríguez et al., (2009), en el cual concluye que en escalas regionales los resultados pueden ser poco convenientes mientras que los resultados a escala local son más detallados.

4.1. Geología

- **Descripción de Unidades Mapeadas**

Zonas de Relleno: Zonas formadas por material retrabajado junto con material de origen antrópico (fundas plásticas, envases y escombros) exhibe una coloración gris, presenta clastos subangulares de tamaño centimétrico. Su espesor aproximadamente de 2m.

Cangahua: Es un suelo volcánico heterogéneo de color marrón y crema que cuenta con intercalaciones de cenizas volcánicas con un espesor aproximado de entre 2 a 4 m. La Fm. Cangahua presente en la zona de estudio se encuentra cubriendo en su totalidad el área que conforma la Quebrada Carretas.

El talud que se muestra en la Figura 4.1 corresponde al margen izquierdo de la Quebrada Carretas ubicado en la Av. Simón Bolívar en la redondel Carretes que corresponde al punto de observación de la Figura 1.1.

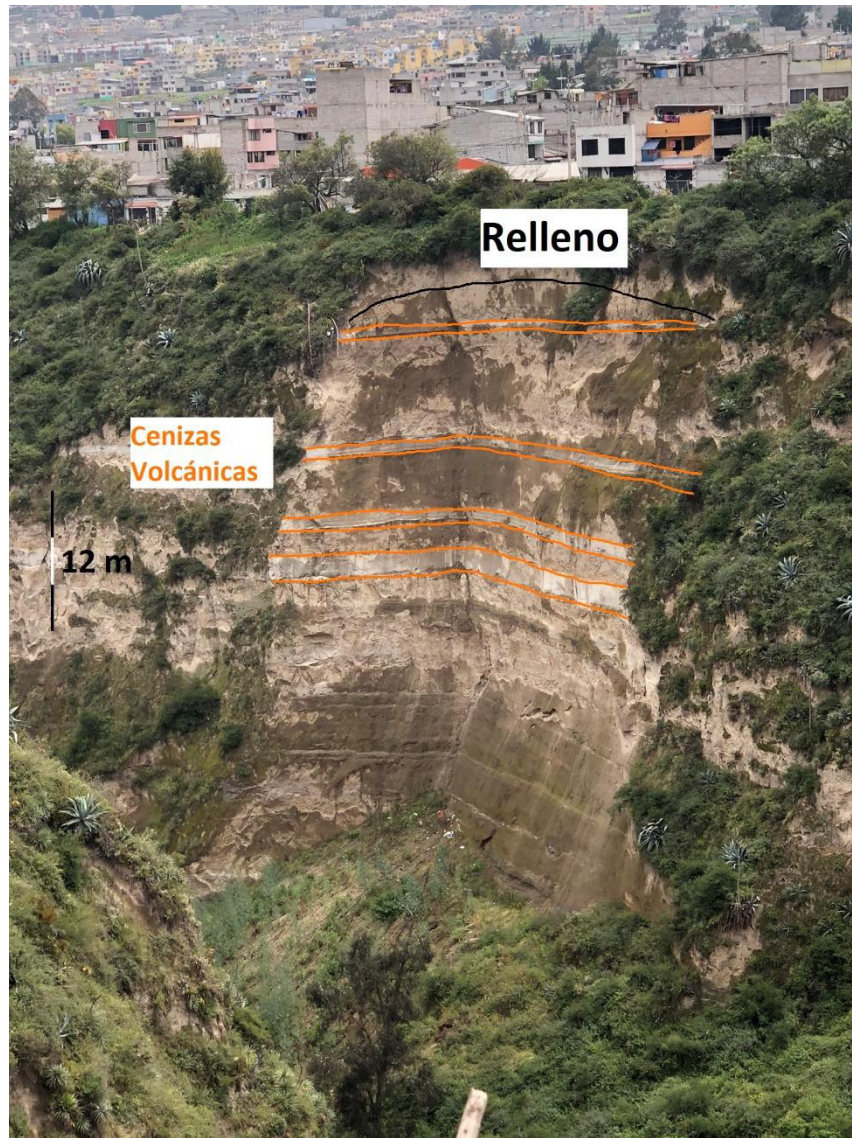


Figura 4.1 Afloramiento de las Fm. Cangahua que contiene capas de cenizas volcánicas dentro de la Quebrada Carretas 07-02-2022 (Coordenadas: UTM X:783296 Y:9990244).



Figura 4.2 Fotografía aérea tomada por VANT en donde se puede visualizar movimientos en masa dentro de la Quebrada Carretas marcados sus escarpes en color negro y las capas de cenizas volcánicas en naranja.

- **Mapa Geológico**

El mapa geológico es el resultado del trabajo de campo y la descripción de las litologías encontradas realizado en el mes de febrero y marzo de 2022, en el cual se indica en la Figura 4.3, en el mapa propuesto se representa la Fm. Cangahua en toda el área de estudio.

La litología que conforma la Quebrada Carretas se puede visualizar en los taludes de una altura aproximada de 60 m, lo que hizo imposible la toma de muestras en los afloramientos. Además se identificó las diferentes capas de cenizas volcánicas intercaladas dentro de la Fm. Cangahua, estas capas representan planos de debilidad dentro de la formación, las coordenadas de este punto se presentan en la Figura 4.1.

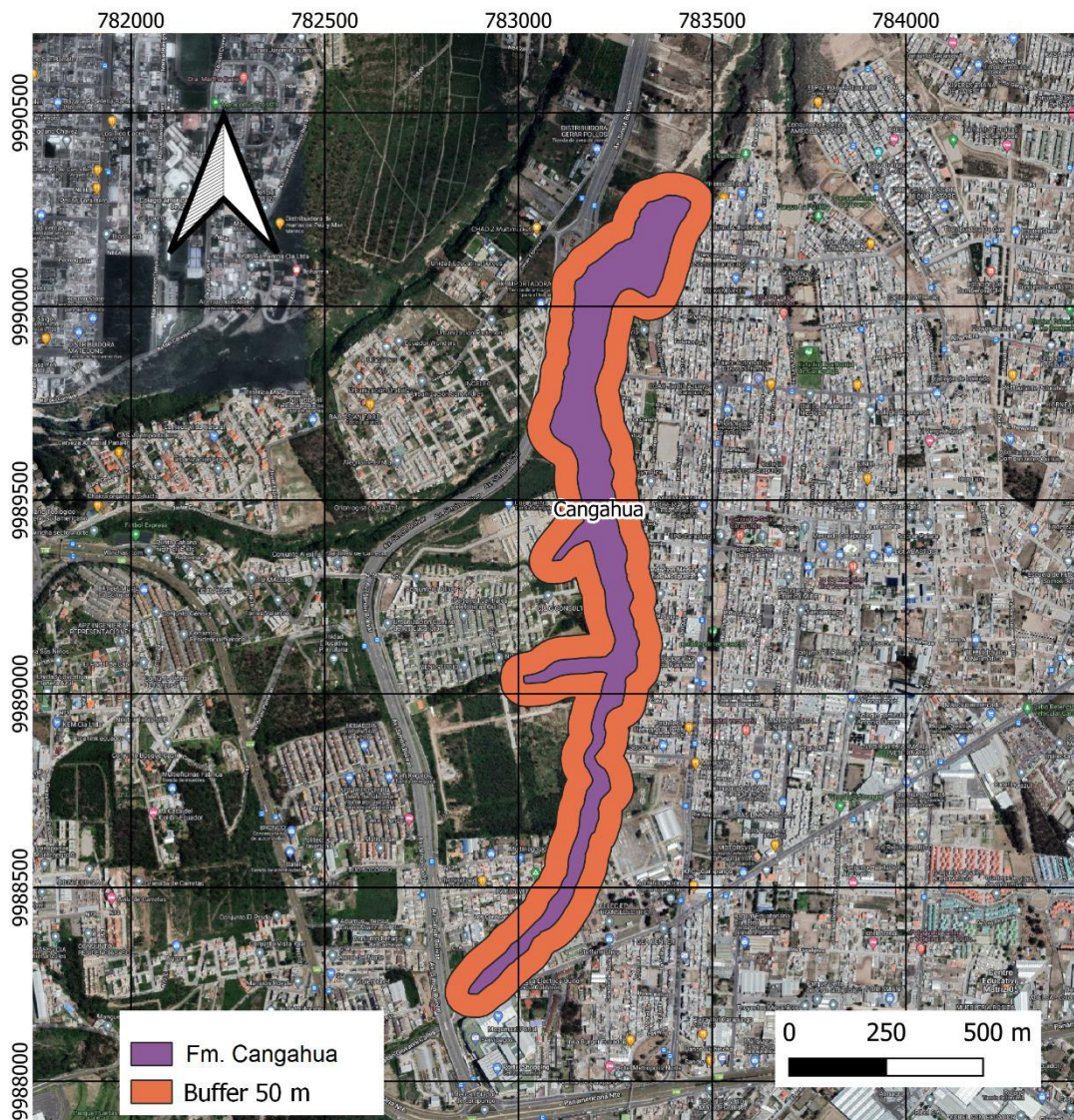


Figura 4.3 Mapa Geológico de la Quebrada Carretas, en naranja se muestra un buffer de 50m desde el borde de la Quebrada Carretas para identificar la amenaza en los alrededores de esta.

En la columna estratigráfica se identificó estratos intercalados de ceniza y pómez, se realizó una columna estratigráfica generalizada, y adecuo a criterio la unidad litológica con la que se elaboró el mapa geológico escala 1:15 000 de la zona de estudio.

4.2. Mapa de Parámetros Geotécnicos

En el procedimiento descrito en el capítulo anterior para la obtención de los mapas de dichos parámetros geotécnicos se asignaron los valores en función de la Tabla 3.1 que indican el grado de estabilidad de la unidad geológica y se puede visualizar en la Figura 4.4, además se realizó el mismo proceso para los MDE que se dispone en este trabajo.

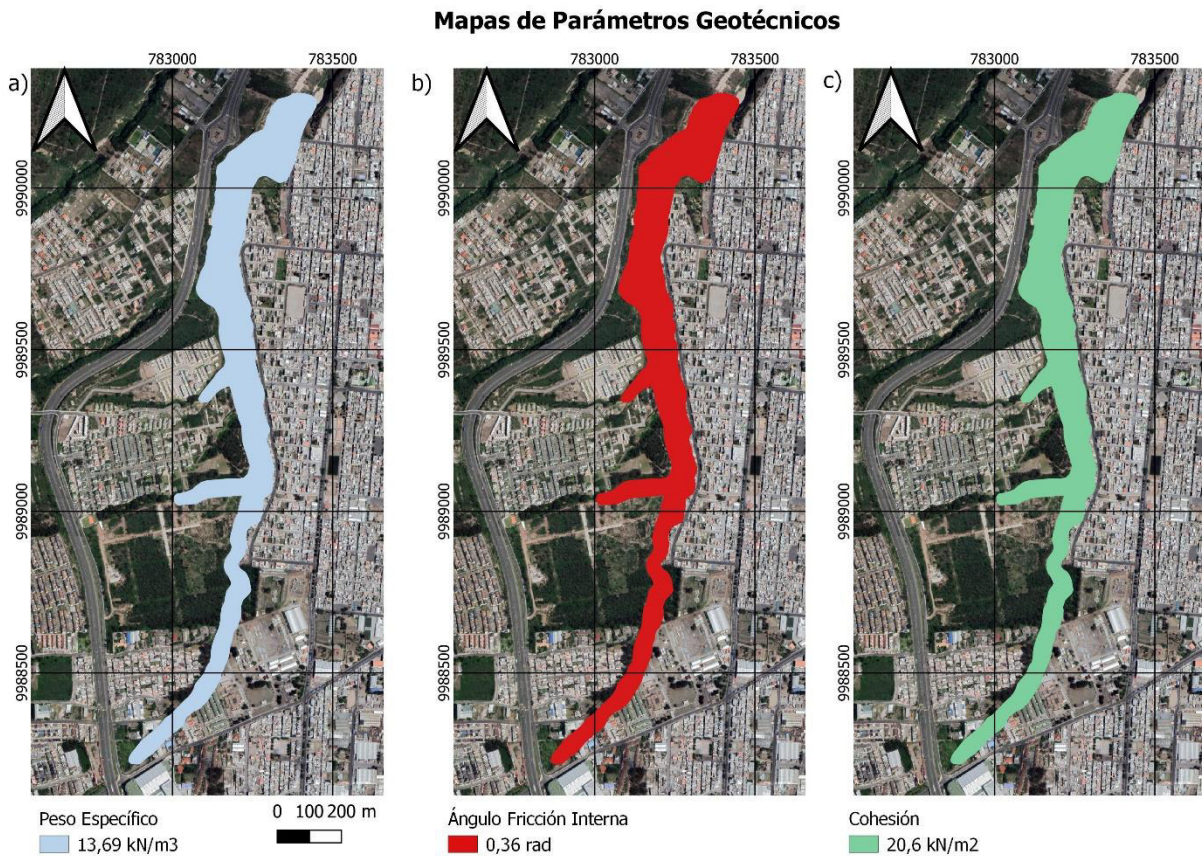


Figura 4.4 Mapa de Parámetros Geotécnicos: a) Peso Específico, kN/m³, b) Ángulo de Fricción Interna, rad c) Cohesión, kN/m².

4.3. Mapa de Pendientes

En el mapa de pendientes se utilizó herramientas de geoprocésamiento explicadas en el capítulo 3, en donde se muestran las zonas con pendientes suaves (0° - 15°), moderadas (15° - 30°), pendientes

fuertes ($30^\circ - 45^\circ$) y pendientes muy fuertes ($45^\circ - 60^\circ$). Dentro de la zona de estudio se poseen pendientes muy fuertes debido a los procesos erosivos que se han desarrollado dentro de la Quebrada Carretas. En la Figura 4.5 se representa las pendientes en radianes dentro de la zona de estudio, así como también su representación en el MDE de 0,2 m y 2 m respectivamente. El mapa se representa a una escala de 1:10 000.

Es importante mencionar que la vegetación juega un papel importante en la generación de estos mapas y posterior aplicación en el cálculo de los Desplazamientos de Newmark, ya que al utilizar MDE estos se ven afectados por la altura de la vegetación dando valores no favorables en el cálculo de las pendientes de la ladera. Como se puede ver en la Figura 4.5 en la parte sur se encuentran segmentos cortados en dirección W-E ya que se ve involucrada la vegetación.

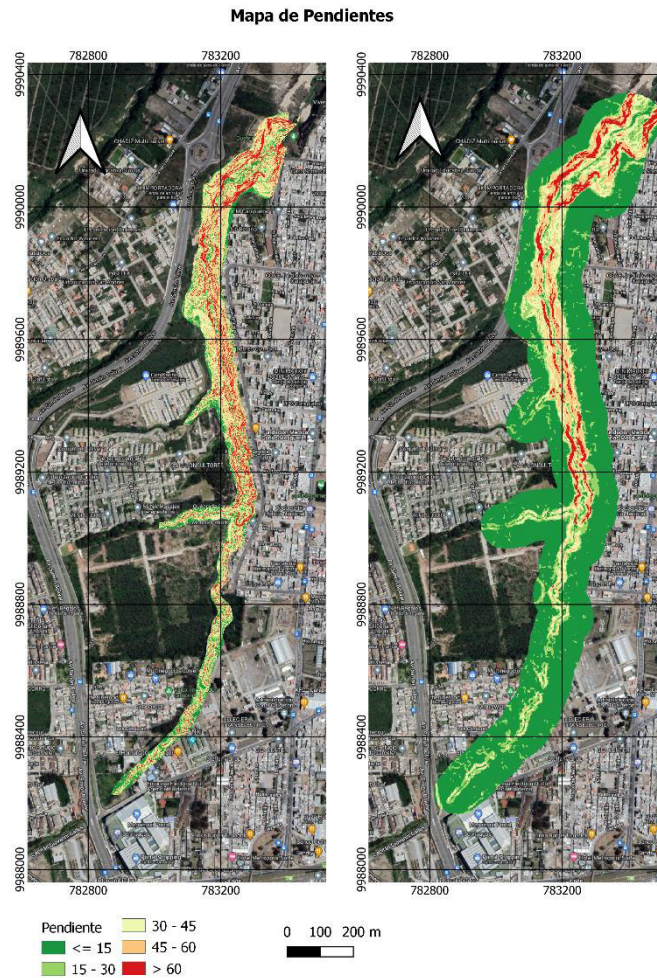


Figura 4.5 Mapa de Pendientes de la zona de estudio. Izq: MDE resolución 0,2m. Dcha: MDE resolución 2m.

4.4. Mapa de Factor de Seguridad

El FS es la relación entre la resistencia al corte y los esfuerzos cortantes, en la cual influyen las características geotécnicas que son la cohesión, el ángulo de fricción interna, peso específico y pendiente de ladera, además se clasifica cualitativamente en base a lo revisado en el trabajo de Ávila et al., (2016).

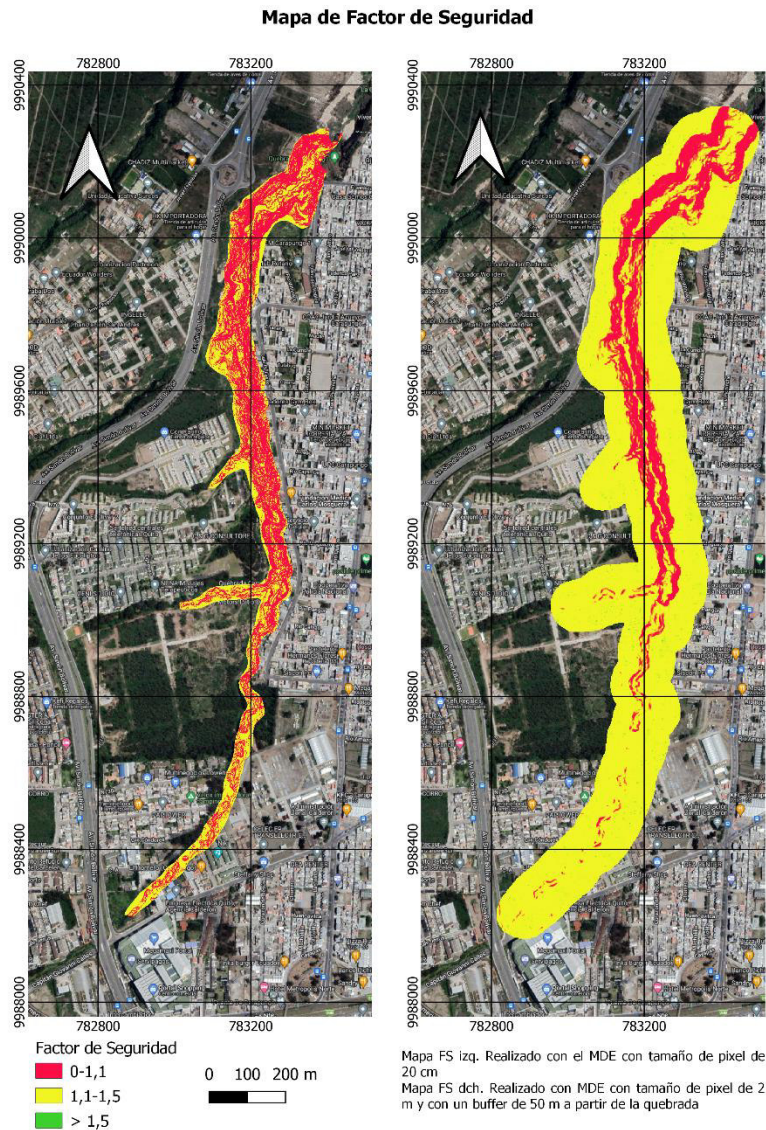


Figura 4.6 Mapa de Factor de Seguridad (Clasificación tomada de Ávila et al., 2016).

El mapa obtenido evidencia que la zona de estudio se encuentra en bajo (0 – 1,1) y moderado (1,1 – 1,5) grado de susceptibilidad en las laderas de la Quebrada Carretas.

Los esfuerzos de resistencia al corte tienen relación con la cohesión y el ángulo de fricción interna mientras que los esfuerzos al corte se relacionan con el peso específico y la pendiente, es decir la variación de los esfuerzos presentará una variación en el Factor de Seguridad.

Los valores de la resistencia al corte son los que condicionan la estabilidad de un terreno, si los valores aumentan el Factor de Seguridad también incrementa su valor, en base a lo visto en la Tabla 3.2 de parámetros geotécnicos, la Fm. Cangahua presente en la zona de estudio presenta una cohesión relativamente buena de 20 kN/m^2 , al igual que el ángulo de fricción de 20 grados.

En cuanto a los esfuerzos al cortante depende del peso específico y la pendiente de la ladera. El peso específico depende de la densidad natural de la unidad litológica mientras que a mayor pendiente de la ladera el Factor de Seguridad disminuye, dentro de la zona de estudio predominan pendientes fuertes.

4.5. Mapa de Aceleración Crítica

La Aceleración Crítica representa la estabilidad dinámica de una ladera independientemente de un evento sísmico, se calculó mediante la aplicación de la ecuación 3, que integra los valores de FS, gravedad y pendiente. Es decir, el mapa de Aceleración Crítica opera como un mapa de susceptibilidad en función de la gravedad, en otras palabras, es la mínima aceleración que requiere la ladera para que se genere un MM ver Figura 4.7.

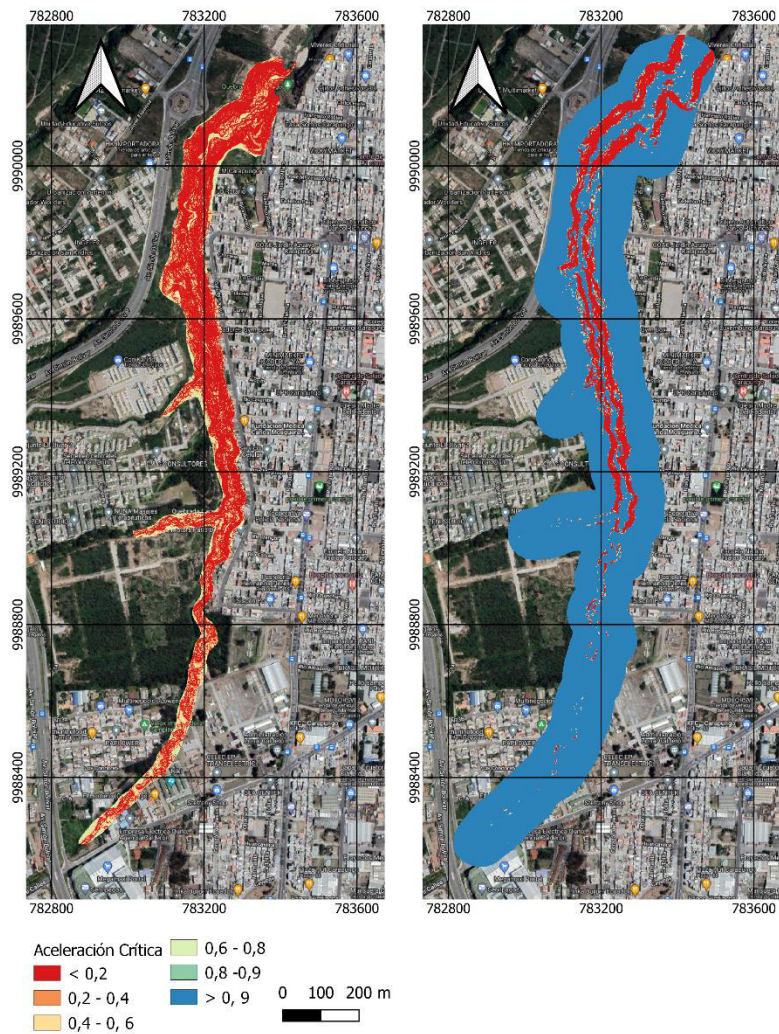


Figura 4.7 Mapa de Aceleración Crítica en función de la aceleración de la gravedad.

Al momento de obtener los datos de la Aceleración Crítica se presentaron valores negativos por lo cual se procede a reclasificar ya que con estos valores negativos nos indica que las zonas no requieren un movimiento sísmico para generarse un MM en esta zona, además físicamente la Aceleración Crítica representa una magnitud y no una dirección.

Dentro de la quebrada para los dos casos presentados se tiene una aceleración crítica $< 0,2$ g en los flancos de la ladera para comenzar a deslizarse, mientras que en la parte superior de las laderas la

Aceleración Crítica cambia a valores entre 0,2 g y 0,4 g. Estos resultados son concordantes con los rangos de aceleración sísmica para la ciudad de Quito en un período de recurrencia de 475 años de aceleración (hazard maps at 475-yr return period for PGA ($V_{s30}=760\text{m/s}$), según el trabajo de Beauval et al., (2018) en el que se tiene un valor de 0,4 g para las zonas a lo largo de la costa y dentro de las cordilleras.

4.6.Intensidad de Arias.

La Intensidad de Arias es una medida calculada a partir de registro de acelerogramas que permite evaluar los daños sísmicos y ayuda a determinar la reacción del suelo ante un evento sísmico. La Intensidad de Arias es un valor que se obtiene mediante la simulación de eventos sísmicos que cumplen con las condiciones geológicas y locales compatibles con el DMQ como son un V_{s30} entre 300 y 600 m/s, una distancia epicentral 10 a 30 km y un mecanismo de falla inverso.

Los datos obtenidos mediante el Software Seismosignal se indican en las siguientes figuras obtenidas mediante la simulación y comparación bibliográfica de los Sismos Coalinga (1983) de Mw 5.7 y para el sismo de Loma Prieta (1989) de Mw 6.9 (Merino, 2018; Benítez, 2018), los datos obtenidos son necesarios para poder aplicar en la ecuación de los Desplazamientos de Newmark.

Coalinga		Loma Prieta	
Parameter	Corrected Accelerogram	Parameter	Corrected Accelerogram
Vmax / Amax: (sec)	0,04353	Vmax / Amax: (sec)	0,09314
Acceleration RMS: (g)	0,01046	Acceleration RMS: (g)	0,04108
Velocity RMS: (cm/sec)	0,70696	Velocity RMS: (cm/sec)	3,75689
Displacement RMS: (m)	0,00174	Displacement RMS: (m)	0,03147
Arias Intensity: (m/sec)	0,10119	Arias Intensity: (m/sec)	1,30018
Characteristic Intensity (Ic)	0,00829	Characteristic Intensity (Ic)	0,05888

Figura 4.8. Datos simulados en el software SeismoSignal 2016 para el sismo de Coalinga (1983) y Loma Prieta (1989), (Tomado de Merino, 2018; Benítez, 2018).

Para determinar si la ocurrencia de los sismos simulados se compara con respecto a los eventos ocurridos en los últimos años de los cuales se tiene evidencia instrumental en el DMQ, expuestos por Cañizares, (2017). El sismo de la parroquia Calderón ocurrido en 2014 con una Mw 5.1 producto del Sistema de Fallas de Quito, este sismo provoco daños en las viviendas, caídas en taludes, se cerraron vías entre otros problemas dentro del DMQ. Se tuvieron más de 60 réplicas, además la aceleración máxima registrada de 0,048 g con una distancia epicentral de 13 km, se dio en la estación sísmica PRAM cuya ubicación es próxima al antiguo aeropuerto (Coordenadas de la estación sísmica: X -78,49 Y -0,14) IG-EPN ver Figura 4.9.

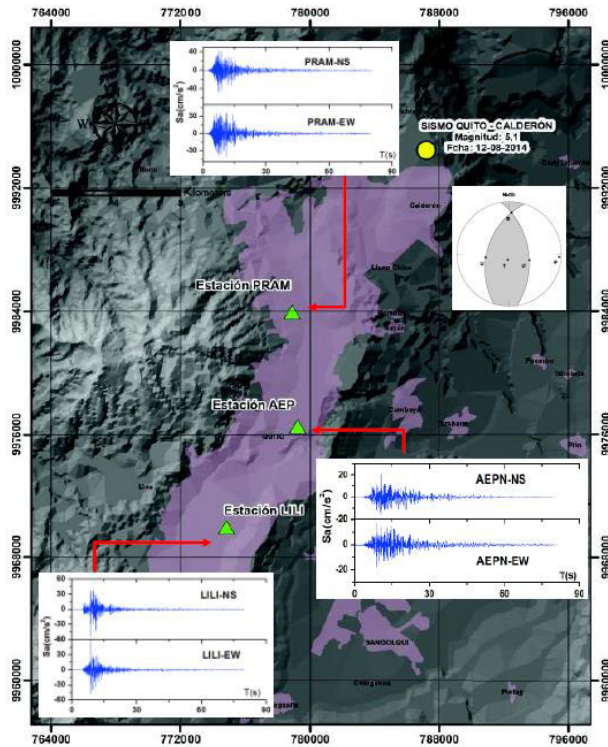


Figura 4.9 Sismo de Calderón 12 de agosto de 2014 registro en las estaciones (Tomado de Cañizares, 2017).

Los sismos simulados exceden los parámetros del sismo de Calderón, pero están dentro de los rangos propuestos Beauval et al., (2018), por lo que se simula un escenario probable, además presenta a los sismos como disparador de movimientos en masa.

4.7. Mapa de Desplazamientos de Newmark

El Desplazamiento de Newmark se calcula en base a la integración entre la Aceleración Crítica e Intensidad de Arias, utilizando la fórmula logarítmica y la clasificación cualitativa expresada en el capítulo 3. Se creó dos mapas para cada sismo utilizando los MDE y la Intensidad de Arias correspondiente como se puede observar en la Figura 4.10.

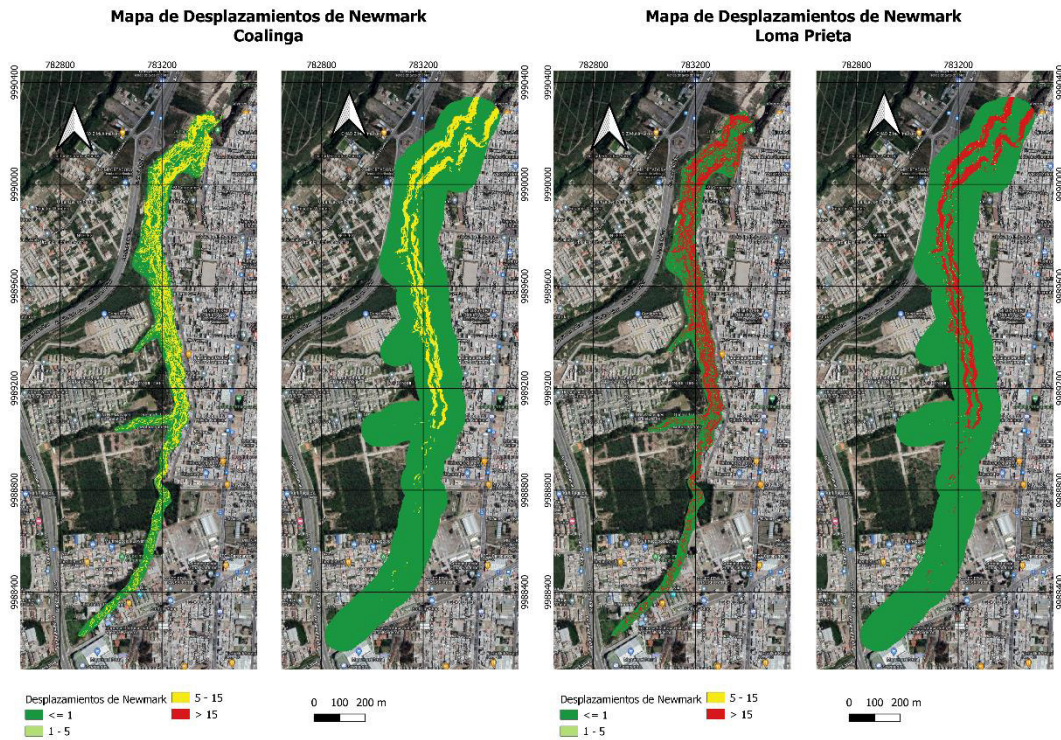


Figura 4.10 Mapas de Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa en la Quebrada Carretas, unidad en centímetros.

La zonificación de la amenaza para un escenario sísmico de magnitud Mw 5.7 de Coalinga, presenta un grado de peligro moderado con desplazamientos entre 5 – 15 cm, además, en la parte sur de la Quebrada Carretas existe una menor amenaza que se relaciona con el valor de la pendiente menor de entre 15 – 30 grados así como también a la cobertura vegetal. También, en un escenario sísmico más grande de Mw 6.9 (Loma Prieta) la amenaza presentada en la zona de estudio aumenta a desplazamientos mayores a 15 cm siendo una amenaza muy alta. Los desplazamientos producidos al generarse un evento sísmico muestran la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.

4.8. Calibración de la Metodología

Se utiliza el inventario de movimientos en masa para calibrar la validez del método. Para ello se compara el mapa de movimientos en masa junto con el mapa de desplazamientos obtenidos, con lo que se observa la correlación de los movimientos en masa mapeados con las zonas de desplazamiento.

La Metodología de Newmark presenta teóricamente zonas donde se podrían generar movimientos en masa por lo que esta metodología exhibe áreas con mayor peligrosidad que son las mismas donde se presentan inestabilidades preexistentes.

La superposición de los mapas de Desplazamientos de Newmark junto con los escarpes de movimientos en masa producidos dentro de la Quebrada Carretas, concuerdan con zonas de alta amenaza a desplazamientos mayores a 15 cm. La metodología se adapta a las condiciones existentes con resultados que se pueden identificar en el modelo y en la realidad de la Quebrada Carretas.

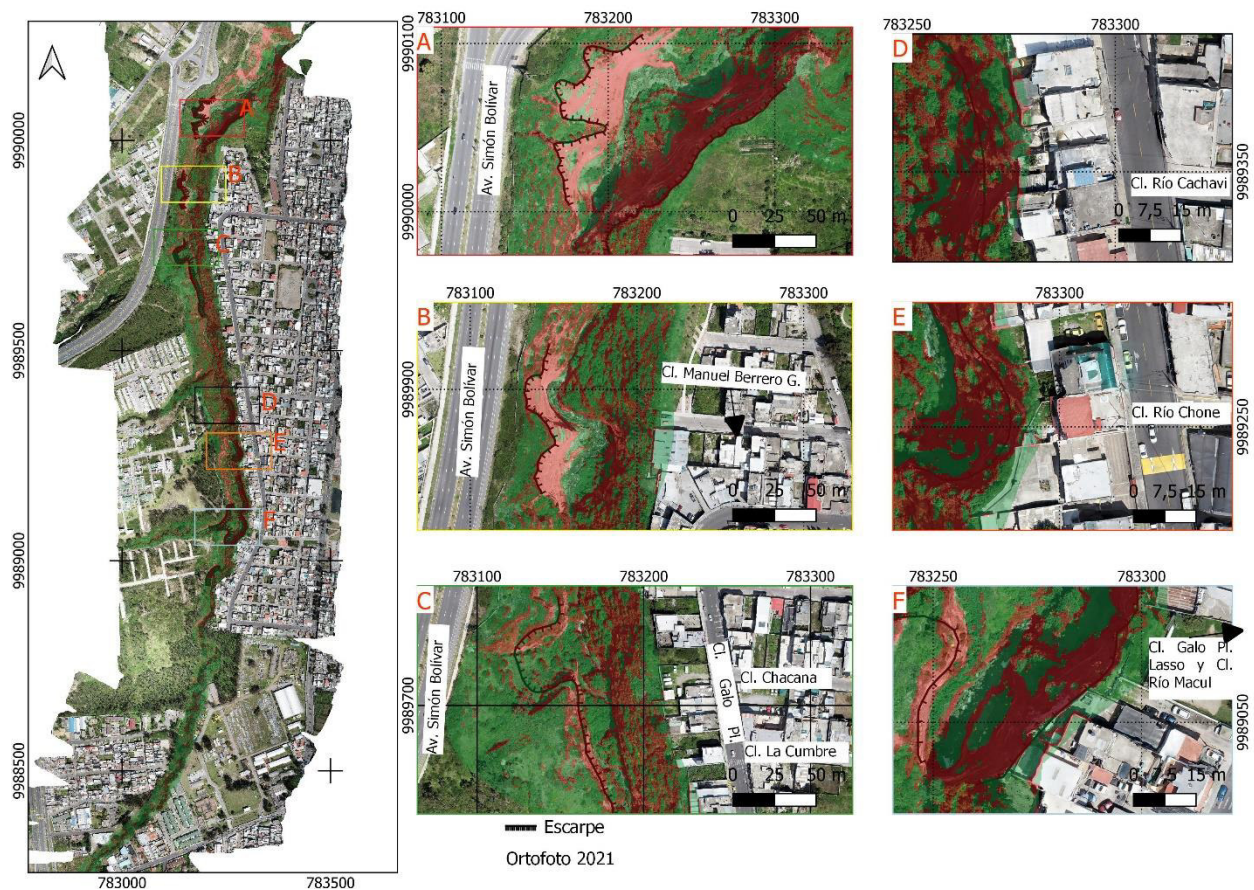


Figura 4.11 Correlación entre el sismo de Loma Prieta y los escarpes en las diferentes zonas de la Quebrada Carretas.

4.9. Discusión

En la aplicación de la metodología se utilizó MDE con resoluciones de 0,2m y 2m con el fin de identificar diferencias entre los productos cartográficos generados mediante un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT). Si bien el uso de un MDE obtenido por un VANT ofrece una mejor resolución y aumenta significativamente la rapidez de su realización, con una vegetación muy densa los datos generados son de alta definición que incorpora los rasgos de la flora presente en la zona de estudio. Al utilizar un MDE con una resolución menor en este caso de tamaño de pixel de 2 m la calidad de los datos tendrá un bajo nivel de detalle. El tamaño del pixel o resolución espacial es importante en cuanto a la escala y resolución de los datos involucrados, para de esta manera poder demostrar

los resultados de una forma correcta y legible para los lectores, cada vez más MDE de alta resolución son necesarios en aplicaciones específicas como: análisis de riesgos y desastres, definir drenajes a nivel urbano. Al aplicar una algebra de mapas se necesita que los ráster procesados tengan la misma resolución para no infravalorar los datos obtenidos. En los diferentes mapas obtenidos es importante una buena resolución ya que nos permite identificar zonas con baja, moderada, alta y muy alta amenaza.

Los datos que se utilizaron para modelar los mapas fueron obtenidos en base a la recopilación de la información bibliográfica y a las observaciones realizadas en la salida de campo. Los datos geotécnicos fueron obtenidos del estudio técnico realizado por Valverde, (2004) mediante perforaciones que llegaron a una profundidad de 6 metros de la Fm. Cangahua, los cuales permitieron el análisis e implementación de la metodología de Desplazamientos de Newmark, sin embargo, una geología y geotecnia más detalladas de la Fm. Cangahua, las cenizas volcánicas intercaladas y las zonas de relleno, permitirán una mejor zonificación de la zona de estudio. Es importante recalcar que la morfología del área de estudio al ser muy escarpada dificulta la obtención de datos, por lo cual herramientas como un VANT, facilitan la recopilación de datos geológicos en menor tiempo.

El DMQ al estar ubicado en una zona sismogénica producto de la actividad del Sistema de Fallas inversas de Quito, que pueden generar sismos de magnitud entre M_w 5.7 a M_w 7.1, está expuesto a condiciones de multiamenazas ya que pueden conjugarse sismos, lluvias en un mismo espacio físico y disparar movimientos en masa. Los sismos simulados para este estudio de zonificación de la amenaza por movimientos en masa se basan en datos de terremotos internacionales que cumplen condiciones como V_{s30} , profundidad epicentral, tipo de suelo y mecanismo de fallamiento

similares a las condiciones del Sistema de Fallas inversas de Quito. Los sismos de Coalinga, 1983 y Loma Prieta, 1989 de magnitud Mw 5.7 y Mw 6.9 respectivamente, están en el rango de sismos esperados en la ciudad. Además, la aceleración crítica calculada en este trabajo académico de 0.2g a 0,4g y la aceleración sísmica de los sismos simulados para la zona de estudio, están entre los rangos considerados en el nuevo modelo de amenaza sísmica propuesto por Beauval et al., (2018) que muestran en las zonas de cordillera y costera una aceleración de 0,4g, pero este valor puede variar o ser menor en base a su localización. Sin embargo, el sismo de Coalinga, 1983 Mw 5.7 que se produjo a una profundidad de 8,4 km y con una aceleración sísmica de 0.2g tendría una mayor correlación con el sismo esperado para el DMQ ya que en el trabajo de Alvarado et al., (2014) propone que en un término más restringido con una profundidad de 3 a 7 km se espera un sismo de Mw 6.6, a diferencia del sismo de Loma Prieta, 1989 que se genera a una profundidad de 17,4 km y con aceleración sísmica de 0,27g. Por ende, la simulación del terremoto de Coalinga, 1983 y la obtención de la Intensidad de Arias e integrando este valor en la metodología implementada representaría una zonificación de la amenaza por movimientos en masa inducidos por sismos cuyo desplazamiento sería de 5 – 15 cm que están en un rango de alta amenaza.

La Metodología de Desplazamientos de Newmark se aplica a través de la integración de datos obtenidos en la recopilación de información geológica y geotécnica, además de obtener la ortofoto de la zona de estudio mediante el sobrevuelo del VANT que permitió obtener información de la geomorfología de la zona de estudio. Estos datos se adaptan y se generan capas ráster en un geoproceto utilizando un Sistema de Información Geográfica que tiene ventajas como utilizar diferentes técnicas de análisis, velocidad en el cálculo de datos y la generación de mapas, además es posible mejorar los resultados ajustando las variables a utilizarse en el cálculo hasta obtener un resultado satisfactorio. Del mismo modo a medida que se analiza los datos se producen nuevos

resultados pudiendo ser éstos actualizados en los modelos digitalizados. No obstante, el uso del SIG presenta ciertas desventajas en su uso para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa la digitalización de los datos tiene un tiempo relativamente largo. Combinando las parte analítica, técnica y profesional se genera un ejercicio teórico y práctico que es aplicable en diferentes zonas tanto locales como a nivel regional.

Esta zonificación de la amenaza utilizando la Metodología de Desplazamientos de Newmark ha sido implementada en dos zonas del DMQ: 1) Merino, (2018) realiza su estudio técnico en el barrio Atacaba que se localiza en la parte noroccidental de Quito, evaluando la amenaza por movimientos en masa en condiciones secas y saturadas, la zona de estudio presenta una mayor amenaza en condiciones saturadas y en zonas de relleno, los mayores desplazamientos son de 12 cm. 2) Benítez, (2018), en la zona de Atucucho, analiza la amenaza por movimientos en masa en condiciones secas y saturadas teniendo como factor desencadenante un sismo, las áreas con mayor amenaza en este estudio corresponden a las laderas y zonas de relleno con un desplazamiento mayor a 5 cm en condiciones saturadas. 3) Zapata, (2018), realizo su estudio sobre la evaluación del peligro a movimientos en masa inducidos por sismos en Quito, tomando en cuenta diferentes escenarios en condiciones secas y saturadas, el nivel de peligro está dado por la magnitud y epicentro del sismo, pero independientemente del epicentro siempre existe un nivel de peligrosidad alta (5-15 cm) y muy alta (>15 cm) en desplazamientos inducidos por sismos. En los resultados obtenidos en este estudio técnico se determinó que la amenaza por movimientos en masa inducidos por sismos tiene valores similares a los ya conseguidos en trabajos anteriores corroborando la validez de la metodología aplicada.

Como una parte de la Metodología de Newmark se emplea un inventario de movimientos en masa para valorar la eficacia del método. Los movimientos en masa mapeados e integrados al SIG son en base a la interpretación de ortofotos realizadas por Hidalgo, (2020B) y revisadas en este trabajo. Al correlacionar la información se obtuvo que los MM se encuentran en zonas con alta y muy alta amenaza dependiendo del sismo simulado Coalinga y Loma Prieta respectivamente, es importante mencionar que los MM mapeados su factor disparador corresponde a intensas lluvias y erosión al pie de las laderas por lo que estas zonas corresponderán a ser las más afectadas en caso de suscitarse un evento sísmico. La metodología implementada se adapta a las condiciones presentes en la zona de estudio que se relacionan entre el modelo y lo observado en campo.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La Quebrada Carretas se caracteriza por fuertes pendientes mayores a 30 grados en las laderas producto de una fuerte erosión en el pie de las laderas lo que ocasiona que se generen movimientos en masa.
- La Quebrada Carretas esta recubierta en su mayoría por la Fm. Cangahua e intercalaciones de cenizas volcánicas que tienen espesores desde 5 m hasta 1 m, y zonas de relleno en su parte superior.
- Utilizar modelos digitales de elevación de resolución: 0,2m y 2m permitió generar mapas de Aceleración Crítica, Intensidad de Arias y Desplazamientos de Newmark con diferente nivel de información, al igual que la vegetación presente en la zona de estudio provoca cambios en las pendientes de la quebrada.
- Las propiedades geotécnicas de la zona de estudio se realizaron en base a la recopilación bibliográfica y datos de perforaciones realizadas por Valverde, (2004), obteniendo un promedio general para la Quebrada Carretas. Estas propiedades muestran el comportamiento mecánico del terreno en valores de cohesión: 20,606 kN/m², ángulo de fricción: 20 ° y peso específico: 13,692 kN/m³.
- Esta Metodología de Desplazamientos de Newmark, se basa en un análisis entre los datos observados en campo para definir la geología, geotecnia y el uso de Sistemas de Información Geográfica para determinar los desplazamientos inducidos por un sismo.
- Si bien la Metodología de Desplazamientos de Newmark ha sido utilizada a escala regional en trabajos de Figueras (2005) y Jibson et al., (2009) es importante mencionar su uso a escala local, ya que proporciona información aproximada sobre el comportamiento de los

taludes en las zonas con la probabilidad de generarse un movimiento en masa inducido por un sismo en base a su nivel de amenaza.

- La Aceleración Crítica genera un mapa de susceptibilidad ante la mínima aceleración que se requiere para producir un movimiento en masa (independiente de un sismo) esto en función de la gravedad. En el cálculo de la Aceleración Crítica se obtuvieron valores $< 0,2g$ y $0,2g - 0,4g$ estos valores están dentro del rango de $0,2g$ a $0,4g$ valores obtenidos por Beauval et al., (2018) para un sismo probable con un periodo de retorno de 475 años.
- La Intensidad de Arias se utilizó para dos eventos sísmicos Loma Prieta, 1989 Mw 6.9 y Coalinga, 1983 Mw 5.7 que cumplen parámetros similares para las condiciones geológicas y tectónicas del DMQ como son un V_{s30} de 350-600 una distancia epicentral de 10 a 30 km y un mecanismo inverso.
- La Zonificación de la amenaza por movimientos en masa utilizando como factor detonante un evento sísmico, para este caso se utilizó dos eventos de magnitud Mw 5.7 y Mw 6.9 de Coalinga y Loma Prieta respectivamente, permitió identificar zonas con media amenaza (5 -15 cm) y alta amenaza (>15 cm).
- La correlación entre el mapa de Desplazamientos de Newmark y el inventario de movimientos en masa permite validar la aplicación de este método en la zona de estudio ya que las zonas de alta amenaza coinciden con los MM mapeados que tienen como factor disparador las lluvias y erosión al pie de la ladera por lo que la aplicación de esta Metodología puede ser aprovechada a nivel local en los causes de quebradas del DMQ.

5.2.Recomendaciones

- Es recomendable poseer mayor información como la ubicación de los sitios de muestreo de las perforaciones realizadas acerca de los datos geotécnicos de la zona especialmente para realizar la zonificación de amenazas en estas áreas y efectuar una geoestadística adecuada.
- Realizar un mapeo geológico de los taludes para identificar las zonas de relleno presentes en la zona de estudio, ya que al tener valores de parámetros geotécnicos menores a la Fm. Cangahua son áreas más susceptibles a movimientos en masa.
- Al momento de utilizar un MDE se debe tomar en cuenta la vegetación de la zona, para así poder eliminar esta vegetación y poder hacer una interpretación de los datos al verse afectados por este parámetro.
- Es importante el monitoreo constante de las quebradas por parte de instituciones públicas como de las comunidades aledañas a estas zonas manteniendo una mutua relación y acuerdo en el cuidado y mantenimiento de las zonas de quebradas.
- Se recomienda replicar estudios de la Metodología de Desplazamientos de Newmark en las quebradas del DMQ, para poder facilitar información ante la amenaza de movimientos en masa tanto en condiciones con humedad como en un evento sísmico.

Bibliografía

- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Env* 58, 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., y Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. In: R.Hansen (Editor), *Seismic Design for Nuclear Power Plant*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Aristizábal, E., Martínez, H., y Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 209-227.
- Ávila, G., Cubillos, C., Granados, A., Medina, E., Rodríguez, É., Rodríguez, C., y Ruíz, G. (2016). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J. M., Alvarado, A., ... y Jomard, H. (2018). A new seismic hazard model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1443-1464.
- Benítez F., B. A. (2018). *Zonificación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en la Zona de Atucucho, Noroccidente de Quito*. [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional].

- Benítez, F. (2018). Zonificación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en la Zona de Atucucho, Noroccidente de Quito. [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]
- Bonifaz, F. (2021). Obras Hidráulicas de Recuperación y Protección de taludes de la Quebrada Carretas, Barrio Puertas del Sol. Empresa Publica Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas.
- Cañizares, F. (2017). Selección de las Ecuaciones de Atenuación (GMPE'S) Compatibles con el Sistema de Falla de Quito. [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18981/1/CD-8377.pdf>
- Cardona, O. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: “Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo”.
- Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Sabatakakis, N., Kavoura, K., Drakatos, G., Bathrellos, G. D., y Skilodimou, H. D. (2016). Assessment of earthquake-induced landslide hazard in Greece: From Arias intensity to spatial distribution of slope resistance demand. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(1), 174-188.
- Corominas Dulcet, J. y Garcia Yague A. (1997). Terminología de los movimientos de laderas, en Memorias, IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España, p. 1051–1072.
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, 247.
- Cruden, D. M. (1991). A Simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v. 43, 27–29.

- Cuanalo C., O. A., Quezada P., P., Aguilar M., A., Olivan R., A. M., y Barona D., E. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. *e-Gnosis*, 4, 0.
- De Freitas, M.H., y Watters, R.J. (1973). Some field examples of toppling failure: *Geotechnique*, v. 23, 495–514.
- Egbue, O., y Kellogg, J. (2010). Pleistocene to present North Andean “escape”. *Tectonophysics*, 489(1-4), 248-257.
- Ego, F., Sébrier, M., Lavenu, A., Yepes, H., y Egues, A. (1996). Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259(1-3), 101-116.
- Estrategía Internacional para la Reducción de Desastres [UNISDR] (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Recuperado de: www.unisdr.org/publications
- Figueras, V., Roig, M., Goula, G., Díaz, G., y Crecit, M. (2005). Aplicación del Método de Newmark para el Estudio de los Movimientos de Ladera Activados por Terremotos en Andorra. 12.
- Hall, M.L. y Yopez, H. (1980). Fallamiento y actividad microsísmica en el Valle interandino, Ecuador. *Revista Geofísica, IPGH* 13: 36-44
- Hidalgo, D. (2020B). Proyecto Geológico 2020B. Unpublished, 1-10.

- Hsieh, S.-Y., y Lee, C.-T. (2011). Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration. *Engineering Geology*, 122(1–2), 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.12.006>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la Republica de Ecuador (2010). Censo de población y vivienda 2010. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jibson, R. W. (1993). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record*, 1411, 9–17.
- Jibson, R. W., y Michael, J. A. (2009). Maps Showing Seismic Landslide Hazards in Anchorage, Alaska. In *Maps Showing Seismic Landslide Hazards in Anchorage, Alaska* (USGS Numbered Series No. 3077; Scientific Investigations Map, Vol. 3077). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sim3077>
- Lavenu, A., Baudino, R., Ego, F. (1996). Stratigraphie des dépôts Tertiaires et Quaternaires de la Depression Interandine d'Equateur (entre 0° et 2°15S). *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines* 25, 1 - 15.
- Lavenu, A., Noblet, C., y Winter, T. H. (1995). Neogene ongoing tectonics in the Southern Ecuadorian Andes: Analysis of the evolution of the stress field. *Journal of Structural Geology*, 17(1), 47–58. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)E0027-V](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)E0027-V)
- León, A. (2018). Generación de mapas Vs30 y microzonas sísmicas en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. [Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar]
- Litherland, M., Aspden, J., y Jemielita, R. (1994). The metamorphic belts of Ecuador. 11(*British Geological Survey, Overseas Memoir*), 147.

- Lonsdale, P. (1978). Ecuadorian subduction system. AAPG Bulletin, 62(12), 2454-2477.
- López, M. (2013). Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel Nacional escala 1:25 000, 30.
- Merino Ch., L. R. (2018). Zonificación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en el Barrio Atacaba, Noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito. [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19426>
- Miles, S. y Keefer, D. (2001). Seismic landslide hazard for the cities of Okland and Piedmont, California. (U. G. Survey, Ed.) Various field studies MAP MF 2379
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (2015). Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial - Diagnóstico Estratégico - Eje Territorial.
- Newmark, N. M. (1965). Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. Géotechnique, 15(2), 139–160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- Ordoñez, J. (2021). Motivación Técnica para Resolución de Declaratoria de Emergencia en el Barrio Puertas Del Sol, Parroquia Calderón, colindante con la Quebrada Carretas. Municipio Del Distrito Metropolitano De Quito. Secretaria General De Seguridad Y Gobernabilidad. Dirección Metropolitana De Gestión De Riesgos.
- Peltre, P. (1989). Riesgos Naturales en Quito Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi (Corporación Editora Nacional).

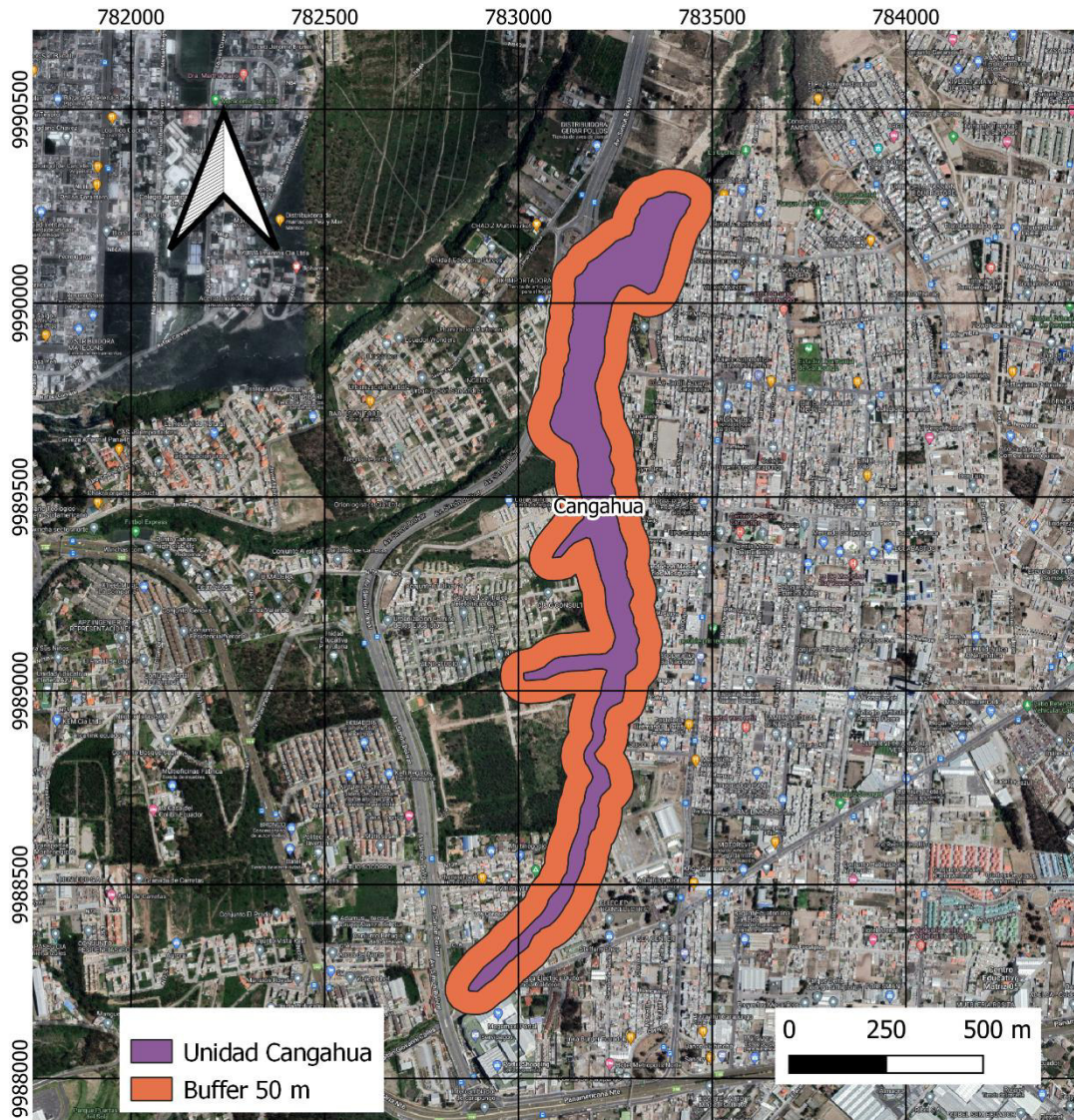
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770.
- Proyecto Multinacional Andino (2007). *Geociencias para las Comunidades Andinas - Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. No. 4, 432.
- QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Ramírez, M., y Sánchez, E. (2014). Manejo del riesgo que generan los taludes de la quebrada La Seca, del municipio de Envigado. *Cuaderno Activa*, 6, 109–121.
- Rivera, M. (2006). Consultoría para la Elaboración del Plan de Gestión Integral De Riesgos de la Cuenca del Río Monjas. Dirección Metropolitana De Gestión De Riesgos, 312
- Rodríguez Peces, M. J., García Mayordomo, J., Azañón Hernández, J. M., & Jabaloy Sánchez, A. (2008). Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG. *Boletín geológico y minero*, 119(4), 459-472.
- Schmidt, V. (2012). Determinación del parámetro vs30 usando los métodos FK y SPAC en la bahía de Cádiz (sur de España). *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, 22(1), 39-54.
- Spikings, R. A., Winkler, W., Seward, D., y Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 186(1), 57-73.

- Suárez, J. (2009). Deslizamientos: Análisis Geotécnico. (Vol.1), <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>
- Terán, A., Salazar, D., Medina, I., Salazar, A., Acosta, J., y Cortez, K. (2015). Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito.
- Tibaldi A. y Ferrari L. (1992). From latest Miocene thrusting to Quaternary transpression and transtension in the Interandean Valley, Ecuador. *Journal Geodynamics*, Vol 15, No. 1/2, 59-83.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., y Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
- Valverde, J. (2004). Estudio Geológico – Geotécnico para un conjunto Habitacional Ubicado en el Norte de la ciudad de Quito, 1-23.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster; R.J. Krizek (eds). *Landslides, analysis and control*. Special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, 11-33.
- Villagómez, D. (2003). Evolución Geológica Plio-cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio de Pichincha). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18366.43843>
- Winkler, W., Spikings, R., Villagomez, D., Eiguez, A., y Tobler, S. (2002). The Chota Basin and its significance for the formation of the Inter-Andean Valley in Ecuador. *Fourth ISAG*, 705-708.

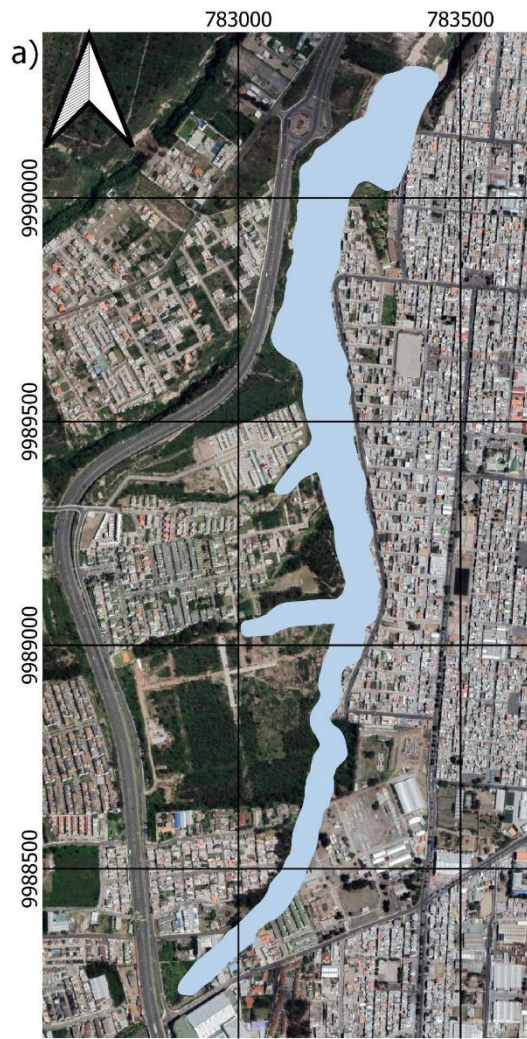
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., y Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006>
- Winter, T. (1990). Mécanismes de déformation récentes dans les Andes équatoriennes. These de l'Université d'Orsay, Paris, 180.
- Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordoñez, M., Jiménez, N., y Sosson, M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape. *Tectonics*, 25(3).
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., y Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. *Tectonics*, 35(5), 1249-1279.
- Zapata Tapia, M. C. (2018). Assessment of earthquake-induced landslides hazard in Quito, Ecuador. [Tesis de Maestría, Universidad EAFIT]

ANEXOS

ANEXO I. Mapa de Geología



ANEXO II. Mapa de Parámetros Geotécnicos



Peso Específico
13,69 kN/m³

0 100 200 m

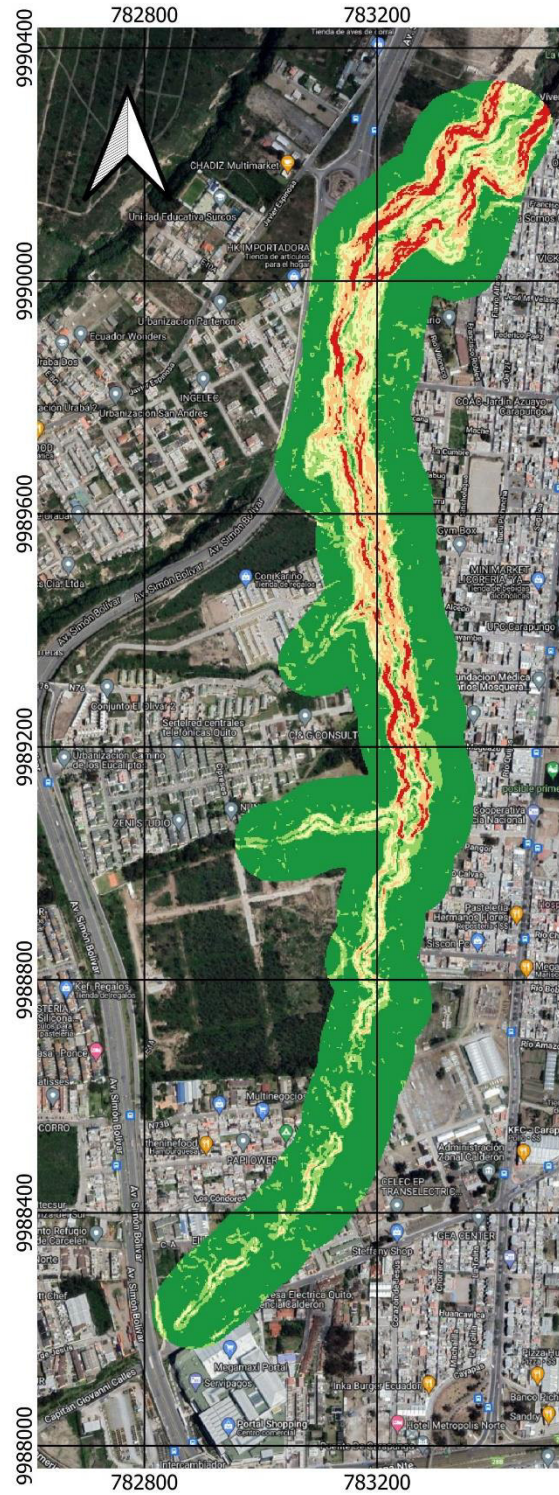
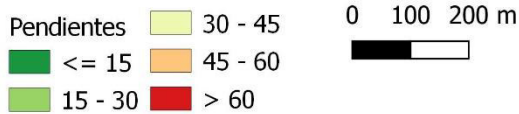
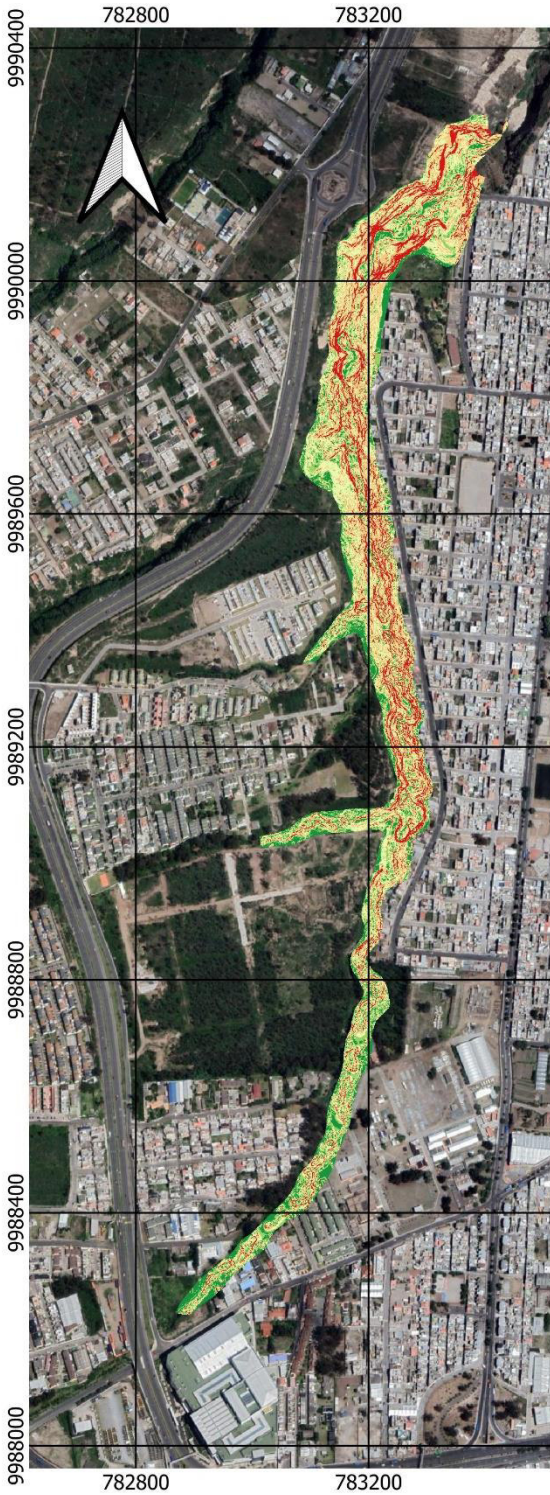


Ángulo Fricción Interna
0,36 rad



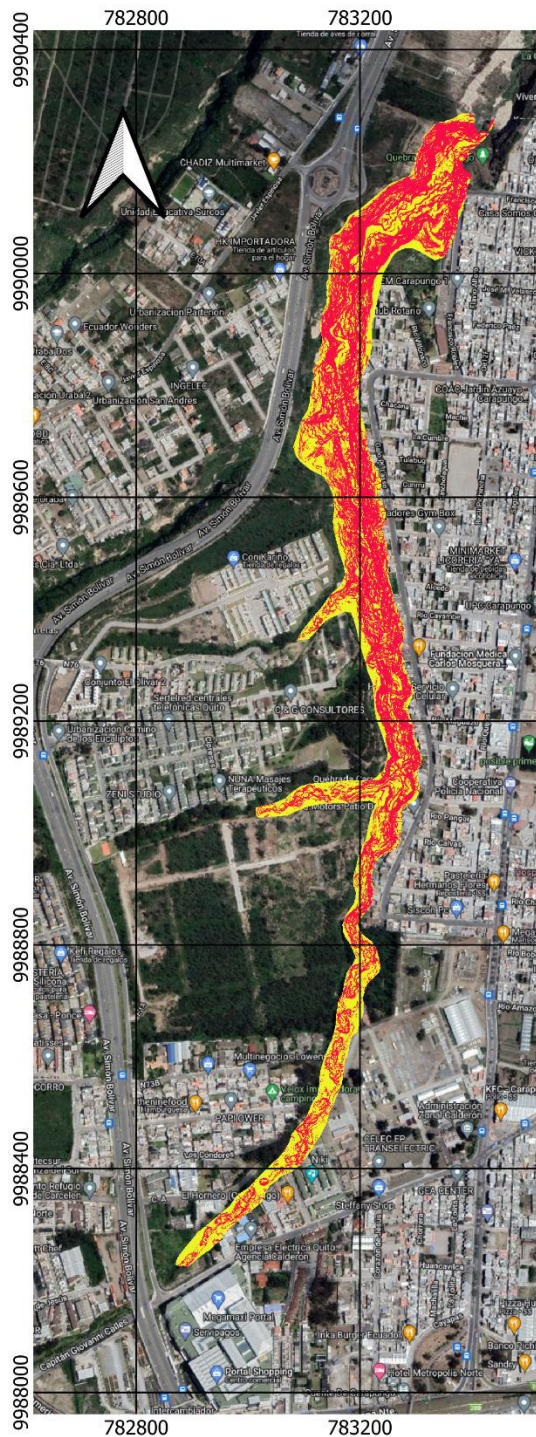
Cohesión
20,6 kN/m²

ANEXO III. Mapa de Pendientes.



Mapa Pendientes izq. Realizado con el MDE con tamaño de pixel de 20 cm
 Mapa Pendientes dch. Realizado con MDE con tamaño de pixel de 2 m y con un buffer de 50 m a partir del borde de cuadrada

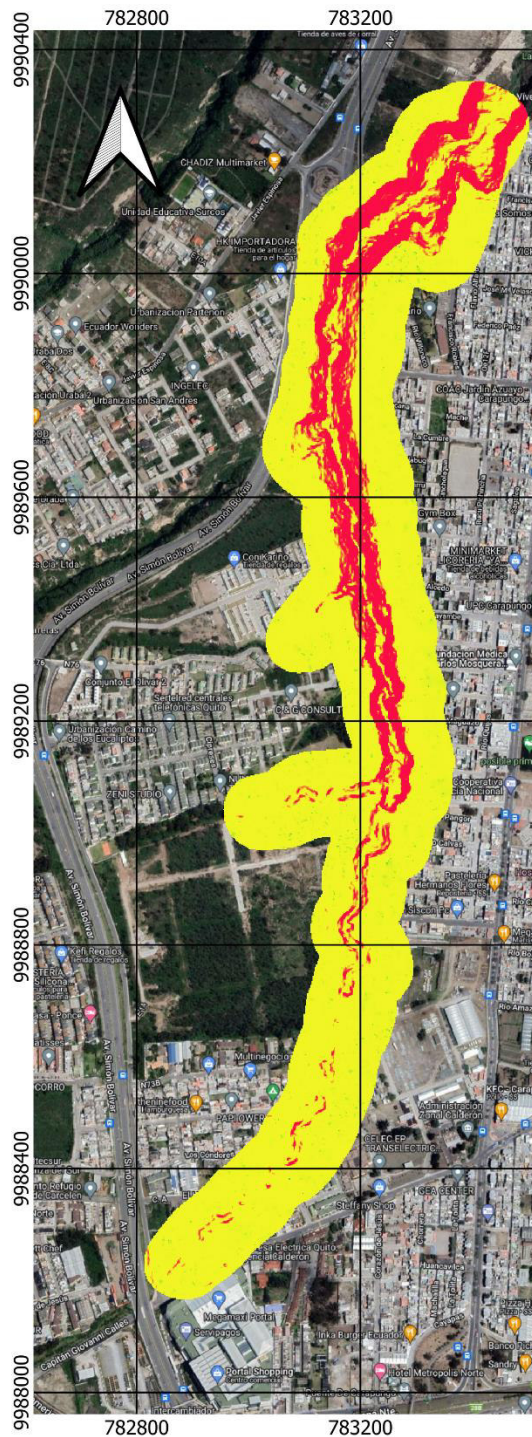
ANEXO IV. Mapa de Factor de Seguridad



Factor de Seguridad

- 0-1,1
- 1,1-1,5
- > 1,5

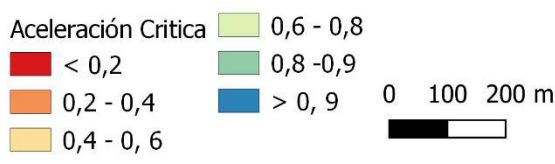
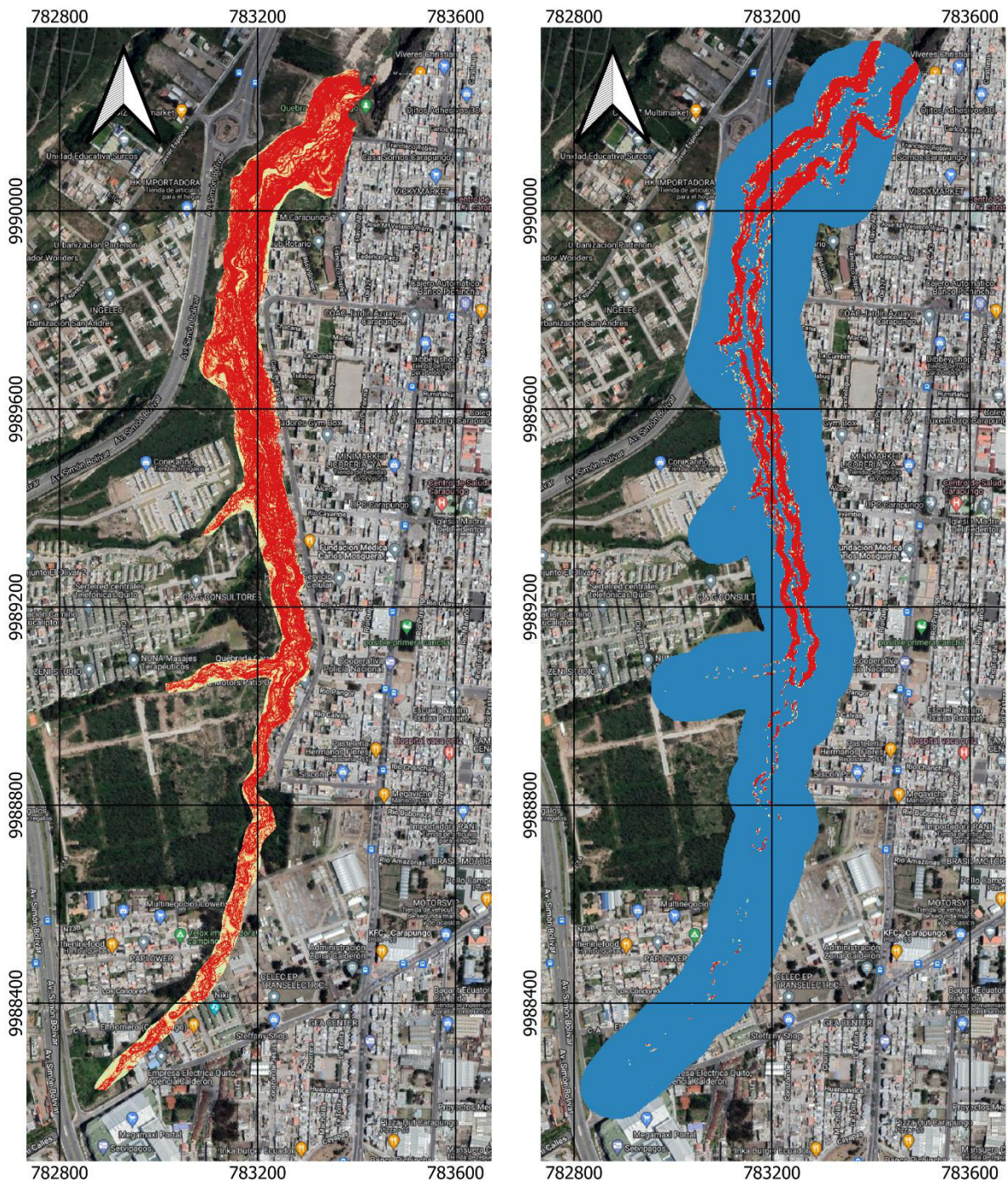
0 100 200 m



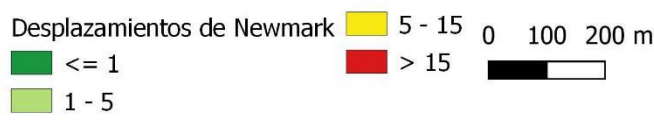
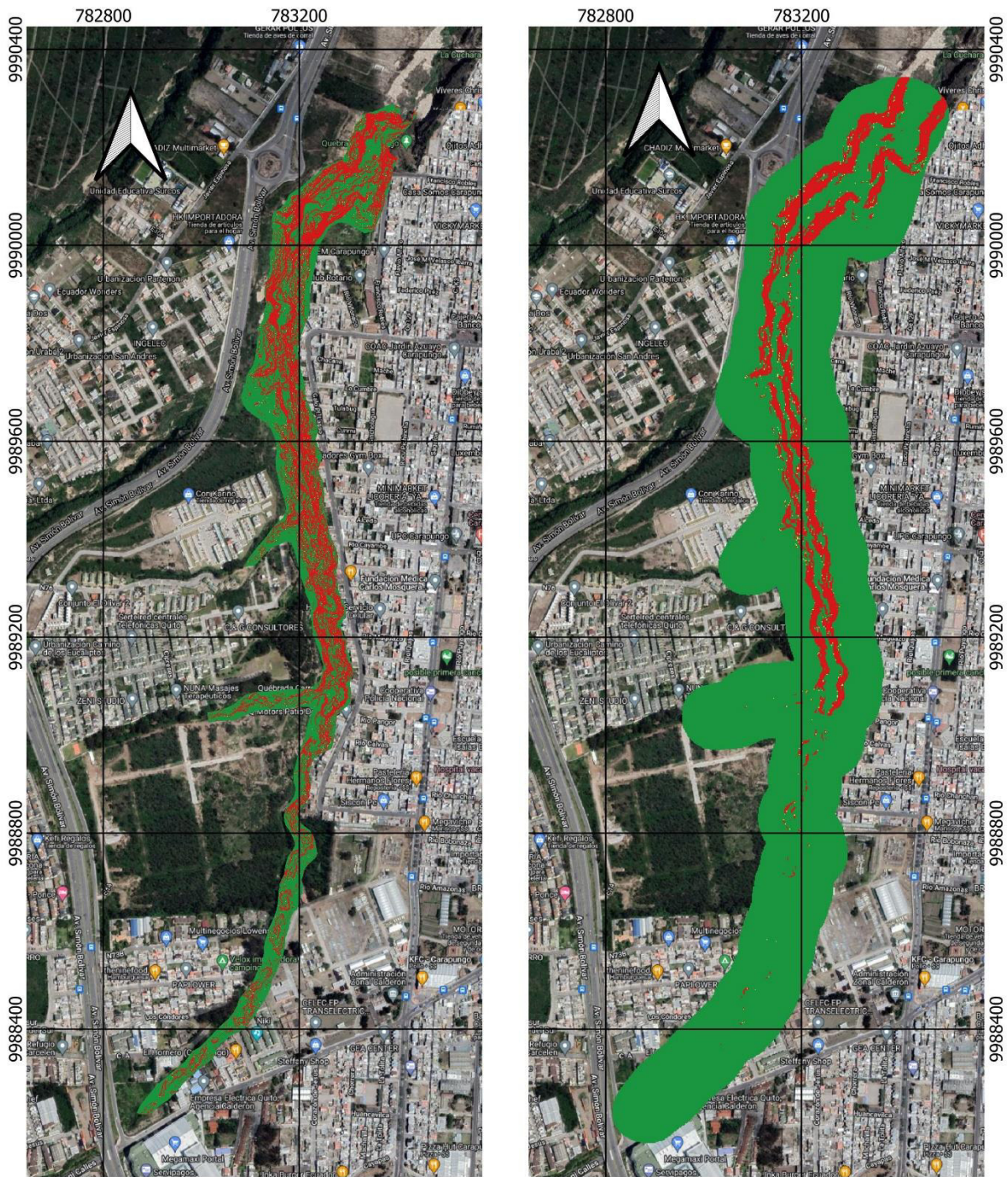
Mapa FS izq. Realizado con el MDE con tamaño de pixel de 20 cm

Mapa FS dch. Realizado con MDE con tamaño de pixel de 2 m y con un buffer de 50 m a partir de la quebrada

ANEXO V. Mapa de Aceleración Crítica

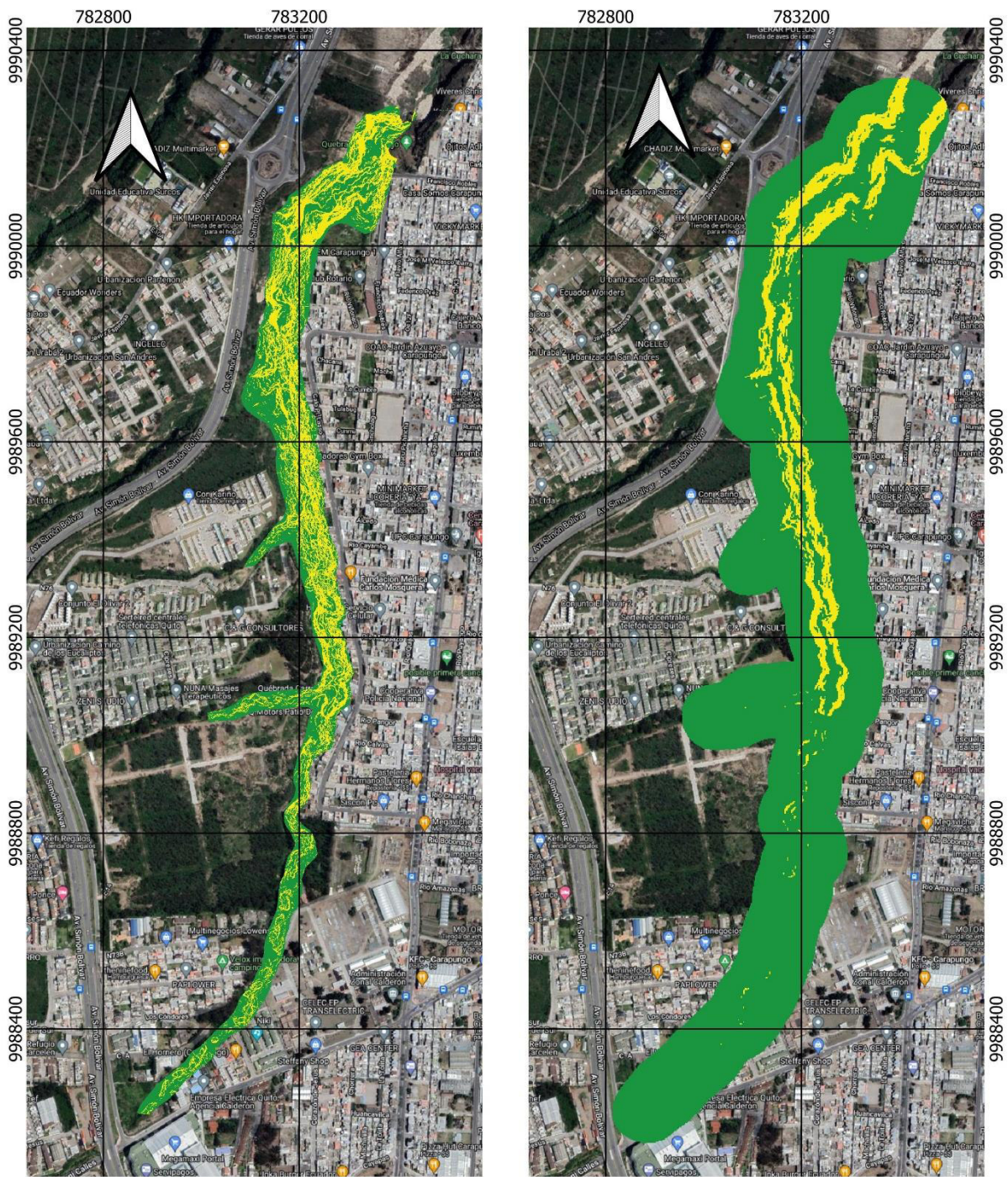


ANEXO VI. Mapa de Desplazamientos de Newmark Loma Prieta



Mapa izq. Realizado con el MDE con tamaño de pixel de 20 cm
 Mapa dch. Realizado con MDE con tamaño de pixel de 2 m y con un buffer de 50 m a partir de la quebrada

ANEXO VI. Mapa de Desplazamientos de Newmark Coalinga



Mapa izq. Realizado con el MDE con tamaño de pixel de 20 cm
 Mapa dch. Realizado con MDE con tamaño de pixel de 2 m y con un buffer de 50 m a partir de la quebrada

ANEXO VII. Mapa de Calibración utilizando la Zonificación con el sismo de Loma Prieta Mw 6.9

